

ЭНЦИКЛОПЕДИЯ

ДЛЯ ДЕТЕЙ



ФИЗИКА

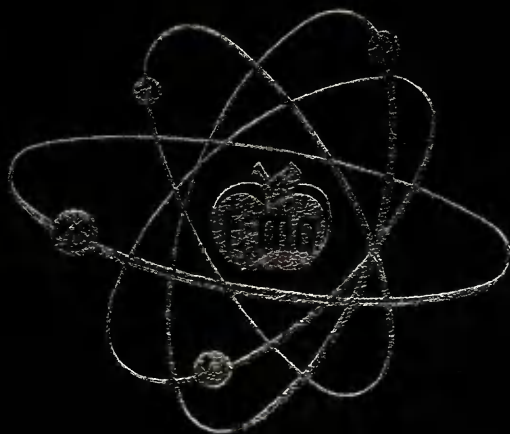
Биография физики
Путешествие в глубь материи
Механическая картина мира





ЭНЦИКЛОПЕДИЯ для детей

ФИЗИКА



*Допущено Департаментом общего среднего образования
Министерства образования Российской Федерации.
(Письмо № 146/11-17 от 13.04.2000.)*

*Рекомендовано Международным центром обучающих
систем (МЦОС) и международной кафедрой-сетью
ЮНЕСКО/МЦОС в качестве учебного пособия.
(Письмо № 95 от 08.04.99.)*



Аванта

СОВЕТ ДИРЕКТОРОВ

Мария Аксёнова, Георгий Храмов

ГЛАВНЫЙ РЕДАКТОР

Виктор Володин

ГЛАВНЫЙ ХУДОЖНИК

Елена Дукельская

МЕТОДОЛОГИЧЕСКИЙ РЕДАКТОР ТОМА

Александр Элиович

ВЕДУЩИЙ НАУЧНЫЙ РЕДАКТОР ТОМА

Валерий Санюк

ОТВЕТСТВЕННЫЙ РЕДАКТОР ТОМА

Анастасия Евсеевичева



ЭНЦИКЛОПЕДИЯ ДЛЯ ДЕТЕЙ *Аванта+*



ФИЗИКА

ТОМ 16

Часть первая

Биография физики
Путешествие в глубь материи
Механическая картина мира

Москва

Аванта+

2002



УДК 087.5:53(031)
ББК 22.2я2+22.3я2
Э68

ICES



INTERNATIONAL CENTRE OF EDUCATIONAL SYSTEMS (ICES)
МЕЖДУНАРОДНЫЙ ЦЕНТР ОБУЧАЮЩИХ СИСТЕМ (МЦОС)
CENTRE INTERNATIONAL DES SYSTEMES D'EDUCATION (CISE)
INTERNATIONALES ZENTRUM FÜR AUSBILDUNGSSYSTEME (IZAS)

UNEP
Reg. P. 05973
UNESCO
Reg. P. 002353
UNEP
Reg. St. 24.05.99



**МЕЖДУНАРОДНАЯ КАФЕДРА - СЕТЬ ЮНЕСКО/МЦОС
"ПЕРЕДАЧА ТЕХНОЛОГИЙ ДЛЯ УСТОЙЧИВОГО РАЗВИТИЯ"**

Рекомендовано Международным центром обучающих систем (МЦОС) и международной кафедрой-сетью ЮНЕСКО/МЦОС в качестве учебного пособия.

Серия «Энциклопедия для детей» рекомендована Департаментом образовательных программ и стандартов общего образования Министерства образования Российской Федерации.

Ассоциация книгораспространителей Независимых Государств, Московский городской Дворец творчества детей и юношества, Московский детский фонд, Государственная республиканская детская библиотека наградили в конкурсе на лучшую книгу года издательское объединение «Аванта+» дипломом от 29.03.99 за лучший издательский проект года для детей и юношества.

За профессиональное издательско-полиграфическое исполнение «Энциклопедии для детей» Государственный комитет Российской Федерации по печати наградил «Издательский центр „Аванта+“» дипломом от 04.09.97.

Оргкомитет XI Московской Международной книжной ярмарки, Генеральная дирекция международных книжных выставок и ярмарок наградили издательское объединение «Аванта+» дипломом от 02.09.98 как победителя в номинации «Самый массовый познавательный проект 1998».

Энциклопедия для детей. Том 16. Физика. Ч. 1. Биография физики. Путешествие в глубь материи. Механическая картина мира/Глав. ред. В. А. Володин. — М.: Аванта+, 2002. — 448 с.: ил.

ISBN 5-8483-0023-2 (т. 16, ч. 1)

ISBN 5-8483-0001-1

В томе «Физика» (часть 1) читатель найдёт увлекательный рассказ о познании природы человеком, полное и доступное изложение современных научных представлений об устройстве мира, познакомит с ещё не разгаданными тайнами и не решёнными проблемами.

В создании этой книги приняли участие крупные учёные, талантливые популяризаторы науки и педагоги. Сложные вопросы физики раскрываются живо и образно, приводится множество интересных наблюдений, красочных иллюстраций и юмористических рисунков.

Книга предназначена школьникам среднего и старшего возраста и их родителям, а также студентам, учителям и всем поклонникам физики — признанной царицы наук.

УДК 087.5:53(031)

ББК 22.2я2+22.3я2

«Издательский центр „Аванта+“» является правообладателем настоящего издания. Использование издания в целом или любой его части без разрешения «Издательского центра „Аванта+“» влечёт ответственность в соответствии с действующим законодательством.

ISBN 5-8483-0023-2 (т. 16, ч. 1)
ISBN 5-8483-0001-1

© «Издательский центр „Аванта+“, 2000

К ЧИТАТЕЛЮ

По словам французского писателя Жозефа Эрнеста Ренана (1823—1892), «каждый школьник знаком теперь с истинами, за которые Архимед отдал бы жизнь». За последние 400 лет человеческая цивилизация прошла путь познания, неизмеримо больший, чем за всю свою предшествующую историю. За эти годы люди освоили географию и недра Земли, покорили океан. Человек создал устройства, позволившие ему летать и передвигаться по земле с огромной скоростью, общаться с жителями других континентов, не выходя из собственного жилища, и видеть происходящее в иных краях. Он освоил источники энергии, решил проблемы обеспечения пищей, научился предотвращать эпидемии самых страшных болезней. Быт среднего европейца конца XX в. вызвал бы восторженную зависть любого властелина древнего государства.

Эти достижения — плоды научно-го подхода к познанию природы. Научный дух зародился в Древней Греции. На смену мифам пришли натурфилософские представления о материи, пространстве и времени. Стало возможным от наблюдений перейти к размышлениям об устройстве мира, причинах и первоосновах происходящего на Земле. Именно «древнегреческому чуду» люди обязаны зарождением физики — науки, преобразовавшей жизнь человека за сотые доли исторического пути цивилизации.

Подробный рассказ о становлении и развитии физики ждёт читателей в разделе «Биография физики». Как отмечал французский писатель Андре Моруа (1885—1967): «Итог знаний и воспоминаний, накопленных поколениями, — вот что такое наша цивилизация. Стать её гражданином можно лишь при одном условии — познакомившись с мыслями поколений, живших до нас».

Важнейшие физические открытия не только продвигали вперёд науку, переворачивая мировоззрение людей, они не раз меняли судьбы мира. Система Коперника и теория относительности сформировали облик современного человечества в не меньшей мере, чем войны и революции.

Чем живёт современная «физическая цивилизация»? Где находятся мировые центры подготовки высококлассных физиков? Как работают учёные, для чего они собираются на конференции и какие вопросы там решают? Кого и почему выбирают в академики, за что присуждают Нобелевские и другие престижные премии? Как взаимодействуют физика и религия, какова роль философии в физических исследованиях? В чём различие между наукой и псевдонаукой? Обо всём этом говорится в разделе «Мир физики».



Средневековый учёный. Гравюра. XVI в.





Гарвардский университет. США.

Один из творцов научного метода английский философ Фрэнсис Бэкон (1561—1626) произнёс фразу-формулу: «Scientia est potentia» (*лат.* «Знание — сила»), ставшую лейтмотивом Нового времени. Научными стали считать знания, которые можно проверить, сохранить и передать другому, т. е. наука должна изучать не любые явления, а лишь повторяющиеся в природе. Задача науки — выяснить законы, по которым происходят такие явления. В этом суть научного метода, сформулированного в трудах Фрэнсиса Бэкона и Рене Декарта.

Ещё раньше английский философ и естествоиспытатель Роджер Бэкон (около 1214—1292) писал: «Выше всех умозрительных знаний и искусств стоит умение производить опыты, и эта наука есть царица наук... Философы должны знать, что их наука бесцельна, если они не применяют к ней могущественную математику... Невозможно отличить софизм от доказательства, не проверив заключение путём опыта и применения».

Благодаря итальянцу Галилео Галилею (1564—1642) в естествознание вошло число, от наблюдений учёные перешли к измерениям и расчётам. Это позволило «спрессовать» и упорядочить огромный массив фактов, переведя их на язык формул. В немалой степени делу сохранения и передачи полученных знаний способствовало изобретение в XV в. книгопечатания Иоганном Гутенбергом. Из чисто аристократического занятия просвещённых оди-

ночек стремление к знаниям стало доступным широким слоям общества. С этим шагом сравнима лишь нынешняя компьютеризация, позволившая физике моделировать Вселенную целиком.

Обзор современных представлений о строении мира, о способах получения этих знаний читатель найдёт в разделе «Огромный загадочный мир». Он совершит «путешествие» в пространство и во времени, получит массу «дорожных впечатлений» от поражающих фантазию образов и масштабов макро- и микромира. «Маршруты» путешествия проработаны физикой в разной степени: для некоторых направлений составлены подробные «карты» и «путеводители», а в иных местах придётся пробираться по едва намеченным тропам.

Несмотря на грандиозные успехи науки, мир полон загадок, а перед физикой множество нерешённых проблем. В главе «Начала и методы физики» рассказывается о сегодняшнем «арсенале» познавательных средств науки. Здесь говорится о современных приборах и правилах обработки экспериментальных данных, изложены основные принципы построения физических теорий.

Наблюдения — теория — эксперимент... И снова всё сначала! Такова познавательная спираль современной науки. Как сказал немецкий поэт, философ и естествоиспытатель Иоганн Вольфганг Гёте (1749—1832): «Всякий раз, когда мы внимательно вглядываемся в мир, мы создаём теорию». Так, постепенно, сверяя каждый шаг с данными опыта и интуитивно выбирая пути развития, естествознание преобразовывалось в физику. Именно в ней нашёл своё воплощение научный метод, и именно физика одной из первых стала наукой в современном понимании, ибо она раньше иных наук смогла очертить круг задач и проблем, относящихся к сфере её возможностей. За 2 тыс. лет знания о явлениях приро-

Фрэнсис Бэкон.
Портрет работы Пауля ван Сомера.





ды увеличились многократно, а предмет физики при этом сузился.

Эрнест Резерфорд, британский учёный, открывший «атомную эру» в физике, с присущими ему добродушием и иронией говорил: «Все науки можно разделить на две группы, а именно — на физику и коллекционирование марок». Сказано это было в начале XX в., когда физика заняла лидирующее положение в естествознании. В отличие от других естественных дисциплин она уже располагала целым рядом не только эмпирических, но и фундаментальных законов. На их основе можно было предсказывать явления, а также рассчитывать, как протекают сложные процессы, работают машины, механизмы и т. д.

Российский философ, химик и историк науки Бонифатий Михайлович Кедров (1903—1985) развил теорию циклов естествознания, согласно которой на каждом этапе научного прогресса существует свой лидер. С момента возникновения современного естествознания эта роль принадлежала механике и оставалась за ней на протяжении XVII—XVIII вв. — почти 200 лет. Механика способствовала развитию родственных отраслей знания, распространяя на них свои методы и понятия. По теории Кедрова, лидер расчищает дорогу уже целой группе новых отраслей.

К началу XIX в. ведущее положение заняли науки о строении материи: физика, химия, геология и биология. Затем из этого комплекса выдвинулся новый лидер — физика, оставшаяся им в течение почти всего XX в. Она стимулировала развитие ядерных и космических технологий, полупроводниковой и лазерной техники, кибернетики, молекулярной биологии. Эти новые направления лидировали в последней четверти XX в. В конце столетия в роли лидера естествознания утвердилась биология.

«Наука ищет пути всегда одним способом, — писал в начале XX в. рус-

ЗНАЕТЕ ЛИ ВЫ СТИХИОЛОГИЮ?

Физика есть наука о существе, свойствах, силах, действиях и цели всех видимых в свете тел. Как называются особенные части физики? Соматология, стихиология, метеорология, минералогия, химия, зоология и телеология.

(Энциклопедия, или Краткое начертание наук и всех частей учёности. Переведена с немецкого на российский И. Шуваловым. М., 1781 г.)

Физика, греч. Природознание, естествознание; наука, составляющая часть философии, имеющая своим предметом природу вообще и всех естественных тел, их свойств, явлений и взаимного друг на друга действия.

(Новый словотолкователь. Составил Н. М. Яновский. СПб., 1806 г.)

Физика (греч. слово), наука или учение о природе (греч. physis), в настоящее время учение о законах явлений, происходящих в неодушевлённой природе, помимо химических превращений, происходящих в телах.

(Большая энциклопедия. Словарь общедоступных сведений по всем отраслям знания. Под ред. С. Н. Южакова. СПб., 1905 г.)

Физика, наука, изучающая... наиболее общие закономерности явлений природы, свойства и строение материи и законы её движения. Понятия физики и её законы лежат в основе всего естествознания.

(Физический энциклопедический словарь. М., 1983.)

ский мыслитель и естествоиспытатель Владимир Иванович Вернадский (1863—1945). — Она разлагает сложную задачу на более простые, затем, оставляя в стороне сложные задачи, разрешает более простые и тогда только возвращается к оставленной сложной». Именно так проходило становление предмета механики. Все материальные процессы можно свести к движению — механическому,



«Учёный изучает природу не потому, что это полезно: он изучает её потому, что это доставляет ему удовольствие, потому что, она прекрасна... Я, конечно, не говорю здесь о той красоте, которая поражает наши чувства, о красоте качеств и внешней формы вещей; она в стороне от науки. Я говорю о той красоте, более интимной, внутренней, которая сквозит в гармоничном порядке частей и которую воспринимает только чистый интеллект... Красота, воспринимаемая интеллектом, есть красота самодовлеющая, существующая для самой себя, и это ради неё, быть может, более чем для будущего блага человечества, учёный обрекает себя на многолетнюю и утомительную работу».

Ж. А. Пуанкаре



Исаак Ньютон.
Портрет работы
Дж. Торнхилла.



«Для многих людей наука — это измерения, выполняемые со скрупулёзной тщательностью. Такие измерения играют важную роль в разработке открытия, но очень редко ведут к нему... Научный метод — не столбовая дорога к открытиям, как думал Бэкон. Скорее это совокупность правил, иногда общих, иногда частных, которые помогают исследователю в пути в джунгли поначалу разрозненных, противоречащих друг другу фактов. Научное исследование — это искусство, а правила в искусстве, если они слишком жёстки, приносят больше вреда, чем пользы».

Д. П. Томсон

«Раньше я видел смысл лишь в точных уравнениях. Мне казалось, что если пользоваться приближёнными методами, то результат становится невыносимо уродливым, а мне страстно хотелось сохранить математическую красоту.

Вначале я считал, что существуют точные законы Природы и всё, что надо делать, — это получать из них следствия. Типичным примером точных законов являлись законы движения Ньютона. Но мы узнали, что эти законы не точные, а приближённые, и я заподозрил, что все остальные законы Природы — тоже лишь приближения... Все наши уравнения надо рассматривать как приближения, отражающие существующий уровень знаний, и воспринимать их как объекты для попыток их усовершенствования...»

П. А. М. Дирак

тепловому, химическому и т. д. Простейшее среди них — механическое движение, т. е. перемещение тел в пространстве за промежутки времени. Но чтобы выявить первый закон механики — закон инерции, — Галилео Галилею пришлось преодолеть многовековую инерцию мышления: вместо причин, удерживающих тело в движении, он переключил внимание на причины, изменяющие его движение.

Любой современный школьник, зная определения скорости, ускорения и владея азами дифференциального и интегрального исчисления, на одной-двух страничках может вывести все закономерности механических движений. Сам способ интегрирования, изобретённый молодым бакалавром Тринити-колледжа Исааком Ньютоном во время уединения в Вулсторпе, положил начало триумфальным завоеваниям механики.

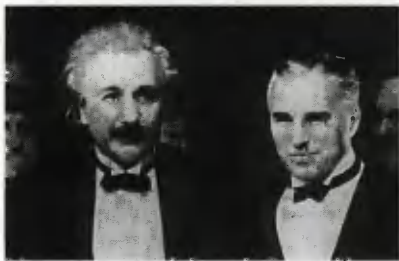
Механика обрела естественный для неё математический язык. Благодаря ему необозримый массив данных о движении огромных небесных тел и мельчайших песчинок удалось свести к трём законам Ньютона и фундаментальному закону всемирного тяготения. Так родилась первая научная картина мира. Вселенная Ньютона — система материальных точек,

между ними без каких-либо посредников мгновенно действуют центральные силы, и всё это находится в абсолютном пустом пространстве и развивается в абсолютном непрерывном времени. Основные достоинства такого видения мира изложены в разделе «Механическая картина мира», которым завершается первая часть тома «Физика».

Как и любое великое свершение, создание первой картины мира не обошлось без жертв. Прежде всего, выделяя суть движений и явлений, творцы механики заменили реальные объекты их идеальными моделями. Физические тела рассматривались либо как точки, либо как абсолютно твёрдые тела — «жёсткие» конгломераты таких точек; жидкости лишались присущей им вязкости. Прямолинейное движение оказалось тоже идеализацией, поскольку в природе не бывает абсолютного прямых траекторий. Абсолютные пространство и время Ньютона не могли быть обнаружены в экспериментах. Парадоксальный факт: удивительно эффективная механика Ньютона, ставшая фундаментом современных знаний о природе и первых технических революций, фактически основана на понятиях и образах, не существующих в реальности.

Гениальность Ньютона — в чёткой постановке посильных для его метода задач. Неразрешимые в то время вопросы он завещал последователям. Для объяснения механических движений ему потребовались силы как меры взаимодействия тел, чем Ньютон и пользовался, не задаваясь вопросом о природе этих сил. Последующее развитие физики выявило электромагнитную природу всех «механических» сил (вязкости, упругости, трения, сопротивления и т. д.), за исключением силы тяготения. Сущность последней — загадка и для современных физиков.

Говоря о ясности и простоте ньютоновской картины мира, Альберт



Альберт Эйнштейн и Чарлз Чаплин.

Эйнштейн восклицал: «Счастливым Ньютоном, счастливое детство науки!.. Природа для него была открытой книгой, которую он читал без усилий. Концепции, которыми он пользовался для упорядочения данных опыта, кажутся вытекающими естественным образом из самого опыта». Именно Эйнштейн завершил создание следующей, полевой, картины мира. Её описание открывает вторую часть тома «Физика».

Известно, что проще всего действовать и мыслить по аналогии. Именно по аналогии с механикой Ньютона пытались строить первые теории электрических и магнитных явлений французский военный инженер Шарль Огюстен Кулон и математик Андре Мари Ампер, английский физик Джеймс Кларк Максвелл и многие другие учёные. Однако прорыв в новое измерение физической науки было суждено осуществить человеку, который увлёкся физикой, переплетая чужие научные трактаты. Его имя — Майкл Фарадей. Именно ему мы обязаны понятием незримой, но более чем реальной субстанции — поля.

Основываясь на глубоких идеях Фарадея и его неожиданных открытиях, а также на законах Кулона и Ампера, Максвелл синтезировал электрические, магнитные и оптические явления природы в одну математическую систему. Его знаменитые уравнения привели к новой, полевой, картине мира. Место корпускул,

управляемых в пустом пространстве законами Ньютона, заняли заряды и поля, пронизывающие всё мироздание. Именно полевая форма материи была признана первичной, а иные наблюдаемые на опыте формы вещества рассматривались как вторичные проявления (сгустки или возбуждения) физических полей.

В результате анализа уравнений Максвелла Генрихом Герцем, Хендриком Антоном Лоренцем, Жюлем Анри Пуанкаре и Альбертом Эйнштейном на рубеже XIX—XX вв. были устранены многие нереальные черты картины мира по Ньютону. Галилеевский принцип относительности механических движений распространили на все физические процессы. Между взаимодействующими телами обнаружился посредники — поля. Для всех взаимодействий и процессов была установлена предельная скорость — скорость света. Пространство и время утратили ненаблюдаемую абсолютность, объединившись в единую арену физических событий — пространство-время.

Триумфом полевых теорий стало создание Эйнштейном в начале XX в. общей теории относительности, связавшей гравитацию с геометрией искривлённого пространства-времени и предсказавшей эффекты, блестяще подтверждённые опытами. Успех был настолько поражающим

«Наша цель — получить единую всеобъемлющую теорию, пригодную для описания всей физики в целом. Теория предположительно должна состоять из некоей схемы уравнений и правил приложения и интерпретации этих уравнений. Сами по себе уравнения ещё не составляют физической теории. Только тогда, когда они сопровождаются правилами, указывающими, как этими уравнениями пользоваться, мы действительно имеем физическую теорию...»

Вряд ли необходимо говорить вам, что такая общая теория ещё не создана. Она является той конечной целью, к достижению которой стремятся все физики».

П. А. М. Дирак



Майкл Фарадей.



воображение, что результаты научных экспериментов впервые стали предметом комментариев на страницах массовых газет.

Классическая механика Ньютона заняла своё место (со строго очерченными границами применимости) в стройном здании релятивистской физики Эйнштейна. Но физика на этом не закончилась; завершилось лишь построение классической теории. В мире Ньютона — Максвелла — Эйнштейна не было принципиальных различий в описании макро- и микрообъектов, все причинно-следственные связи между событиями считались однозначными, раз и навсегда установленными. Однако эксперименты по структуре вещества всё чаще давали результаты, не отвечающие законам классической физики.

Творцы полевой картины мира Максвелл и Эйнштейн наряду с Германом Людвигом Фердинандом Гельмгольцем, Уильямом Томсоном и Людвигом Больцманом параллельно заложили основы следующей, более широкой картины природы — квантово-статистической. Об этом подробно говорится в шестом разделе тома. В нём показаны универсальные возможности термодинамического подхода, которому подвластны не только молекулы газа, но и таинственные чёрные дыры.

Первый шаг в развитии квантовых представлений сделал в 1900 г. немецкий физик Макс Планк, который ввёл ограничение на величину воздействия — квант действия. Он назван постоянной Планка, ставшей

универсальным критерием различия между макро- и микрообъектами.

В разделе «На пути к единой картине мира» читатель откроет для себя увлекательный мир элементарных частиц. Современная физика изучает свойства объектов и явлений, которые находятся далеко за пределами человеческого воображения. Именно в микромире делаются сейчас наиболее важные физические открытия. Здесь прокладываются пути к созданию единой картины мира, способной связать все известные в природе взаимодействия.

Заключительный раздел книги называется «Универсалии природы и физики». При огромном разнообразии явлений, во всех сменяющих друг друга теориях мирового устройства существуют общие черты и работают универсальные методы. Есть и универсальные задачи, для решения которых приходится использовать весь арсенал современной физики. Наиболее известная задача такого рода — эволюция Вселенной и происхождение жизни на Земле.

Универсальные процессы и явления обладают одной характерной чертой: они нелинейны. Как ни странно, всё происходившее в физике за истекшие 300—400 лет можно считать лишь линейным приближением к физическим реалиям. Осознали это совсем недавно — чуть более 30 лет назад. Уже появились определённые успехи, но вопросов пока больше, чем ответов. Тем не менее читателей ждёт рассказ о самых важных идеях, которыми живёт современная «нелинейная физика».

Физическая наука наших дней насчитывает около двух десятков крупных направлений. То здесь то там на их стыках образуются новые области исследования, возникают интереснейшие проблемы и задачи. Экспериментальные и теоретические методы физики всё чаще применяются в таких далёких от физики сферах, как экономика, социология, экология, психология. Вполне возможно, что, утратив лидерство среди наук о природе, физика постепенно преобразуется в универсальный язык этих наук и со временем будет выполнять ту роль, которую сейчас играет математика в физических исследованиях.

БИОГРАФИЯ ФИЗИКИ

Становление физики.
Царица наук





СТАНОВЛЕНИЕ ФИЗИКИ

РОЖДЕНИЕ НАУЧНОГО ДУХА

■ Марк Туллий Цицерон — римский политический деятель, писатель и оратор.

Если математическое знание овеяно дыханием вечности (дважды два — четыре во все времена), то на знании о природе как будто лежит тень мимолётности, зыбкости, сиюминутности, если, конечно, судить по историческим меркам. История физики знает по крайней мере две революции, перевернувшие фундаментальные представления человечества о мироздании, долгое время казавшиеся незыблемыми. Возможно, и современные представления о природе в дальнейшем будут отброшены, так же как теперь отброшены царствовавшие веками представления Аристотеля о центральном положении Земли во Вселенной или основополагающее утверждение и древней, и новоевропейской физики о том, что «природа не терпит скачков», которое отвергла возникшая в

XX столетии квантовая механика. Каждая такая революция вносила сумятицу в умы людей, заставляя думать, что все наши знания о природе не более чем предположения. История естествознания, казалось бы, подтверждает правоту Цицерона, ещё в I в. до н. э. провозгласившего: «Вероятностные знания — вот предел человеческого разума». Ему вторит австрийский философ Карл Раймунд Поппер, один из авторитетов в методологии науки XX в., объявивший естественно-научное знание гипотетическим, вероятным.

Возможна ли вообще наука о природе как строгое знание об устройстве мира или на долю физиков выпало только бесконечное улучшение расчётов, а их взгляды на мир рано или поздно будут представлять лишь исторический интерес? Но если даже



ния ориентироваться в среде обитания. Это умение, представляющее собой определённое знание, не заложено в нём биологически, и человек должен ему научиться у старшего поколения. Однако не всякое знание является научным.

Люди древних эпох накопили огромное количество сведений о природных явлениях. Они часто оказывались полезными для житейских целей, но назвать их научным знанием только на этом основании нельзя. Для того чтобы накопленный наблюдательный материал и его осмысление превратились в зародыш науки о природе, должно было случиться нечто необыкновенное — знание должно было стать ценностью само по себе. В какой-то момент истории люди осознали, что знания нужны не только чтобы выжить, более того, жизнь дана человеку, чтобы познавать. Этот переворот в мышлении и есть рождение науки.

Задолго до того, как могла возникнуть наука, должны были появиться и укрепиться первые цивилизации, должна была начаться история. В тот период люди заметили *время* — они поняли, что прошлое отличается от настоящего, что раньше было не так, как теперь. Представления о времени зарождаются в мифах о происхождении мира, причём эти мифы

в физике, в которой человечество преуспело более, чем в других областях (кроме математики), познание является лишь предположительным, то что тогда можно сказать об остальных науках?

Или же, напротив, прав Альберт Эйнштейн, полагая, что на физическом знании, так же как и на математическом, лежит печать вечности: «Физик видит утешение в том, что полученные им ценой упорных усилий результаты навсегда останутся достоянием науки». Познание природы похоже на замысловатый детектив, в котором новые улики опрокидывают предыдущие версии и не ясно, будет ли, в конце концов, разгадана вся истина.

КОГДА МОГЛА ПОЯВИТЬСЯ НАУКА?

Человека можно определить как животное, обладающее знаниями. Животные прекрасно обходятся без них: знания, передаваемые из поколения в поколение небиологическим путём, им заменяет генетически наследуемый инстинкт. Человек отличается от животного прежде всего тем, что рождается на свет совершенно беспомощным: не только не может добывать себе пищу, но и лишён жизненно необходимого уме-





ВРЕМЯ И ЛЮДИ

У всех народов есть мифы о том, как всемогущий Бог-творец, демиург, создаёт мир из ничего. Но вот вопрос: а что было до момента сотворения мира? Если созданию мира предшествовала бесконечность, то почему он был создан именно в это мгновение, а не на миллиард лет раньше или позже? Все моменты бесконечности одинаковы, и если мы имеем дело с бесконечной далью времени, то всё, что в принципе могло произойти, должно было уже произойти. Разные цивилизации по-своему разрешали парадокс возникновения мира и времени, и их ответ, в свою очередь, влиял на судьбу и облик цивилизации.

Один ответ был дан на Востоке, в Индии. До того, как возник наш мир, существовало бесконечное количество миров, которые рождались и умирали. Демиург, осознанно творящий мир согласно своему плану, не отвечает такой картине мира. Его заменил брахман — безличное духовное начало, наполняющее пульсирующий мир: вдох-выдох, весна-осень, рождение-смерть. В плену бесконечной смены циклов не только люди, снова и снова возвращающиеся в мир (теория реинкарнации), но и сами боги, рождающиеся в начале каждого цикла и умирающие в его конце. Эта величественная картина не даёт ответа на очень важный для людей вопрос: а зачем всё? Зачем учиться, стремиться к чему-то, если за каждым подъёмом неминуемо последует спад, смена циклов обесценит всё сделанное?

Иначе был разрешён парадокс возникновения времени на заре западной цивилизации, в Древней Греции. Философ Платон первым заметил, что «время возникло вместе с небом», а значит, бессмысленно спрашивать, что было до того, как демиург создал мир, — не было самого понятия «раньше». Демиург вместе с миром «творит для вечности, пребывающей в едином, вечный же образ, движущийся от числа к числу, который мы называем временем. Ведь не было ни дней, ни ночей, ни месяцев, ни годов, пока не было рождено небо... „Было“ и „будет“ суть виды возникшего времени, и, перенося их на вечную сущность, мы незаметно для себя делаем ошибку... Этой сущности... подобает одно только „есть“...». Позже эту мысль развил средневековый мыслитель Августин, а сегодня её подтверждают данные космологии. Мир (пространство) и время неразрывно связаны. Такая концепция более сложна, но в ней уже возможна идея прогресса, с которой неразрывно связан путь западной цивилизации.

Вавилон — древний город в Месопотамии, расположенный к юго-западу от современного Багдада; столица Вавилонии (начало II тысячелетия — 539 г. до н. э.).

Древний Египет — государство в Северо-Восточной Африке. Зародилось в конце IV тысячелетия до н. э. и достигло наивысшего расцвета в XVI—XV вв. до н. э.

Ассирия — древнее государство в Северном Двуречье (на территории современного Ирака). В XIV—VIII вв. до н. э. неоднократно завоевывала всю Северную Месопотамию.

не самые древние. Характерно, что в греческой мифологии символ времени титан Кронос родился от первых богов: Геи, матери-Земли, возникшей из первоначального Хаоса, и её супруга Урана — Неба. И лишь затем рождается бог мирового порядка Зевс, которому удаётся свергнуть своего отца Кроноса. Так в мифологии постепенно стали в скрытом виде прорабатываться категории будущего естествознания.

В тот момент, когда началась история, время как бы вырвалось из рук человека. Если шаман — главный «идеолог» доцивилизационных сообществ — с помощью колдовства сам

творил будущее, подчиняя различных земных духов своей воле, то вавилонский жрец был не творцом, а лишь прорицателем будущего, астрологом. Он читал по небесным светилам волю богов, с которыми невозможно вступить в открытую борьбу.

Так родилась идея высшего божественного знания, недоступного обычному человеку, которое может мистически открываться только посвящённым. Это знание существенно отличалось от знания того, как выследить зверя или сделать копье.

Тайное, мистическим образом постигаемое знание — антипод будущей науки. Научное знание, подобно божественному, претендует на вечность, но творцы его — сами люди, оно в принципе доступно каждому человеку. Лишь после многовековых усилий по овладению временем, после превращения его из божества в понятие в умах людей могла совершиться революция, ознаменовавшая возникновение науки.

А пока что люди выводывали волю богов, внимательно наблюдая за небом. Точные наблюдения — очень непростое занятие, требующее много времени и сил. Для того чтобы заниматься кропотливыми наблюдениями, нужен серьёзный стимул. Он был на Древнем Востоке — в Египте, Ассирии и Вавилоне, а также в других древнейших цивилизациях, поскольку в них небесные светила считались божествами. В результате многовековых наблюдений был открыт один из первых в истории законов природы. Вавилонские и египетские жрецы столетиями скрупулёзно считали полные и частные затмения Луны и Солнца, и их упорные наблюдения привели к открытию «великого повторения». Вавилонское слово «сар», означавшее период в 3600 лет, греки превратили в «сáрос», называя так 18-летний цикл, именуемый вавилонянами просто «восемнадцать». *Сáрос* — это период времени (18 лет 11 дней 8 часов), в течение которого



происходят 28 лунных и 43 солнечных затмения (среди солнечных 13 полных). Зная сарос, можно с точностью до нескольких дней предсказать дату будущих, а равно и прошлых затмений. Труднее дело обстоит с предсказанием на основе сароса места затмения.

Разумеется, древние звездочёты занимались астрономическими наблюдениями не с целью чистого познания. Также вряд ли главной их целью было решение хозяйственных задач, например создание календаря для земледельческих работ, как часто полагают под влиянием материалистического мировоззрения. Проблема в том, что здесь возникает головоломка типа «Что появилось раньше — курица или яйцо?». Что возникло раньше — земледелие или календарь? Для земледелия нужен календарь, но для того чтобы возникла потребность в календаре, земледелие уже должно существовать. Жрецы искали в расположении светил прежде всего волю богов, стремясь прочесть по ним будущее. Косвенным результатом многовековых наблюдений стали знания, которые оказались полезными для организации ирригационного земледелия, предполагающего создание системы оросительных каналов, умение измерять землю и составлять календарь. Можно сказать, что астрология внесла свой вклад в

появление земледелия и тем самым дала людям возможность добывать «хлеб насущный».

ДРЕВНИЙ ВОСТОК — НАУКА ПРАВИЛ И РЕЦЕПТОВ

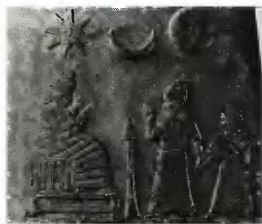
Наука древних египтян и вавилонян о небесных явлениях была наукой наблюдательной, или эмпирической (от *греч.* «эмпейрия» — «опыт»). Теоретически доказанных обобщений у них почти не было. Ни в египетских папирусах, ни на вавилонских глиняных табличках учёные не нашли ничего похожего на обоснование каких бы то ни было положений или доказательства математических теорем. В то же время к некоторым результатам, полученным вавилонскими жрецами (они, например, умели решать задачи, сводящиеся к квадратному уравнению), нельзя было прийти исключительно методом проб и ошибок, без теоретического анализа, без отвлечённого рассмотрения стоявших перед ними проблем.

Знания, полученные учёными жрецами первых цивилизаций, можно назвать магически-прикладными. Перед древней наукой не стояла задача обосновать добытые знания. Перед ней стояли практические задачи,



Древнеегипетский календарь.





Жрецы и небесные светила. Вавилонский барельеф XIII в. до н. э.

связанные с мифологией и хозяйственными потребностями: когда проводить праздничные ритуалы, как построить пирамиды, как измерить землю для ирригационной системы и т. д. Все эти конкретные действия требовали конкретных знаний. Например, нужно было уметь работать с наклонной плоскостью, рычагом, клином и блоком; создавать гигантские статуи по их небольшим моделям. Возможно, что при получении подобных знаний были выработаны определённые теоретические положения, но сами по себе они никого не интересовали, как никого не интересовало и то, каким путём получено данное знание. Поэтому теорию не записывали, а фиксировали только конечный результат в виде указания к действию — рецепта. Абстрактное знание только подразумевалось, а преподавалось оно на конкретных примерах и использовалось в частных случаях. На доказательства,

в особенности на доказательства очевидных вещей (например, что вертикальные углы равны), сил не тратилось.

В отличие от греков, которые позднее увидели в теоретическом исследовании самостоятельную и даже высшую ценность, для египтян и вавилонян важнее всего было найти какое-нибудь решение задачи и убедиться в его истинности на практике. Можно сказать, что для них именно практика служила критерием истины.

Это не случайно: сам характер восточных цивилизаций предопределил то, что теоретическое мышление не было востребовано обществом. Знание исходило сверху вниз, от жрецов к народу, а жрецам верили и без доказательств — ведь они общались с самими богами.

Зачатки будущих научных знаний возникли также в Древнем Китае и Древней Индии. В Древнем Китае физика продвинулась достаточно большим путём. Именно здесь впервые было сформулировано нечто похожее на теорию импульса — предшественника современного понятия импульса, историю которой, как правило, начинают с трудов александрийского учёного VI в. Филопона. Однако уже в древнекитайской философской школе *моистов*, последователей мудреца Мо-цзы (479—400 до н. э.), учили: «Если нет противодействующей силы, движение никогда не прекратится. Это так же верно, как то, что бык — не лошадь».

По поводу силы, называемой ими «ли», моисты говорили: «Сила — это то, что заставляет двигаться предметы, имеющие форму... Тяжесть есть сила. Падение одного предмета или подъём чего-нибудь другого есть движение, вызванное тяжестью». Речь здесь идёт о блоке — колесе с перекинутой через него верёвкой, к концам которой подвешены грузы. Один груз опускается, другой поднимается, причиной этого движения является тяжесть.





Была развита в Древнем Китае и оптика зеркал. Здесь использовалась камера-обскура, причём китайцы умели правильно строить геометрический ход лучей. Ничего похожего на законы преломления света не было известно.

Уже в VI в до н. э. китайцы открыли явление естественного магнетизма. Через несколько веков они изобрели компас («указатель юга»), считая, что естественные магниты ориентируются из-за воздействия звёзд.

Развитие физики в Древнем Китае было загублено по мировоззренческим причинам. Отрицательную роль в этом процессе сыграло конфуцианство, которое считало прикладную деятельность выше общих рассуждений. Последователи Конфуция полагали пустым времяпрепровождением рассмотрение таких вопросов, как движение тела в пустом пространстве, различие между белизной и твёрдостью и т. п. Они указывали, что «ремесленник и без этих знаний может оставаться хорошим ремесленником».

Значительно дальше китайцев в физике продвинулись древние индийцы. Возможно, это было связано с кастовым устройством индийского общества, не позволявшим государству тотально вмешиваться в интеллектуальную деятельность. Среди древнеиндийских текстов в плане развития физических вопросов вы-

деляется так называемая «Вайшешика-сутра» (от *санскр.* «вишеша» — «различие», «особенность»), написанная в VII в. до н. э. В течение последующих столетий учение вайшешика развивалось совместно с учением ньяя (название это означает «правило», «рассуждение»). Начиная с XI в. н. э. они настолько слились, что стали обозначаться общим названием — «ньяя-вайшешика».

В учении ньяя-вайшешика движение брошенного копья объясняется так: вначале движение копья создаётся посредством контакта с рукой, затем контакт разрывается, однако копье продолжает двигаться благодаря полученному им напору (индийцы говорили «вега»). Это также очень похоже на теорию импульса.

В основе воззрений древних индийцев на окружающий мир лежит учение о пяти элементах: земле, воде, огне, воздухе и эфире (индийцы называли их «пратхви», «ап», «теджас», «вайу» и «акаша» соответственно). Четыре первых элемента считались материальными, а эфир — нематериальным. Каждому из этих элементов ставилось в соответствие одно из пяти чувств человека: земле — обоняние, воде — вкус, воздуху — осязание, огню — зрение, эфиру — слух.

Согласно учению ньяя-вайшешика, каждому материальному элементу соответствует особый тип атомов, причём атомам различных элементов присущи определённые качества: атомам земли — запах, атомам воды — вкус, атомам воздуха — осязаемость, атомам огня — цвет. Всепроницаемому эфиру соответствует звук. Сами атомы представлялись вечными, неразрушаемыми мельчайшими шариками, почти точками.

Нагревание тел ньяя-вайшешика объясняет присутствием атомов огня, а возникновение звука — передачей воздуху колебаний частиц твёрдого тела (правда, воздух лишь переносит, но не создаёт звук, за образование которого отвечает эфир).



Индауистский храм близ Бангалора Индия. Гравюра.

■ Конфуций (Кун-цзы; около 551—479 до н. э.) — древнекитайский мыслитель. В центре его этико-политического учения — идеал благородного мужа, поступающего в согласии с «велемием Неба» и моральным законом (дао), соблюдающего этикет (ли), обладающего сыновней почитательностью к родителям и старшим (сяо). Согласно Конфуцию, сяо — основа гуманности (жэнь) и других добродетелей и наиболее эффективный метод управления страной, ибо государство — это одна большая семья.



Панорама древних Микен.

Итак, схожие пути развития научной мысли были намечены в совершенно разных регионах мира. Однако должны существовать ещё и общественные условия (социальный заказ), для того чтобы эта мысль могла не только закрепиться, но и выйти на высокий теоретический уровень. Такие условия возникли в Древней Греции.

«ГРЕЧЕСКОЕ ЧУДО»

Эллада — название Греции на греческом языке.

Демос (греч. «народ») — в Древней Греции свободное население, обладавшее гражданскими правами.

Государство на территории Греции возникало дважды: в XVII и VIII столетиях до н. э. Историки пришли к этому выводу, опираясь на данные археологических раскопок. Первое государство возникло на основе эгейской культуры (около 2800—1100 гг. до н. э.), называемой также крито-микенской. Эта культура некоторыми существенными чертами отличалась



от соседних культур Древнего Востока. Например, эгейское искусство носило более светский характер: мастера создавали «скрипкообразные» фигурки, статуэтки, изображавшие обнажённых женщин, и т. п.

В XV в. до н. э. произошло страшное стихийное бедствие, а в XIII—XII вв. до н. э. опустошительные нашествия нецивилизованных племён (дорийцев) ускорили упадок эгейской культуры. Но минуло три-четыре столетия (так называемые «тёмные века»), и в Средиземноморье на месте крито-микенской культуры возникло общество, не похожее ни на одно из существовавших ранее. Это историческое явление нередко именуют «греческим чудом». Население Эллады по численности было меньше населения, например, современной Москвы, но эллины дали миру сотни блестящих мыслителей, поэтов и скульпторов, а также идеи и проблемы, которые до сих пор сохраняют свою актуальность.

Дух эллинской Греции необычен для древнего времени. В результате успешной борьбы демоса с аристократией ведущую роль стало играть стремление людей опираться скорее на собственные силы, чем на благосклонность богов или сильных мира сего; решающее значение в обществе приобрела личная инициатива. Если раньше социальное значение человека в основном определялось знатностью или богатством, то теперь всё более значимыми становились личные качества человека, что приводи-





ТЕЛО И МЫСЛЬ

Юноша
чернокудряв и розов,
он выходит на спортивный настр.
Разве может в мире быть
философ,
если он к тому же не гимнаст?..
Если он не правит колесницей,
мысль какую даст ему нутро?
Если диска мощною десницей
не кидает,
выставив бедро?
Кожа до озноба запотела,
но идёт он, лаврами увит!..
Мысль о мире

поставляет тело,
о вселенной тело говорит.
В мускулы втерев пред схваткой
пасту,
он идёт средь крика по кольцу!..
Надо верить мудрому гимнасту,
бегавшему быстро
мудрецу!..
Подчинясь высокому закону,
трудные сошлись на ринге лбы!..
Мысль о мире острая
к Платону
приходила в острый миг
борьбы.

(Е. М. Винокуров. «Тело».
Из сборника «Ипостась», 1984 г.)



ло к мысли о равенстве людей как «детей природы».

В демократических полисах (городах-государствах) Эллады царил паразитический для того времени (а в некотором отношении и для нашего) свобода мысли и нравов. Греки с азартом участвовали в бесконечных дискуссиях на любые темы, устраивавшихся прямо на городских площадях, а также во дворах богатых горожан. Решения принимались в результате голосования — вещь, совершенно бессмысленная для восточных цивилизаций.

Другая неотъемлемая черта греческого духа — состязательность. В 776 г. до н. э. здесь впервые были проведены Олимпийские игры, их покровителем считался Зевс. Существовали и другие игры, например Истмийские, посвященные морскому владыке Посейдону. Соревнования рассматривались как жребий, который позволял людям узнать, кому благоволят боги. Поэтому олимпийские чемпионы чествовались как избранные богов, нередко они становились правителями греческих городов-государств или военачальниками.

Необычным было и то, что в эллинской цивилизации жрецы являлись скорее второстепенными пер-

сонажами. В Греции жрецы напоминали обслуживающий персонал; очень часто религиозной службой руководил представитель светской власти: либо чиновник, либо правитель. При этом глава государства в Греции не являлся одновременно первосвященником, как это было в Египте и Вавилоне. Да и забавные, склочные боги греков явно уступали в своём могуществе великим богам Востока.

Важнейшая особенность греческого духа — его устремленность к познанию единства мира, человека и общества. Мифологическое мировоззрение, являвшееся идеологической основой власти военно-родовой аристократии, в то время переживало кризис. Простые люди нуждались в новой идеологии, которая обосновала бы справедливость демократического устройства общества. Идея единого для всех мировоззрения, базирующегося на знании, как нельзя лучше соответствовала этой цели. Оно должно было быть объективным, не зависящим от воли и желаний отдельных людей или богов. Таким образом, принцип единства мира ждал только своего обоснования. Этому делу посвятили себя первые греческие философы, чей авторитет был



сравним с тем, которым до катастрофы обладали жрецы.

С этим обстоятельством связана важнейшая для судеб науки особенность греческого духа — уважение к логике и доказательству. Логика убеждала грека даже тогда, когда противоречила привычному положению дел. Важен был не только результат, но и

сам путь его получения. Путь считался даже важнее, поскольку вплоть до III в. до н. э. примеры прикладного применения математических и физических знаний, полученных с помощью доказательств, можно пересчитать буквально по пальцам. Прикладная сторона в ранней греческой науке была несущественной, этим она карди-

ГРЕЧЕСКИЙ ЭКСПЕРИМЕНТ

Как возникло это нетрадиционное общество с совершенно новыми, по сравнению с древнейшими цивилизациями Востока и Европы, ориентирами? Как возникло общество, рассчитывавшее в основном на собственные силы и лишь частично — на благосклонность богов и населенное не столько на традиции, передаваемые из поколения в поколение, сколько на изобретательную самостоятельность? По-видимому, немаловажную роль в этом сыграла как раз та катастрофа, которая подорвала благополучие Крито-Микенского государства.

Все греки — пришельцы: и ахейцы, и эллины. Около 1600 г. до н. э., как предполагают историки, в материковую Грецию вторглись ахейские племена, использовавшие боевые колесницы. Они создали небольшие государства, расположенные вокруг древних поселений — близ Микен,

Тиринфа, Орхомена. Около 1470 г. до н. э. отдельные центры крито-микенской культуры пострадали от извержения вулкана Тиры, или Санторин; отзвук его дошёл до нас в мифе о погибшей Атлантиде. Особенно сильный ущерб был нанесён Криту. На ослабевший Крит проникли ахейцы, обогатившие местную культуру. В частности, благодаря им критяне узнали линейное письмо, на котором зафиксирован древнейший вариант греческого языка.

Начиная со второй половины XIII в. до н. э. ахейское государство несколько раз подвергалось опустошительным нашествиям дорийцев и «народов моря». Эти племена прошли всю Грецию с севера на юг. Потомки дорийцев основали Спарту, ахейцев — Афины. Ось Афины — Спарта станет стержневой для всей последующей греческой истории.

Дорийские разбойники грабили храмы, убивали жрецов — хранителей этих храмов. Наступило смутное время, «тёмные века». Население прежнего Ахейского государства, возникшего на основе крито-микенской культуры, потеряло духовных вождей и вместе с ними — прежние знания и письменность. Поэтому «Илиада» и «Одиссея» Гомера, вобравшие историческую память греков, долгое время существовали только как устные сказания. Экономика пришла в упадок, повсюду царил бедность. Началось переселение народов — колонизация греками островов и побережий Средиземного и Чёрного морей.

Греческому обществу нужно было искать новые основы стабильности. И греки начали великий социальный

эксперимент. Они разделили землю, ранее принадлежавшую государству; все граждане его стали считаться равными и свободными. Появились новые законы, которые устанавливали не боги, а уважаемые люди — так называемые мудрецы-основатели. Самыми известными среди них были спартанец Ликург (IX—VIII вв. до н. э.) и афинянин Солон (между 640 и 635 — около 559 до н. э.). Важную роль в установлении полисной демократии сыграла новая алфавитная письменность, ещё больше уравнивавшая всех в правах, — отныне не нужно было тратить много лет на освоение десятков тысяч иероглифов.



Афинский законодатель и реформатор Солон.



Линейное письмо В (ахейское) из Кносса. Крит.



нально отличалась от древней науки восточных цивилизаций.

Так, Фалес (около 625 — около 547 до н. э.) обосновал способ определения расстояния до недоступного предмета, одновременно доказав свою знаменитую теорему и ряд совершенно очевидных вспомогательных утверждений. Способ этот был, по-видимому, давно известен египетским жрецам. Для составления карты залива около Милета по такому методу никакого доказательства не требовалось. И тем более никто до Фалеса не доказывал очевидных вещей.

Почему в Греции акцент сделали именно на доказательстве, а не на его результате? Главным является авторитет того, кто даёт знание. В Вавилоне и Египте знание давалось жрецами, а их указания приравнялись к воле богов. В Греции же жрецов «старого образца» после дорийских нашествий не осталось, а новые жрецы были уже не вправе определять жизнь общества. Мудрецу, как простому смертному, надлежало обосновывать свои суждения, чем и занялся Фалес — купец и политик. Итак, впервые в истории критерием истины стало доказательство, а не авторитет богов.

Освобождаясь от пут мифологии, греческое общество как будто вырвалось на свободу. Рождалось новое мировоззрение, основанное на здравом смысле, избегающее ориентации на сверхъестественные силы, чудеса или авторитет жрецов. Тот факт, что полное солнечное затмение 28 мая 585 г. до н. э., происшедшее в Милете, предсказал простой смертный Фалес, произвёл колоссальное впечатление на греков. Ведь это означало, что такие великие тайны, как затмения небесных светил, доступны пониманию обычного человека и не требуют особого посвящения в божественное знание. Может быть, человеческий разум способен постигнуть гораздо больше, чем считалось ранее, может быть, есть только непознанное, а не вообще непознаваемое?



Новое мировоззрение возникало на фоне мифологии и в борьбе с ней, несмотря на то что оно использовало и перерабатывало мифологический материал. Утверждение Фалеса «Всё есть вода» стало своеобразным манифестом эпохи, его смысл хорошо выявляется в противопоставлении утверждениям типа «Всё во власти богов». Учение Фалеса впервые обосновало идею единства мира, ставшую в свою очередь идеологической основой античной демократии. Оно говорило о могуществе человеческого разума, которому открываются величайшие тайны, оно не могло не завораживать, не могло не вдохновлять. Целый народ с энтузиазмом юности взялся за построение системы мира и общества на совершенно новых основаниях.

*Всё есть вода, — сказал Фалес,
Мудрец из мудрецов, —
Мы распознаем ход небес,
Без помощи жрецов.*

*Раскрыть все тайны до одной
Судьбой назначен грек.
Вселенная нам — дом родной.
Свободен человек!*

А. Грязнов



НАСЛЕДИЕ ГРЕКОВ

Вся наша культурная жизнь, наши поступки, мысли и чувства... связаны с тем типом духовности, который зародился в античности... Позже, в эпоху христианства, этот тип духовности претерпел глубокое изменение, чтобы наконец на исходе Средневековья, великолепно объединив христианское благочестие с духовной свободой античности, мысленно охватить весь мир как единый мир Божий и далее, в процессе географических открытий, развития естественных наук и техники, радикально изменить его облик. Иными словами, во всех сферах современной жизни, если только систематически мы входим в суть дела, мы наталкиваемся на духовные структуры, восходящие к античности или христианству...

Другие народы и культуры были столь же искушёнными в практической деятельности, как и греки, но что с самого начала отличало греческое мышление от мышления других народов — это способность обращать всякую проблему в принципиальную и тем самым занимать такую позицию, с точки зрения которой можно было бы упорядочить пёстрое многообразие эмпирии и сделать его доступным человеческому разумению... Кто занимается философией греков, на каждом шагу наталкивается на эту способность ставить принципиальные вопросы, и, следовательно, читая греков, он упражняется в умении владеть одним из наиболее мощных интеллектуальных орудий, выработанных западно-европейской мыслью...

Западно-европейская культура начинается там, где возникает тесная связь между постановкой принципиальных проблем и практической деятельностью. Это было осуществлено греками. Вся сила нашей культуры и поныне покоится на этой связи. Ещё и сегодня почти все наши достижения исходят из неё.

(Из книги В. Гейзенберга «Шаги за горизонт».)

Чудесам было отказано в праве на существование, как и всему, что противоречит природе вещей. Всё в мире, даже боги, подчиняется естественным законам. Появилось новое понятие — *природа*; «по природе» означало «естественно», «правильно», «в соответствии с законами мира и

общества». Природа связывает воедино Вселенную и человека — осталось только найти эту природу или хотя бы указать направление поиска. Фалес указал, чем и снискал себе славу первого мудреца Эллады.

Он на века задал стиль философствования — высказать и доказать парадоксальное утверждение, выражающее идею единства мира. Процесс познания начинается с парадокса, но потом мыслитель приходит к его отсутствию, потому что он получает доказательство и тем самым приобщается к великой мудрости, наполняющей смыслом его существование. Отсюда, видимо, происходит знаменитое высказывание Аристотеля (почерпнутое им у своего учителя Платона) о том, что «знание начинается с удивления».

В связи с этим впервые возник вопрос об условиях самого доказательства: как и на основании чего можно что-то доказать? Греческая наука, начиная с Фалеса, двигалась по пути проработки условий, делающих возможными доказательства. Представители милетской философской школы Фалес, Анаксимандр и Анаксимен, рассуждая о мироздании и опираясь в основном на логику, по сути, разрабатывали логическую систему мышления о природе. Они создавали и оттачивали категории будущего теоретического естествознания. Утверждение «Всё есть вода» стало его первой мыслью.

ЛОГИКА КОСМОСА

«Космос» в переводе с греческого языка означает «устройство», «порядок», «украшение». Этим же словом древние греки называли Вселенную. Мир представлялся им упорядоченным в соответствии с законами логики и гармонии организмом, существующим ради высшего (божественно-

го) блага. Отдельный человек и общество в целом должны быть, подобно Космосу, гармоничным единством — малым космосом.

Веря в силу человеческого разума, ранние греческие философы отрицали существование принципиально непостижимых чудес и смело бра-



лись за объяснение всех явлений окружавшего их мира. На этом пути были совершены удивительные открытия в области теоретического мышления.

Часть из них привела к постановке таких проблем, которые в конце концов оказались не под силу разрешить античному мышлению. К ним относятся, например, знаменитые парадоксы, сформулированные Зеноном в V в. до н. э. В полной мере они не разрешены по сей день.

«ВСЁ ЕСТЬ ВОДА»

Примерно за 600 лет до н. э. мудрейший из семи мудрецов Эллады по имени Фалес выдвинул загадочное утверждение: «Всё есть вода». Всё возникает из воды и в воду же обращается после своей гибели.

Утверждение Фалеса явно противоречит повседневному опыту, оно парадоксально. Разве земля и небо, горы и облака, деревья и животные — это вода? Что имел в виду мудрец из ионийского города Милета, которого называют первым в истории философом и учёным?

О Фалесе известно очень немного, сочинения его до наших дней не дошли. Более или менее достоверны несколько утверждений Фалеса да названия некоторых его сочинений, написанных в прозе: «О началах», «О солнцестоянии», «О равенстве», «Морская астрология».

Можно предположить, что Фалес пришёл к столь необычным взглядам путём доступных всем логических построений, исходя из запрета объяснять сверхъестественными событиями возникновение единого в своей основе мира.

Из ничего мир возникнуть не мог, это было бы чудом. Он мог появиться только из какого-то другого мира. Если между этими мирами нет ничего общего, то переход от одного мира к другому также был бы чудес-



ным и, по сути, тем же самым, что и рождение из ничего. Следовательно, существует некое общее начало, связывающее старый мир и возникающий из него новый.

Это единое начало отличается и от старого, и от нового мира, иначе не было бы никакого возникновения нового из старого. Однако всё, что мы можем наблюдать, есть новый мир по сравнению со старым (он же старый мир по сравнению с тем, который будет). Получается, что общее начало всех возможных миров в принципе ненаблюдаемо. Поэтому

Иония — область в Малой Азии.





ФАЛЕС МИЛЕТСКИЙ

Все древние авторы называют Фалеса Милетского родоначальником античной и вообще европейской философии и науки. По мнению современных историков философии, именно Фалес открыл для древних греков знания, накопленные жрецами Египта и Вавилона.

Фалес принадлежал к одному из самых знатных финикийских родов — роду Фелидов. По-видимому, Фелиды были изгнаны из Финикии, и свою жизнь философ провёл в городе Милет в Малой Азии. Богатый и знатный горожанин, он много путешествовал по торговым делам и побывал в Финикии, Египте и Вавилоне.

У финикийцев, постоянно торговавших, была хорошо развита математика; у египетских жрецов и вавилон-

ских халдеев Фалес познакомился с астрономией и геометрией. Все эти знания он сделал доступными соотечественникам.

К сожалению, сейчас можно только догадываться, к чему из приписываемого Фалесу он пришёл сам, а какие знания получил на Востоке. Большинство античных авторов сообщают о нём следующее: Фалес первым предложил считать в месяце 30, а в году 365 дней; впервые описал солнечное стояние и равноденствие; открыл созвездие Малой Медведицы (созвездие Повозки). Он описал годовое движение Солнца среди звёзд и предположил, что Луна освещается Солнцем и потому видима. Фалес предложил разделить небесную сферу на пять кругов, которые он назвал зонами, или поясами: арктический пояс — постоянно видимые звёзды; летний тропи-

ческий; равноденственный; зимний тропический — восходящие и заходящие звёзды; антарктический — пояс невидимых звёзд. По оценке учёного, диаметр Солнца в 720 раз меньше его орбиты. Но подлинное признание современников Фалес получил, когда объяснил и предсказал солнечное затмение в 583 г. до н. э. (по другим данным, в 585 г. до н. э.).

Фалес был и одним из первых геометров. Многие доказательства он нашёл, обосновывая решения практических задач. Так, определяя расстояние от берега до находящихся в море кораблей, Фалес получил хорошо известную теорему, названную позднее его именем. Учёный предложил и простой способ измерить высоту пирамид. Он зафиксировал время, когда тень человека равна его росту, и тогда же измерил длину тени пирамиды. Фалес первым вписал с помощью циркуля и линейки круг в треугольник и в благодарность за это принёс богам в жертву быка.

Хотя сам Фалес и не был облечён властью, соотечественники прислушивались к его советам. Ему удалось убедить милетцев не вступать в союз с царём Лидии Крёзом против Персии, и это впоследствии спасло город: Крёз потерпел сокрушительное поражение от царя персов Кира II. Согласно легенде, Фалес помог Крёзу переправить войска через реку Галис. По приказу учёного выше военного лагеря был вырыт глубокий ров в виде полумесяца; таким образом река изменила русло, и армия смогла перейти на другой берег без постройки моста.

Философ был близким другом милетского царя Трасибула. Несмотря на это, он без энтузиазма занимался политикой и избегал государственных дел.

О его личной жизни почти ничего не известно. Согласно одним источникам, Фалес был женат и имел сына Кибиста, а по другим — оставался холостяком и усыновил сына сестры. Рассказывали, что в молодости мать





философа Клеобулина пыталась заставить его жениться; Фалес отвечал: «Ещё не время». Потом, когда учёный составил, он говорил: «Уже не время».

Современники преклонялись перед мудростью Фалеса, хотя и не упускали случая подшутить над рассеянностью увлечённого наукой философа. Однажды Фалес вышел из дому созерцать звёзды и упал в яму. В ответ на его сетования служанка сказала: «Эх ты, Фалес! Не в силах увидеть то, что под ногами, думаешь познать то, что на небе?».

Однако философ был совсем не так беспомощен в жизни, как могло показаться. Аристотель рассказывает следующую историю. Недоброжелатели смеялись над Фалесом, говоря, что его занятия философией не приносят денег и потому бесполезны. Тогда учёный решил доказать обидчикам, что это не так. Наблюдая небесные светила, он установил, что в следующем году будет богатый урожай маслин. Зимой, заняв немного денег, Фалес за бесценок нанял все маслодавили в Милете и на Хиосе. Когда же созрел большой урожай, спрос на маслодавили сильно вырос, и Фалес, отдав их внаём по установленной им лично цене, выручил много денег. Так он доказал, что философ при желании может легко разбогатеть.

Фалес прожил по одним данным 78 лет, по другим — 90. Он умер, задавленный толпой зрителей на гимнастических состязаниях. На его могиле написали:

*Взгляни на эту могилу — она мала,
Но слава многомысленного Фалеса
высока до неба.*

Безусловно, Фалес не был физиком в современном смысле этого слова. Его главная заслуга в том, что он одним из первых попытался объяснить явления природы, не прибегая к мифам. На основе перенесённого им с Востока богатого опыта эмпирических наблюдений философ создал первые в истории науки теоретические построения.

единую первооснову всего возникающего нельзя себе представить, хотя вполне понятно, о чём идёт речь. Значит, понимать (мыслить) и представлять — это не одно и то же.

Чтобы легче было понять непредставимое, целесообразно прибегнуть к аналогии. Следует подобрать вещество, которое как можно меньше выделяется своими свойствами, с одной стороны, и имеет наглядную возможность превращаться в различные состояния — с другой. На роль такого вещества хорошо подходит именно вода. Ведь она бесцветна, не обладает вкусом и запахом, ей не присуща какая-то определённая форма. Вода может превращаться из жидкости в твёрдое состояние и может испаряться. Образ чувственно данной воды позволяет мыслить «воду» как понятие, обозначающее единую первооснову всех состояний меняющегося мира. Это не та вода, которую мы пьём, которая течёт в реках и заполняет моря. Это философская категория — абстрактное понятие, которому не соответствует какое-либо наглядное представление, но которое лежит вместе с другими категориями в основе научного познания. Таким образом, положение «Всё есть вода» — первое воплощение мысли о единстве мира.

Если не признавать единства всех наблюдаемых явлений, то мира как такового нет, а есть случайный набор не связанных между собой картин, иллюзия, сон с беспорядочно следующими друг за другом сюжетами. Такой тип философии возник в Древней Индии.

Греки же видели высшую мудрость в том, чтобы найти первооснову всего сущего, понять всё как проявление чего-то одного. После Фалеса первооснову мира называли воздухом, огнём и т. д. Осталось же в науке название, которое предложил Аристотель, — «лес», по-гречески «гиле» (также использовали слово «архэ», что означает «начало»). Римляне, осваивая

*Много слов отнюдь
не выражают мудрую мысль.*

Где погулка — там беда.

*Какие услуги окажешь
родителям, тех же ожидай
в старости от детей.*

*Что трудно — познать себя.
Что утомительно —
праздность.*

*Что вредно —
невоздержанность.
Что невыносимо —
невоспитанность.*

Учи и учись лучшему.

*Находясь у власти, управляй
самим собой.*

Из высказываний Фалеса



греческую философию, перевели это слово на свой язык: по-латыни «строительный лес» — «материя».

Но какая сила приводит к появлению вещей из воды — первоосновы? Причина движения, изменения, рождения и уничтожения должна быть внутренне присуща самой материи, должна пронизывать её, но в то же время чем-то отличаться. Что же это, как не мировая душа? «Всё в мире полно богов», — говорил Фалес, имея в виду одушевлённость всех вещей. В мировой душе находится первоисточник движения и любого измене-

АНАКСИМАНДР

Ученик Фалеса Анаксимандр (около 610 — после 547 до н. э.) впервые высказал мысль о бесконечности Вселенной и множественности миров. Есть основание считать, что Анаксимандр первым предположил шарообразность Вселенной, а может быть, и Земли (об этом свидетельствует знаменитый писатель первой половины III в. н. э. Диоген Лаэртский). По-видимому, Анаксимандр мог бы вступить в спор о приоритете на это открытие с Пифагором и Парменидом, хотя существуют также указания, что он считал Землю цилиндром, на верху которого живут люди. Анаксимандру приписывают изобретение солнечных часов, составление первой географической карты, систематизацию геометрических утверждений.

Первоначало мира философ назвал *áпейроном*, что в переводе с греческого означает «беспредельное». Апейрон сам по себе не обладает ни качественными, ни количественными характеристиками, он вечен и бесконечен в пространстве. Нет оснований полагать, что выделившийся из апейрона мир не подобен шару. В самом деле, как мироздание может оказаться не центрально-симметричным, если апейрон не имеет в себе выделенных направлений? Более того, он не имеет какой-либо выделенной точки. Следовательно, мир не может возникнуть в единственном экземпляре, иначе центр мира был бы выделенной точкой. Поэтому миров должно быть много и все они должны быть шарообразны.

Анаксимандр создал картину, объяснявшую во Вселенной, наверное, всё. Сначала из вечного апейрона выделились горячее и холодное, образовалась огненная сфера, в центре которой возникла Земля с водной и воздушной оболочками. Затем огненная сфера разорвалась и замкнулась в несколько колец, которые окружил плотный непрозрачный воздух. В воздушных оболочках колец образовались отверстия, которые люди воспринимают как Солнце, Луну, планеты и звёзды. Затмения Солнца и Луны, а также её

фазы объясняются закрытием и открытием этих отверстий. Солнечное кольцо в 27 раз больше Земли, а лунное — в 19. Ближе других находится кольцо «блуждающих» звёзд, т. е. планет. (Как Анаксимандр получил эти данные, неизвестно.)

Земля первоначально была покрыта водой. Со временем она испарялась, оставаясь лишь во впадинах, — так образовались моря. Высыхая от жары, земля начинает растрескиваться, в трещины проникает воздух, что приводит к землетрясениям. Первые животные возникли во влажных местах и были покрыты колючей чешуёй. Постепенно они стали выходить на сушу, и из них развились наземные животные, а затем и люди.





АНАКСИМЕН

Годы жизни ученика Анаксимандра Анаксимена известны очень приблизительно (588—525 до н. э.). Не исключено, что он дожил до разрушения Милета персами в 494 г. до н. э. Его книги, написанные, по свидетельствам более поздних авторов, простым и понятным языком, до наших дней не дошли. Анаксимен назвал первоначало воздухом, отказавшись от термина «апейрон». Возможно, он хотел подчеркнуть в самом названии первоначала его живую сущность: ведь воздух и дыхание в греческом языке, как и в русском, слова однокоренные. Также философ мог полагать, что апейрон Анаксимандра слишком абстрактен, не имеет чувственного аналога, а потому не выполняет роли образа первоначала, помогающего легче его понять. Воздух по своим качествам достаточно неопределённый: равномерно распространённый и неподвижный, он незаметен для чувств, но становится осязаемым вследствие движения, сгущения и разрежения. Так, ветер есть движущийся уплотнившийся воздух, а облако — это уплотнённый ветер. Холодное есть сгустившийся воздух, а тёплое — разрежённый. Если человек выдувает изо рта воздух плотно сжатыми губами, сгущая его, то получается холод. Если же рот широко открыт, то воздух становится разрежённым и образуется теплота.

Анаксимен считал, что плоская, как диск, Земля парит в безграничном воздухе. Солнце, Луна и планеты приводятся в движение космическим ветром. Звёзды прикреплены к хрустальному небесному своду, который вращается вокруг Земли. Затмения Солнца и Луны, а также её фазы Анаксимен объяснял тем, что светила поворачиваются к Земле то светлой, то тёмной своей стороной. Град образуется из замёрзшей воды, летящей из туч, дождь выпадает из сгустившегося воздуха. Молния и гром возникают из-за того, что ветер резко разрывает облака; радуга — результат падения солнечного или лунного света на облако, одна часть которого поэтому накаляется, а другая остаётся тёмной. Землетрясения вызваны тем, что земля при засухе растрескивается, или тем, что отдельные её участки проваливаются при сильном увлажнении.



ния вообще. Поэтому вода Фалеса одушевлена, она живая и содержит причину своих превращений в себе самой.

Такой взгляд на мир получил в XVII в. название *гилозоизм* (от *греч.* «гиле» — «лес», «материя» и «зоэ» — «жизнь»). Гилозоистами были Джордано Бруно, Дени Дидро, Иоганн Вольфганг Гёте и др. Согласно гилозоизму, «материя никогда не может существовать и быть деятельной без духа, а дух — без материи» (И. В. Гёте). Это учение с самого начала рассматривает всю материю как одушевленную. Первым философом-гилозоистом был Фалес. Ярким примером проявления одушевленности мате-

рии он считал способность магнита притягивать железные предметы. Магнит, таким образом, обладает «душой».

Объясняя явления космического и земного масштаба по аналогии с известными из обыденного опыта фактами, Фалес и его последователи, Анаксимандр и Анаксимен, задали на тысячелетия стиль научного мышления — объяснять неизвестное через известное. Физики XVII—XX вв. часто мыслили так же. Например, английский учёный Уильям Томсон, лорд Кельвин (1824—1907), за несколько десятилетий до открытия ядерных реакций пытался объяснить природу энергии Солнца на основе



термодинамики: Солнце, по его мысли, сжимается, в результате чего происходит выделение тепла.

«НЕ МНЕ, НО ЛОГОСУ ВНИМАЯ...»

Проблемы, поставленные милетскими мыслителями, продолжил разрабатывать философ, которого уже сами древние прозвали Тёмным, возможно, не только потому, что он в старости ослеп, но и потому, что его учение было слишком трудным для понимания. Речь идёт о Гераклите из ионийского города Эфеса. Родился он примерно в 544 г. до н. э., а умер около 483 г. до н. э. Прочитав его философское прозаическое сочинение, которое называлось так же, как труды Анаксимандра и Анаксимена, — «О природе», Сократ сказал: «То, что я понял, превосходно. Думаю, таково и то, что я не понял. Впрочем, для этого нужен делосский водолаз». Действительно, чтобы понять всю глубину мысли Гераклита, нужно было «нырнуть» очень глубоко.

Главная проблема, над решением которой бился философ, может быть выражена в виде *парадокса возникновения*. Откуда берётся новое? Если из старого, то оно не новое. Если же не из старого, то из ничего. Но из ничего не может возникнуть нечто. Следовательно, новое невозможно.

В самом деле, новое — это то, чего раньше не было. Однако новое должно уже содержаться в старом, иначе для его возникновения не было бы основания. Значит, то, чего нет, — небытие — должно присутствовать в уже имеющемся бытии, для того чтобы стать в конце концов бытием.

Таким образом, бытие и небытие должны сосуществовать, благодаря чему и возможно рождение нового. По Гераклиту, всё существует и одновременно не существует, потому что «всё течёт, всё изменяется».

Гераклит вскрыл проблему, не разрешённую милетскими мыслителями (они до неё просто не добрались). Но как же быть с единством мира?

Философ сделал следующий шаг после милетских мудрецов, заявив, что существует единый закон перехода небытия в бытие и наоборот — Логос. Всё происходит закономерно, подчиняясь космическому Логосу, который сам неизменен. Его никто не может отменить или переименовать, даже богам это не под силу. Именно Логос связывает Вселенную в единый, закономерный, упорядоченный, вечно меняющийся Космос. «Признак мудрости — согласиться, внемля не мне, но Логосу, что всё едино», как говорил Гераклит. Единство мира философ усматривал не только в материальной первооснове всего существующего, но и в общей закономерности всех изменений и различий в нём. Постоянно лишь одно закономерное непостоянство. «Этот Космос, один и тот же для всего [сущего], не создал никто из богов и никто из людей, но он всегда был, есть и будет вечно живым огнём, мерами загорающимся и мерами потухающим». Непрерывно меняющийся, но остающийся самим собой огонь Гераклита — это образ, символизирующий постоянную закономерную изменчивость всего происходящего и её материальную основу. «Всё обменивается на огонь, и огонь — на всё, как на золото — товары и товары — на золото». «Изменение есть путь вверх и вниз», и по нему движется мир. «Сгущающийся огонь исходит во влагу, уплотняется в воду, а вода крепнет и оборачивается землёй — это путь вниз. И с другой стороны, земля рассыпается, из неё рождается вода; а из воды — всё ос-

■ Делос — остров в Эгейском море. В Древней Греции был крупным религиозным центром.





тальное... — это путь вверх». В действительности «путь вверх и путь вниз один и тот же».

Пронизанный Логосом огонь «правит» миром и «судит» его. «Суд над миром и всем, что в нём есть, совершается через огонь». Ибо «всё грядущий огонь будет судить и осудит». Наступит мировой пожар, в котором всё сгорит, но затем опять возродится. И так до бесконечности.

Знание Логоса — это высшая мудрость, которая открывается далеко не всем. Космос говорит через избранных, к которым и причисляет себя Гераклит. «Тайная гармония лучше явной», впрочем, «ослы солому предпочли бы золоту».

Полагая, что его устами говорит не то оракул, не то сам Космос, Гераклит изъяснялся загадочно, оформляя свои мысли в афоризмы — краткие, но запоминающиеся глубиной изречения. Один из самых известных его афоризмов: «В одну и ту же реку нельзя войти дважды» (хотя река одна и та же, в ней каждый раз текут новые воды).

Подобно этой реке, каждая вещь, как считал Гераклит, изменчива, туча и вместе с тем неизменна. «В нас одно и то же живое и мёртвое, бодр-

ствующее и спящее, юное и старое. Ибо это, изменившись, есть то, и обратно, то, изменившись, есть это». Каждая вещь, таким образом, есть единство изменчивости и неизменности: в ней есть то, что сохраняется (её постоянное), и то, что не сохраняется. Если же разрушается постоянное вещи, то и сама она исчезает, хотя материя её разрушиться не может, она вечна.

Изменчивое и неизменное — это противоположности, следовательно, каждая вещь есть единство и в то же время борьба противоположностей, так как они не могут сосуществовать мирно. «Должно знать, что война общепринята, что вражда — обычный порядок вещей и что всё возникает через вражду заимообразно», т. е. одно за счёт другого, и наоборот. «Гомер, молясь о том, чтобы „вражда стинула меж богами и меж людьми“, сам того не ведая, накликает проклятие на рождение всех [сущств]». Ведь без противоречия, без борьбы между противоположностями нет движения и изменения, не возникает ничего нового.

«ДВИЖЕНЬЯ НЕТ...»

Смелой мыслью о сосуществовании бытия и небытия, о возникновении нового как переходе небытия в бытие и наоборот Гераклит разрешил парадокс возникновения, который сам и поставил.

Однако это решение далось слишком дорогой ценой, поскольку пришлось отказаться от святой святых научного мышления, от закона *недопустимости противоречия*: нельзя одному и тому же приписывать взаимоисключающие характеристики. Невозможно одновременно в одном и том же смысле существовать и не существовать. Идея о существовании небытия, т. е. того, что не существует, есть явное нарушение закона противоречия.

«Кто б мог для утоления жажды, сняв под кусточком башмаки, сбегать по берегу и дважды напиться из одной реки?» — риторически вопрошает, подражая Гераклиту, современный поэт Евгений Винокуров.



МЕТОД ПАРМЕНИДА

Парменид Элейский был первым в истории мировой науки, кто начал настаивать на необходимости строгого доказательства положений, выдвигаемых мыслителями. До него никому это и в голову не приходило: мудрецу подобало быть красноречивым и знать ответы на все вопросы. Только Парменид стремился разграничить истину (то, что доказано) и мнение (позицию того или иного мыслителя). Принципиально важным является следующее требование Парменида: при доказательстве не должно быть никаких ссылок на наглядность, очевидность и т. д. Никола́ Бурбаки (коллективный псевдоним группы выдающихся французских математиков начала XX в.) назвал Парменида «первым математиком в философии». Гегель охарактеризовал его как первого подлинного философа.

Начиная с Парменида и Зенона, философы пытаются уже не просто пророчествовать, а отыскивать аргументы, логически обосновывать свои позиции. Именно у Парменида, — подчёркивает Бурбаки, — мы впервые находим формулировку принципа исключённого третьего, а доказательства Зенона Элейского путём приведения к абсурду знамениты и сейчас». Элеаты доказывали свои предположения отрицанием утверждения, обратного предположению.

Античная математика, как полагает венгерский историк науки А. Сабо, превратилась в строго дедуктивную науку именно под влиянием элейской философии, а также в результате использования методов этой философии в математике.

С таким решением парадокса возникновения никак не могли согласиться представители другой ветви древнегреческой философии природы, появившейся и окрепшей на территории современной Италии в городе Элея. Основателем школы элеатов был поэт и философ Ксенофан (около 570 — после 478 до н. э.), наставник Парменида, написавшего для Элеи законы и учившего Зенона — самого знаменитого элеата.

Свои взгляды Парменид (около 540—480 до н. э.) изложил в поэме «О природе», от которой до наших дней дошли лишь фрагменты. Его логика поражала современников, приводя к парадоксальным выводам при, казалось бы, строгой последовательности рассуждений.

Существует только то, что существует, а несуществующее не существует. Или, как говорил Парменид, «есть только бытие, а небытия нет вовсе». Признать, что небытие есть, — значит допустить логическую ошибку. Однако из этого неизбежно выте-

кает странное утверждение, что бытие едино и неизменно. В самом деле, если бытие состоит из частей (множественно), то что отделяет одну его часть от другой? Граница, разделяющая части бытия, может быть только тем, что не является бытием; поскольку же небытия нет, то разграничивать части бытия нечему и оно едино. Бытие также неизменно, потому что ему не во что изменяться, ведь оно могло бы измениться только в то, что не есть бытие, т. е. в небытие, а небытия нет. Однако мы наблюдаем нечто противоположное — мир, разделённый на части и изменяющийся.

Разрешая свой парадокс, Парменид говорит о существовании двух миров — мира истины, о котором только и возможно высказывать истинные суждения, и мира мнения, о котором можно высказываться лишь более или менее правдоподобно. Мир истины постигается умом, мир мнения дан людям в чувственном восприятии. Философ поставил тем самым перед будущими поколениями проблему соединения постигаемого разумом мира, который един и неизменен, с чувственным миром, который множествен и изменчив.

Широкую известность получили парадоксы Зенона Элейского (около 490—430 до н. э.), так называемые *апории*. По-гречески «а» означает отрицание, «порос» — «выход», слово

Киники (от названия холма Киносарг в Афинах, где философ Антисфен занимался с учениками) — одна из древнегреческих философских школ, к которой принадлежали Антисфен, Диоген Синопский и др. Выдвинув идеал безграничной свободы личности, они с демонстративным пренебрежением относились к любым социальным институтам, традициям и нормам культуры как к формам закабаления человека, призывая к аскетизму, простоте и возврату к природе.





же «апория» переводится как «затруднение», «безвыходное положение». Сочинения Зенона до нас не дошли, но его аргументы против движения известны из работ более поздних авторов. В своих апориях Зенон приводил аргументы против возможности мыслить движение, множественность и пространство. Самыми знаменитыми являются апории против движения: «Стрела», «Стадий», «Ахиллес и черепаха» и «Дихотомия».

«Стрела» — главная апория против движения. Три остальные возникают при попытке решить эту апорию, отказавшись от представления о бесконечной делимости пространства и времени.

Стрела движется либо там, где она находится, либо там, где она не находится, — третьего не дано. Второе отпадает, так как стрела не может двигаться там, где её нет. Значит, ей остаётся двигаться только там, где она находится. Но как тело может двигаться в пространстве, которое оно само заполняет (ведь ему просто некуда в нём двигаться)?

Выход из этой «безвыходной ситуации» заключается в признании того, что движущееся тело как-то может и занимать «равное себе место», и двигаться в нём же. Однако просто признать, как поступил Аристотель,



мало, ситуацию надо ещё понять. Иными словами, апория Зенона ставит вопрос о понятии движения. Что вообще значит — тело в данный момент времени движется?

Апории Зенона убедительно показали отсутствие у греков понятия мгновенной скорости. (С освоением в Новое время этого понятия начнётся эпоха современной физики.) Если скорость есть отношение пути ко времени его прохождения, то как можно говорить о скорости в данный момент времени, когда ни пути, ни времени его прохождения нет? Даже если брать всё меньшие промежутки

НАГЛЯДНОЕ ОПРОВЕРЖЕНИЕ

Сохранилось любопытное предание. Знаменитый философ-киник Диоген (по другим версиям его учитель Антистен), выслушав Зенона, в качестве ответа на апорию начал расхаживать перед ним туда и обратно, демонстрируя существование движения. Об этом А. С. Пушкин проницательно заметил в стихотворении «Движение»:

Движенья нет, сказал мудрец
брадатый.
Другой смолчал и стал пред ним
ходить.

Сильнее бы не мог он возразить;
Хвалили все ответ замысловатый.
Но, господа, забавный случай сей
Другой пример на память мне

приводит:
Ведь каждый день пред нами
солнце ходит,
Однако ж прав упрямый Галилей.

Действительно, не всегда то, что человек видит, является истиной. Поэтому нельзя опровергать логику с помощью чувственных наблюдений. По преданию, Зенон ответил Диогену-кинику: «Разумом ты разреши труднейшую эту задачу!».





АНАКСАГОР ИЗ КЛАЗОМЕН

Один из самых выдающихся греческих философов-досократиков — Анаксагор (около 500 — около 428 до н. э.) был уроженцем малоазийского города Клазомены. Он с ранних лет увлёкся философией. Получив после смерти отца большое наследство, молодой Анаксагор отказался от него в пользу многочисленных родственников и посвятил себя науке. В возрасте 20 лет он перебрался в Афины, переживавшие после победы над персами бурный экономический и культурный подъём. Здесь Анаксагор начал преподавать философию. В числе его учеников были великий афинский государственный деятель Перикл, ставший большим другом Анаксагора; физик Архелай, впоследствии учитель Сократа; драматург Еврипид.

Анаксагор обладал мирооушением, совершенно не характерным для своей эпохи. Большинство греческих учёных — его современников и предшественников — принимали активное участие в политической жизни родных городов. Анаксагор же был полностью лишён естественного для древнего грека полисного патриотизма. Рассказывали, что на вопрос: «И тебе дела нет до отечества?» — он ответил: «Отнюдь

нет, мне очень даже есть дело до отечества!» — и указал на небо. Анаксагор говорил, что родился для того, чтобы «созерцать небо и порядок Вселенной». Когда его спросили, не желает ли он перед смертью вернуться на родину, в Клазомены, он ответил: «Нет, дорога в Лид отовсюду одинакова». Служение познанию дало Анаксагору духовную свободу и стойкость перед ударами судьбы. Получив известие о смерти своих детей, он сказал: «Я знал, что произвёл на свет смертных». Узнав, что афиняне осудили его на смерть, философ заметил: «Природа давно приговорила к смерти и меня, и их». Находясь в тюрьме, Анаксагор пытался найти квадратуру круга. В своих «Разнообразных рассказах» греческий писатель Элиан отмечал, что философа ни разу не видели ни смеющимся, ни улыбающимся.

Анаксагору принадлежит по крайней мере одно сочинение, названное им «О природе» и состоящее из нескольких частей. Запрещённая при жизни философа, эта работа уже во времена Платона была широко известна. К сожалению, до наших дней сохранились только фрагменты, процитированные Аристотелем, Симплицием и другими мыслителями древности.

Основные вопросы, рассмотренные в сочинении «О природе», можно сформулировать так: из чего состоят окружающие нас материальные объекты? Чем вызвано их возникновение и уничтожение? Чем объяснить качественное разнообразие бытия?

Согласно Анаксагору, всё окружающее человека состоит из мельчайших невидимых частиц, которые сам философ называл «семена» (спермата). Ничто материальное не возникает и не уничтожается, но соединяется из семян и разделяется на них же. Семян бесконечное множество, и они бесконечно разнообразны по форме, величине, цвету, вкусу, весу и т. д. Каждое семя обладает бесконечным числом существующих качеств, но в разной степени. Преобладание в вещи семян,

в которых то или иное качество доминирует, определяет её качество как целого: в кости преобладают косточки, в мясе — крохотные кусочки мяса. Однако в каждой вещи присутствует небольшое количество частиц с преобладанием других качеств. Каждая из частиц бесконечно делима, и сколь бы мала ни была частица, в ней всегда будет то же бесконечное количество качеств.

Важнейшим элементом мировоззрения Анаксагора является введённое им понятие «Ум», или «Мировой Разум» («Нус»). Материю философ считал косной, принимая учение Парменида о том, что тело не может двигать само себя. Анаксагор считал, что вначале все семена были хаотически перемешаны и ни одно их качество не проявлялось. Затем Ум — активное начало и первопричина движения — стал разделять эту хаотическую массу, придав ей вращательное движение. Частицы со сходными свойствами и качествами начали выделяться и соединяться между собой. В этом направлении и развивается Вселенная. Однако полное отделение частиц, обладающих одними и теми же качествами, невозможно, поскольку «во всём имеется часть всего». Полное отделение одинаковых частиц — это идеал, к которому стремится Вселенная и которого она никогда не достигнет.

Ум не творит, а только перемещает существующие вещи. Он приводит всё в порядок, но не производит ничего нового. Мировой процесс Анаксагор считал не борьбой двух противоположных деятельных начал, как Эмпедокл (начал любви и вражды), а преобразованием косной материи деятельностью Ума. Всё благо и красота исходят от Ума, всё несовершенство — от материи. Уму присуща сила движения и способность познавать. Он всемогущ и всеведущ. Аристотель назвал Анаксагора «единственным трезвым среди зря болтавших» именно за то, что философ ввёл понятие «Ум».

Солнце Анаксагор считал огромной раскалённой глыбой размером с Пелопоннес.





Софизм (от греч. «софизма» — «уловка», «выдумка», «головомалка») — ложное по существу умозаключение, кажущееся правильным, основанное на преднамеренном нарушении правил логики. Правдоподобие софизма объясняется чисто субъективным впечатлением, вызванным недостаточностью логического анализа.

времени и соответствующие им пройденные пути, всё равно это конечные, а не бесконечно малые времена и длины. Ведь бесконечно малое, как станет ясно в Новое время, есть операция ума, а не самое малое, которое можно представить. Пока не появится понятие производной функции (лишь через 2 тыс. лет после Зенона), ничего не получится. Однако и с производной тоже возникают проблемы, потому что понятие функции опирается на понятие множества, а в теории множеств было открыто немало парадоксов, и они в полной мере не разрешены до сих пор.

Зенон осознал то препятствие, которое стояло на пути у всей греческой науки. Греки так и не смогли взять этот барьер. Только немногие из них, такие, как Евдокс Книдский и Архимед, сумели нащупать подходы к нему. Лишь с распространением христианского мировоззрения и преобразованием на этой основе научного мышления Исаак Ньютон и Готфрид Вильгельм Лейбниц создали интеллектуальный аппарат, позволивший освоить понятие движения.

Если не вникать в глубину апорий и владеть основами математического анализа, можно взглянуть на Зенона свысока и удивиться, как он не додумался до очевидных вещей. Так, известный французский математик Поль Леви (1886—1971), имея в виду апорию «Ахиллес и черепаха», воскликнул: «Признаюсь, я никогда не понимал, как люди, в других отношениях вполне разумные, могут оказаться смущёнными этим парадоксом... Ответ, который я дал, когда мне было одиннадцать лет, старшему, рассказавшему мне этот парадокс... я резюмировал тогда такой немногословной формулой: „Этот грек был идиотом“. Я знаю теперь, что нужно выражать свои мысли в более вежливой форме и что, быть может, Зенон излагал свои парадоксы только для того, чтобы проверить разумность своих учеников».

Апории Зенона никогда не переставали волновать математиков и физиков. В науке XIX—XX вв. споры о них разгорелись с новой силой. Одни учёные видели в апориях глубокий смысл, другие утверждали, что это не что иное, как ловкие софизмы. История науки показывает, однако, что если о чём-то долго спорят, то, как правило, не зря.

ВСЁ ЕСТЬ ЧИСЛО

Элеаты не были самыми первыми философами Великой Эллады (так греки называли колонизированную ими часть Италии). Раньше них здесь появились пифагорейцы. Последователи Пифагора (VI в. до н. э.), выходяща с ионийского острова Сámos и младшего современника Фалеса, вырабатывали оригинальный взгляд на мир и жили в соответствии с ним. Около 532 г. до н. э. Пифагор переселился в город Кротон в Южной Италии, где создал религиозно-философское братство, в которое наряду с мужчинами принимали и женщин. Так появились первые женщины-философы. Наибольшую известность получила жена Пифагора Теано (по другим свидетельствам, она была женой пифагорейца Бротина). Сохранился фрагмент из её сочинения «О благочестии»: «И многие элины, как мне известно, думают, будто Пифагор говорил, что всё рождается из числа. Но это учение вызывает недоумение: каким образом то, что даже не существует, мыслится порождающим? Между тем он говорил, что всё возникает не из числа, а согласно числу, так как в числе — первый порядок, по причастности которому и в счислимых вещах устанавливается нечто первое, второе и так далее».

По преданию, Пифагор однажды шёл мимо кузницы и, услышав разные звуки от ударов молотов разного веса, решил, что звук можно измерить числом, а именно величиной



Да разве её догонишь?..

По мнению Зенона, Ахиллес никогда не догонит черепаху: всякий раз, пока он будет преодолевать разделяющее их расстояние, черепаха немного отползёт, и ему понадобится дополнительное время, которое, в свою очередь, использует черепаха...





поннес (полуостров, на котором расположена Греция). Учёный утверждал, что на Луне есть холмы, равнины и даже дома; кометы — скопище планет, испускающих пламя, а падающие звёзды — искры, выбрасываемые воздухом. Ветер, полагал философ, возникает оттого, что Солнце разрезает воздух, гром — это столкновение туч, молнии — трение туч, землетрясения же происходят вследствие проникновения масс воздуха внутрь земли.

Взгляды Анаксагора противоречили официальной религии, господствовавшей в Афинах, и, по мнению жрецов, оскорбляли богов. Кроме того, в обстановке надвигавшейся Пелопоннесской войны ухудшилось положение Перикла. Его политические противники начали гонения не только против него самого, но и против его друзей.

Анаксатору предъявили очень серьёзные по тем временам обвинения в безбожии и «персидской измене». Суд приговорил Анаксагора к смерти, но Перикл спас своего учителя. Он обратился к афинянам и спросил, могут ли они в чём-нибудь упрекнуть его самого. «Нет», — ответили те. «Ну так вот, — сказал Перикл, — а я его ученик. Так не поддавайтесь же клевете и не убивайте человека; послушайте меня и отпустите его!» Философа приговорили к штрафу в 500 талантов и изгнанию из города. Он удалился в Лампсак, где и прожил до конца своих дней, окружённый почётом и уважением. Жители Лампсака похоронили его за счёт городской казны. На могильном камне написали следующие строки:

*Истины высший предел и границы
Вселенной достигший
Здесь, под этой плитой, Анаксагор
погребён.*

Последним желанием философа было: «Пусть ежегодно в месяц моей смерти детей отпускают на канikuлы». Этот обычай в Лампсакe соблюдали несколько столетий.

ЭМПЕДОКЛ ИЗ АГРИГЕНТА

Древнегреческий философ, врач, поэт и политический деятель Эмпедокл (около 490 — около 430 до н. э.) объяснял многообразие мира механическим соединением четырёх, как он их называл, корней всех вещей: огня, воздуха, воды и земли. В отличие от четырёх стихий милетских философов, считавшихся вариантами одной первоосновы, корни Эмпедокла несводимы друг к другу, ибо качественно различны.

Эмпедоклу удалось найти важнейшую точку соприкосновения гераклитовской и элейской систем. Вслед за Парменидом он признал, что нечто не может возникнуть из ничего и, наоборот, обратиться в ничто и что, следовательно, бытие неизменно. Однако Эмпедокл отнёс это положение к каждому из корней в отдельности, объяснив появление (исчезновение) вещей смешением (разделением) этих неизменных элементов. Так Эмпедокл объединил идеи Гераклита и элеатов: хотя элементы одни и те же, но, образуя различные смеси, они становятся разными вещами — «столь меняет [их] смесь». И поскольку эти элементы «никогда не прекращают непрерывного чередования, постольку они существуют вечно, неподвижные в круге».

Движение корней никогда не прекращается благодаря наличию внешних по отношению к ним сил: любовь их связывает, вражда — разъединяет.

Философ вслед за Гераклитом понимал источник движения как единство противоположностей. По существу лю-

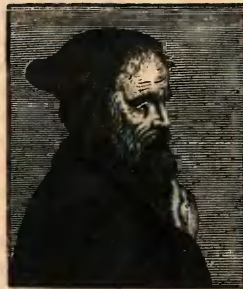
бовь и вражда с их функциями связи и разъединения — силы притяжения и отталкивания, наличные «во всех вещах». Лишь единство этих сил позволяет понять (как позднее обратил внимание немецкий философ XVIII столетия Иммануил Кант) протяжённость вещей. Если бы частицы материи обладали только способностью притяжения, они слились бы в одну материальную точку. Если бы они обладали только способностью отталкивания, то не могли бы существовать объекты с конечными размерами.

Эмпедокл полагал, что вещи имеют прерывное, пористое строение и их взаимодействие осуществляется взаимопроникновением через поры. Мы видим сквозь некоторые вещества, потому что они имеют «поры — невидимые из-за малого размера... частые и расположенные рядами»; чем пор больше, тем прозрачнее тело. Смешиваются вещества, поры которых соразмерны. На основе этой концепции Эмпедокл пытался разрешить, в частности, вопрос о притяжении железа магнитом, интересовавший ещё Фалеса.

Прерывность вещей, по Эмпедоклу, обусловлена пористостью корней. Здесь, однако, возникала существенная проблема, отмеченная Аристотелем: если не признать существования неделимых частиц, то придётся согласиться с утверждением, что в любой части любого объекта есть поры. Но «в таком случае помимо пор не было бы никакого тела, и всё было бы пустотой».

В этом отношении представления Эмпедокла проигрывали как принципу бесконечной делимости материи Анаксагора, так и его отрицанию — атоизму Левкиппа и Демокрита.

Существует легенда, что Эмпедокл покончил с собой, прыгнув в кратер вулкана Этна. (На самом деле он мирно скончался, дожив до преклонных лет.) Когда в его родном городе Агригенте был свергнут тиран, соотечественники положили к ногам Эмпедокла знаки царского достоинства, однако он отказался от власти. Философ прожил свою жизнь окружённый почитателями и учениками.



Эмпедокл.



ПИФАГОР

Пифагор первым назвал себя философом (от греч. «фи-лео» — «люблю» и «софия» — «мудрость»), т. е. любителем мудрости, а не мудрецом. Он утверждал, что мудростью обладает только Бог, человеку же дано лишь стремление к мудрости. «Я не учу мудрости, я исцеляю от невежества», — говорил Пифагор. По другим свидетельствам, Пифагор хотел, чтобы его считали не только мудрецом, но и пророком, а может быть, и полубогом. О нём ещё при жизни складывали легенды. Говорили, что его душа жила сначала в сыне бога Гермеса, потом переселилась в троянца, которого ранил царь Спарты Менелай. Затем она оказалась в теле жителя Милета, узнавшего полустгнивший щит Менелая на стене храма Аполлона, и только после этого воарилась в теле Пифагора. Ему якобы удалось погладить белого орла, он разговаривал с рекой Сирис, одновременно находился в двух городах, которые разделяет неделя пути. Он, наконец, живым вышел из Аида.

Философы-элеаты недолюбливали Пифагора. Они, видимо, питали глубокую неприязнь к его мистическим наклонностям, считая, что Греции необходима другая философия — ясная и логичная, чуждая всякой таинственности.

Ксенофан, большой остроумец, сочинил пародию на Пифагора, учившего о переселении душ:

*Как-то в пути увидав, что кто-то шенка обижают,
Он, пожалевши шенка, молвил такие слова:
«Полно бить, перестань! живёт в нём душа дорогого
Друга: по вою шенка я её разом признал».*

Существует современный вариант этой пародии:

*Ворона серотелая
Летает не спеша —
Твоя осиротелая
В ней каркает душа.*



веса молота. Знаменитый монохорд Пифагора представлял собой струну, натянутую на доске. Звучание струны зависело от её длины, которую можно выразить числом. Так, музыкальный интервал октава соответствует звучанию двух одинаково натянутых струн, длины которых относятся как 1 : 2. Для квинты и кварты отношения длин иные — 2 : 3 и 3 : 4. Эти и другие факты Пифагор использовал для подтверждения мысли о том, что число есть мера всех вещей и ему подчиняется всё.

Пифагор не отталкивался от частных фактов (звучания молотов и струн, например) для того, чтобы распространить их особенности на всю природу, как это делали учёные более поздних эпох. Ход его мысли был скорее обратным: общая идея о том, что всё возникает согласно числу, помогла ему разглядеть конкретные факты, подтверждающие её.

Сведений об учении Пифагора сохранилось немного, и мы не знаем, как именно пифагорейцы обосновали свой знаменитый тезис о числе как первоначале мира. Однако общая направленность ранней греческой философии на логическое осмысление

идеи единства мира в общих чертах позволяет восполнить этот пробел.

Материя, о которой говорили милетские философы, бесформенна (аморфна) и совершенно неопределённая. Как тогда чувственно воспринимаемые вещи, в основе которых лежит неопределённая материя, могут обладать вполне определёнными свойствами? Между неопределённым и определённым (между «пределом» и «беспредельным», как говорили пифагорейцы) пролегает пропасть. Необходимо было найти такую основу всего существующего, которая, словно мост, соединила бы края этой пропасти. Такой мост Пифагор навёл с помощью понятия числа.

Каждое конкретное число ограничено, но не существует самого большого числа. Следовательно, число вообще (не «два», не «сто», а число как таковое) включает в себе единство и ограниченного (предела), и неограниченного (беспредельного). Таким образом, первоначало всех вещей можно мыслить, используя понятие числа. Всё есть число, но не в том смысле, что числа порождают вещи (Теоно указывала на невозможность этого), а в том, что единство

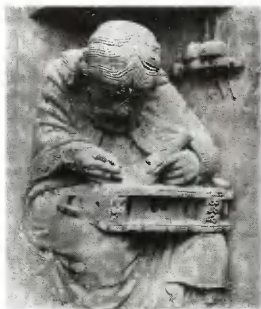


ФИЛОЛАЙ

Обнародовал книги пифагорейцев под общим заглавием «О природе» Филолай (около 470—388 до н. э.).



Пифагор с музыкальным инструментом. Барельеф. Шартрский собор, Франция.



Движущей силой Космоса Филолай считал стихию огня. Управляющей стихии (Очагу Вселенной) пристало находиться в центре мира, вокруг Центрального Огня должны вращаться десять космических тел, потому что «десять» — это число, выражающее полноту мироздания (возможно, потому, что сумма первых четырёх — самых важных — чисел равна десяти). Однако небесных объектов, известных Филолаю, было восемь: небо с неподвижными друг относительно друга звёздами, пять видимых невооружённым глазом планет, Солнце и Луна. Даже если Землю заставить вращаться вокруг Центрального

Огня, всё равно будет не хватать одного космического тела.

Может быть, кого-нибудь это и смутило бы, но только не Филолай — он был настоящим пифагорейцем, который наблюдаемым фактам всегда предпочтёт логику числовой гармонии. Философ смело направил Землю вокруг Центрального Огня и добавил недостающее тело — Противоземлю (Антихтон), всегда находящуюся с другой стороны обитаемой части Земли и поэтому скрытую от людей. Сегодня подобные рассуждения кажутся невероятными, но такова логика пифагореизма, не раз приводившая к удивительным открытиям.

вещей заключено в числах. Изучая их, можно понять мир как единое и, что немаловажно, гармоничное целое — вот вывод пифагорейской философии природы.

Теперь становится понятен стимул, побудивший Пифагора и его последователей отделить математику от интересов торговли и измерения земли, превратив её в теоретическую науку. Каждый математический объект служил для пифагорейцев символом, несущим тайный смысл определённой грани мира, а все эти грани, сведённые воедино, представлялись похожими на прекрасный алмаз. Для пифагорейцев математика была ориентиром в жизни, философией.

Пифагор первым назвал Вселенную Космосом, подчеркнув её упорядоченность, соразмерность, гармоничность, красоту. Структура Космоса скрыта в красоте математических построений. Земля имеет форму шара, потому что это наиболее соразмерное из всех тел. Расстояния до небесных светил и между ними не могут быть произвольными, их величины должны соответствовать гармоническим музыкальным интервалам. Небесные сферы — Луна, Солнце, пять известных ему планет и неподвижные

звёзды — издают при вращении каждая свой музыкальный звук. «Музыка небесных сфер» можно выразить математически; кто сумеет это сделать, тот её услышит. Пифагор сумел.

Размышляя о единстве мира, он открыл новый подход: логика дополняется чувством гармонии, рассудочное восприятие мира — эстетическим чувством. Многие современные физики полагают, что некрасивая теория не может быть истинной (некрасивые самолёты плохо летают, вторят им инженеры). В этом смысле можно сказать, что пифагорейцы были первыми физиками-теоретиками, ведь они смотрели на мир глазами красивой математики. Когда мы повторяем вслед за Галилеем, что книга природы написана на языке математики, в этих словах звучит отголосок мысли Пифагора.

Созданный Пифагором союз занимался не только философией, но и политической деятельностью. Это его и погубило. Пифагорейцы выступали за новую аристократию — «аристократию духа»; по их понятиям, управлять государством должны лишь достойные и посвящённые в тайное знание. Придя к власти в Кротоне и близлежащих Метапонте и Та-



ренте, они вызвали гнев у сторонников демократии, которые подняли восстание и сожгли пифагорейцев прямо в домах, где те обсуждали государственные дела. (Пифагору, по легенде, удалось спастись.)

К тому времени и среди самих пифагорейцев разразился кризис, поставивший под сомнение их главный мировоззренческий тезис. Причиной (а может быть, только поводом) послужило великое математическое открытие Тезета, вытекающее из теоремы Пифагора. Речь идёт о несоизмеримости диагонали квадрата с его стороной: не существует такого отрезка, который укладывался бы целое число раз и на стороне квадрата, и на его диагонали. Это явилось, по сути, открытием иррациональных чисел (таких, которые нельзя представить в виде отношения двух целых чисел). Пифагорейцы были в смятении: как может число быть первоначалом мира, если даже такую простую вещь, как диаго-

наль квадрата со стороной, равной единице, нельзя выразить числом!

Свои знания пифагорейцы не разглашали, а открытие несоизмеримости скрывали особенно тщательно, вероятно надеясь когда-нибудь понять, в чём здесь дело (так и случилось позднее, но союз к тому времени уже распался). Пифагореец Гиппас, активно выступавший за демократизацию знания, выдал эту тайну «недостойным», за что был проклят собратьями. Вскоре он утонул, но трещина в мировоззрении пифагорейского союза так и не исчезла. Впоследствии пифагореизм существовал уже как открытое учение.

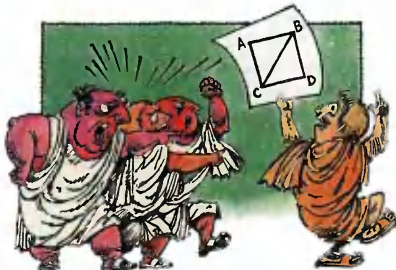
ВСЁ СОСТОИТ ИЗ АТОМОВ

Проблемы, поставленные в ионийской и итальянской философии природы, такие, как парадокс возникновения, несоизмеримость диагонали квадрата с его стороной, апории Зенона и многие другие, попытались разрешить Левкипп (приблизительно 500—440 до н. э.) и его знаменитый ученик Демокрит (460—371 до н. э.). Они основали в Греции атонизм, который стал одним из наиболее устойчивых течений мировой философии и науки.

Левкипп, ученик Зенона Элейского, ввёл в философию понятие *атома* как мельчайшей, невидимой и неделимой частицы («атомос» означает по-гречески «неразрезаемый», «неделимый») и понятие абсолютной пустоты, в которой движутся атомы. Он также создал учение о *детерминизме* (от *лат.* *determino* — «определяю»), причинной обусловленности всех природных явлений: «Ни одна вещь не происходит попусту, но все на [некотором] основании и по необходимости».

Демокрит был пленён этой мыслью. Он говорил, что «предпочёл бы одно причинное объяснение сану

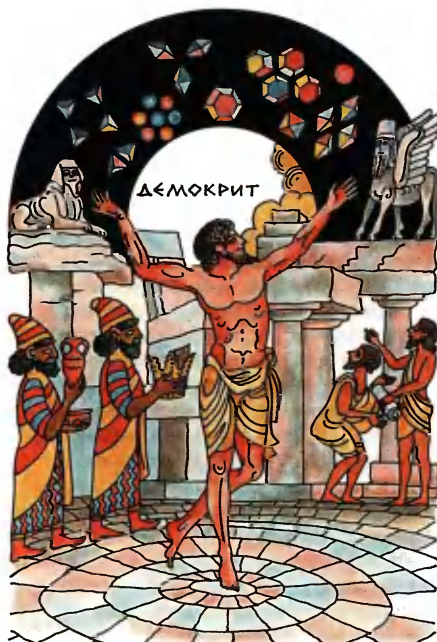
Демокрит.





персидского царя», — так нелегко было отыскать причины происходящего. Его называли «смеющимся философом» — настолько несерьёзным казалось ему всё, что люди делали всерьёз. На основе идей Левкиппа Демокрит создаёт новую философию природы, дерзнув соединить несоединимое.

Во-первых, ему нужно было в существующем найти небытие, для того чтобы объяснить возможность изменения, — урок Гераклита он усвоил хорошо. Во-вторых, не хотелось отказываться от красивой теории пифагорейцев. Однако если сущностью вещей являются числа, т. е. нечто прерывное (дискретное), состоящее из неделимых единиц, то как вещи могут быть непрерывными, сплошными? И в-третьих, Демокрит соглашался с элейцами, что истинное бытие должно быть единым и неизменным. Совместимы ли друг с другом все эти требования?



Демокрит был уверен, что совместимы, если вообразить материю не единой, а рассыпанной на отдельные невидимые элементы (атомы), окружённые пустотой. Пустота — это ничто, в том смысле, что из неё ничего не может возникнуть, однако она существует, так как обеспечивает атомам возможность двигаться из одного места в другое. А все изменения (возникновения нового) происходят в результате перегруппировки атомов. Проблема Гераклита решена.

Был спасён и тезис пифагорейцев. Любой предмет представляет собой набор определённого числа атомов, вместе с тем сами атомы характеризуются формой, порядком и положением. Так, А отличается от П формой, АП от ПА — порядком, П от П — положением. Кроме того, у каждого атома есть численно выраженная тяжесть. Число, форма, порядок и положение — понятия математические, ими характеризуется сущность атомов и состоящих из них вещей. Атомы земли, воды, воздуха и огня различаются прежде всего формой и тяжестью. Разрешается и мучившая пифагорейцев проблема несоизмеримости, так как нет реальной непрерывности, а атомы всегда можно пересчитать, где бы они ни были уложены — вдоль стороны квадрата или вдоль его диагонали.

Должны быть спокойны и элейцы: ведь каждый атом есть вечное, единое и неизменное бытие Парменида.

Итак, начала всего сущего — атомы, разделённые пустотой. Их бесконечно много. Каждый атом — это абсолютная заполненность; пустота — абсолютная незаполненность. Атомы не содержат пустоты (некуда вставить лезвие, чтобы разрезать атом), пустота однородна и бесконечна. Вещи возникают в результате соединения атомов и уничтожаются, распадаясь на части и в конце концов — на атомы. Мир бесконечно много, так как было бы странно, если бы на большом ровном поле вырос



РАСКОЛОТЫЙ МИР

Платон хотел сжечь все сочинения Демокрита, какие только мог собрать, но вмешались пифагорейцы Амикл и Клиний: «Бесполезно — книги его уже у многих на руках». Что так возмутило великого идеалиста? Демокрит расколол мир не только на уровне материи (с этим ещё можно примириться). Он оказался принципиально непоследователен в глазах греческого «любителя мудрости», полагая, что кроме законов природы существуют законы, установленные человеком: «по установлению», а не «по природе» возникают речь, государство и его законы. Человек перестал быть микрокосмосом, отражающим макрокосмос. «Нужда и опыт были для человека учителями во всём, надлежащим образом наставляя это животное, от природы способное ко всяческому учению и имеющее помощником во всём руки, рассудок и умственную гибкость». Богов нет, считал Демокрит, их создали люди из страха перед громом и молнией, затмениями Солнца и Луны. И никакой мировой души тоже нет. Вообще человеку не перед кем держать ответ в этом мире, кроме самого себя: ни перед богом, ни перед природой. «Не из страха, но из чувства долга надо воздерживаться от дурных поступков».

Человек, по Демокриту, должен быть игрушкой природной необходимости (если последовательно придержи-

ваться атомизма), а он вместо этого неизвестно что возмнил о себе — какой-то долг, перед кем? Демокрит разрушал мировоззренческий фундамент греческого общества, поэтому его книги и уничтожали.



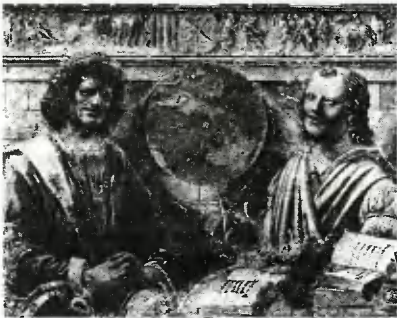
только один колос и если бы в бесконечном пространстве образовался только один мир. Тёплое и холодное, сладкое и горькое, цветное, пахучее на самом деле не существуют — всё это «мнение», по истине есть лишь атомы и пустота. Атомы не могут двигаться с произвольной скоростью и в произвольном направлении — для этого нет оснований, всё происходит по необходимости. Случайное, по Демокриту, только непознанная необ-

ходимость. Причина возникновения вещей — мировой вихрь, олицетворяющий космическую необходимость. Человеческая душа состоит из особых атомов, по идее также подчинённых космическому вихрю.

Картина впечатляющая, правда жутковатая. Где жизнь, где смысл? «Лучше уж следовать мифу о богах, чем быть рабом предопределённости физиков, ибо вера в мифы хотя бы даёт в живых образах надежду на то, что, воздавая почтение богам, удаётся вымолить их расположение» — так писал спустя век после Демокрита Эпикур (341—270 до н. э.), который придумал с целью преодолеть предопределённость (фатализм) самопроизвольное отклонение атомов от прямолинейного пути.

И с физической точки зрения учение Демокрита было уязвимым — оно не согласовывалось с привычными наблюдаемыми фактами, например с падением камней на землю. Камень, состоящий из атомов, падает. Каждый

Гераклит и Демокрит. Изображение эпохи Возрождения.





Софисты (от греч. «софистес» — «искусник», «лжеумудрец») — в Древней Греции середины V — первой половины IV в. до н. э. профессиональные учителя философии и красноречия. Вместо поисков абсолютной истины о Космосе и бытии они занимались разработкой прагматических рецептов поведения человека «без предассудков». Софистами были Протагор, Горгий, Гиппий и др.

его атом окружён пустотой. Как атом «узнаёт», куда ему падать, где верх, а где низ, ведь пустота совершенно однородна? Движение в ней начаться не может в силу полной симметрии исходного положения. Однако падение камня — это факт, следовательно, пустоты не существует.

Говорить о каком-то взаимодействии между атомами на расстоянии нет оснований, потому что через пустоту ничего не может передаваться. Для этого нужно поместить в неё Бога, который может всё. Так впоследствии сделал Ньютон, благодаря чему смог построить новую небесную механику.

Античный атомизм как физическое учение был обречён, но ещё долго существовал как философско-этическое учение. Лишь в Новое время, возрождённый, он из философии переместился в физику.

ВЕСЬ МИР ПОСТРОЕН ИЗ ТРЕУГОЛЬНИКОВ

Трудная задача стояла перед Платоном (428 или 427—348 или 347 до н. э.), который основал около 387 г. до н. э. Академию (первое в мире высшее учебное заведение). Афины проиграли Спарте Пелопоннесскую войну (431—404 гг. до н. э.) за господство в Элладе, казнили учителя Платона — Сократа (около 470—399 до н. э.), обвинив в «поклонении

новым божествам» и «развращении молодёжи». Деятельность софистов, этих лжеумудрцов, тоже не прошла даром.

Они поставили множество новых проблем в области логики и науки о языке, но их «мудрость» очень многих привела к неверию в единый для всех Логос. Глава софистов Протагор (около 480—410 до н. э.) провозгласил человека мерой всех вещей. Получилось: сколько людей, столько и мнений, единой истины нет. Софисты учили, что в человеческом обществе ничто не существует по природе. Наоборот, и нравы, и государственное устройство — всё это установлено по соглашению между людьми, а значит, не несёт на себе



Обучение в школе. В центре предположительно Протагор. Краснофигурная чаша. Около 480 г. до н. э.



печати незыблемости, вечности, абсолюта. Справедливость — понятие относительное: что справедливо для одного города-государства, несправедливо для другого.

Божественный Космос оказался низвергнут, а его теоретики заблудились в лабиринте противоречивых мнений. Дух подлинной философии был поколеблен. Единое бытие рассыпалось на части в учениях Эмпедокла из Агригента (около 490 — около 430 до н. э.) и Анаксагора из



Клазомен (около 500 — около 428 до н.э.), а в особенности — в учении Демокрита.

Сократ остро почувствовал в софистике страшную угрозу для всего греческого общества. Он попытался отбросить разноречивое философствование о небе и установить новый принцип единства мира — благо. Душа, исполненная добродетели, — вот что объединяет и людей, и мироздание. Платон восхищался идеями Сократа, но кончилось всё чашей цикуты, которую его наставник выпил по приговору Афинского суда.

Необходимо было восстановить утраченное единство, связать в одно целое логику элеатов, гармонию пифагорейцев и благо Сократа в учении о прекраснейшем Космосе — ведь только по его образу и подобию можно строить человеческую жизнь. Платон, желая дать отпор атомистам и софистам, должен был по-новому разрешить проблемы, в которых первые запутались, а вторые не видели смысла. Он считал эту задачу последним штурмом высоты, откуда открылся бы вид на весь мир.

Вечное, единое и неизменное бытие Парменида, о котором только и возможно иметь строгое знание, становится, по Платону, царством идей-первообразов, являющихся идеальными моделями всех чувственно воспринимаемых вещей.

Царство идей — это и совокупность постигаемых умом математических сущностей, тех самых, о которых говорили пифагорейцы. При входе в Академию Платона была начертана надпись: «Да не войдёт сюда не знающий геометрии!».

Ключевое значение имеет также благое начало, добро, о котором размышлял Сократ. Мир возник именно потому, что его устроитель, демиург (от греч. «демиургос» — «мастер», «ремесленник»), исполнен стремлением к благу. Иначе что побудило его к действию? Считать же, что никакого демиурга нет и не было, неразум-

но, потому что тогда в мире не было бы никакого смысла.

Демиург, движимый благостью, соединяет вечные формы (чистое бытие) с тем, что лишено какой-либо оформленности, но тем не менее существует, с материей, которая есть иное по сравнению с царством форм бытие, инобытие. Материя абсолютно изменчива, царство идей абсолютно неизменно. Цель демиурга — создать Космос как совершенное живое разумное существо, само бытие которого наполнено глубоким смыслом.

Каждая чувственно воспринимаемая вещь существует как нечто определённое лишь постольку, поскольку она причастна к царству чистых форм. Материя вещи — это текучее начало, приводящее её в конце концов к разрушению; ему на смену приходит новое возникновение. Космос же в целом, будучи однажды создан, существует вечно.

Всё, что люди видят и ощущают, — только тени на стене пещеры, которые отбрасывают освещённые светом космического блага идеальные предметы. Люди — узники этой пещеры, прикованные лицом к стене, — не видят яркого света истины и



«Смерть Сократа». Гравюра из первого английского издания сочинения Платона «Апология Сократа». 1675 г.

Цикута (вех) — род водных и болотных трав. Некоторые виды цикуты могут вызвать у человека смертельное отравление.





довольствуются лишь тенями. Идеальные предметы неизменны, тени же от них беспорядочно пляшут на стене. Люди привыкли к этому мельтешению и не ведают об истинном бытии. Наблюдаемый ими мир, существующий подобно царству теней, отягощён материей, и знание о нём не может быть точным.

Платон рассказал о невидимой идеальной модели мира, на которую взидало божество при его создании. Эту модель можно в принципе постичь разумом, но сделать это очень трудно и, вероятно, недоступно смертным. В диалоге «Тимей» философ писал: «Мы, рассматривая... много вещей, таких, как боги и рождение Вселенной, не достигнем в наших рассуждениях полной точности и непротиворечивости. Напротив, мы должны радоваться, если наше рассуждение окажется не менее правдоподобным, чем любое другое, и притом помнить, что и я, рассуждающий, и вы, мои судьи, всего лишь люди, а потому нам приходится довольствоваться в таких вопросах правдоподобным мифом, не требуя большего». И всё-таки миф, сочинённый Плато-

ном, удивителен по красоте. Он совмещает стройность теории и её соответствие фактам, известным в ту эпоху.

В отличие от Демокрита у Платона элементы вещей могут превращаться друг в друга. «То, что мы называли водой, — объяснял философ, — может, как мы видим, затвердеть и обратиться в камни и землю. Если же это растворится и разделится, то оно же превратится в дуновение и воздух, а воздух, воспламенившись, превращается в огонь... Воздух, стянувшись и стесившись, становится облаками и туманами. Они же, будучи ещё более сжаты, образуют текучую воду, а из воды вновь возникают земля и камни. И так в круговороте они, по-видимому, порождают друг друга». Четыре вида материи Демокрита (земля, вода, воздух и огонь) в физической «мифологии» Платона — не постоянные элементы, а четыре структурных состояния. Они могут превращаться друг в друга, поскольку сами состоят из некой первичной материи, которую не следует называть «ни землёю, ни воздухом, ни огнём, ни водой, ни тем, что произошло из них или из чего произошли они сами».

Для объяснения этих представлений Платон нашёл замечательную математическую структуру. Как раз в то время молодой афинский математик Тезет (около 410—369 до н. э.) разработал геометрию правильных многогранников (их существует всего пять видов: куб, тетраэдр, додекаэдр, октаэдр и икосаэдр). Платон воспользовался этой математической новинкой. У тетраэдра, октаэдра и икосаэдра все грани одинаковы и представляют собой равносторонние треугольники, каждый из них может быть разбит на шесть прямоугольных треугольников. Куб обладает гранями, которые можно разбить на четыре равнобедренных прямоугольных треугольника. Додекаэдр же имеет пятиугольные грани, вообще не делимые на одинако-

Платон. Диалог «Тимей». Страница из рукописи. XI в.

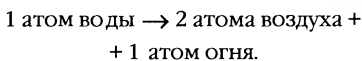




вые треугольники. Следовательно, делает вывод Платон, три вида материи могут иметь формы тетраэдра, октаэдра и икосаэдра, которые способны, распавшись на оди наковые треугольники, вновь собраться друг в друга. Куб и додекаэдр не могут превращаться ни друг в друга, ни в остальные три геометрических тела. Поэтому земле, которая является наименее подвижным и наиболее крепким элементом, Платон приписал кубическую форму. То, что имеет меньше граней, более подвижно, значит, огню соответствует тетраэдр, воздуху — октаэдр, а воде — икосаэдр. Отсюда же следует, что огонь легче воздуха, а воздух легче воды. Додекаэдр соответствует частицам особой, небесной субстанции — эфира.

Треугольники, из которых Платон строил частицы элементов, представляют собой как бы пластинчатые атомы. Грани тетраэдра, октаэдра и икосаэдра содержат соответственно 24, 48 и 120 прямоугольных атомарных треугольников. Поскольку землеобразные тела состоят из кубических частиц, грани которых содержат прямоугольники другого типа, эти частицы не могут участвовать в превращениях. Попыты по плавлению землеобразных тел философ объяснял тем, что кубические частицы временно распадаются под ударами проникших в промежутки между ними тетраэдров огня. Аналогично Платон рассматривал и растворение твёрдых землеобразных веществ в воде, полагая, что икосаэдры жидкости проникают в промежутки между кубическими частицами землеобразного тела и как бы размывают его.

Эти превращения настолько наглядны, что Платон даже составил первое в мире «химическое» уравнение, которое можно было бы записать так:



Такому уравнению отвечает числовое соотношение:

$$120 = 2 \cdot 48 + 24.$$

Треугольники могут быть разных размеров, составленные из них многогранники — тоже. Следовательно, в природе существует бесчисленное множество подобных многогранников. Это позволяет, например, объяснить родственные свойства огня, света и носителя теплоты — тепло-рода: при заметной разнице между ними они состоят из одинаковых по форме, но разных по размерам многогранников.

Позднее немало философов полагали это учение Платона наивным и надуманным. «Однако возможно, что до пифагорейцы и Платон вовсе не постулировали строения предметов из треугольников как нечто абсолютное.

Именно идея Платона о превращениях субстанций, вызванных преобразованием их внутренней структуры, стала теоретической основой алхимии.





Биография физики

Посейдон, Аполлон и Артемида. Барельеф восточного фриз Парфенона, Афины. Около 440 г. до н. э.

Неоплатонизм — направление античной философии III—VI вв., систематизировавшее учение Платона и соединившее его с идеями Аристотеля, Пифагора и др. В центре неоплатонизма — учение о сверхсущем, едином и иерархическом строении бытия, разработанное Плотинем (204 или 205—269 или 270) и завершённое Проклом.

Эта их процедура подобна тому, как различные астрономы строили гипотезы, основанные на твёрдом убеждении, что особенности небес не являются тем, чем они кажутся, но что можно спасти явления, если принять за основу предположение о равномерном и круговом движении небесных тел. Подобно этому, пифагорейцы... приняли за элементы тел эти геометрические формы, как наиболее отвечающие определённом принципу, как наиболее совершенные с точки зрения подобия и симметрии и притом казавшиеся им достаточными для интерпретации физических явлений», — писал неоплатоник Прокл (около 412—485). Такой стиль мышления характерен и для современных теоретиков.



ОТ ШТУРМА НЕБЕС К ЗАВОЕВАНИЮ ЗЕМЛИ

Греческие мыслители от Фалеса до Платона разработали колоссальный инструментарий мысли. Они пытались, словно в сети, поймать этот мир как единое целое, а он каждый раз ускользал от них. Платон завершил двухвековой этап теоретического штурма проблемы первоначала мира. Решить эту задачу означало перейти от веры в чудеса, характерной для варваров, к твёрдому знанию, которое могло бы стать фундаментом греческого общества. После разгрома грозных персидских царей Дария I (522—486 гг. до н. э.) и его сына Ксеркса I (486—465 гг. до н. э.) мало кто из греков сомневался в превосходстве своей культуры над всеми остальными. Казалось, нужен ещё один шаг, чтобы решить все теоретические проблемы и вслед за тем добиться политической и социальной стабильности.

Платон дальше других продвинулся в этом направлении, но его открытия уже не спасли греческое общество от катастрофы. Греки в бесчисленных междоусобных войнах,

подогревавшихся к тому же персами (не сумевшими победить греков в открытой войне), подорвали собственные силы и в конце концов потеряли независимость. Платон на целый век опоздал со своим теоретическим синтезом. За это время греки, не решив возникших внутри их мировоззрения проблем, оказались в нравственном и политическом тупике.

Платоновская философия есть страстный порыв к абсолюту, к вечному и божественному. Он до конца прошёл путь поисков умозрительной истины, объединив все сильные стороны предыдущих учений. Выше воспарить было уже некуда. Неудачу своих предшественников Платон образно называл «первой навигацией», а свою философию — «второй». Древние мореплаватели, когда наступал штиль, плыли на вёслах, это и была вторая навигация. Философские «ветра» до Платона дули в разных направлениях, в итоге корабль философов метался из стороны в сторону, не двигаясь вперёд. Платон полагал, что предложенный им «вёсельный ход» сдвинул философию с мёртвой точки. Однако результат получился удручающим: стало окончательно понятно, что целостность мира может быть выражена лишь мифологически. Правдоподобный миф — вот предел могущества человеческого разума! К этому ли стремились «любители мудрости»? Нет, они, напротив, выступали против мифологии,

Греко-персидские войны между Персией и древнегреческими городами-государствами, отстаивавшими свою независимость, продолжались с 500 по 449 г. до н. э. с перерывами и завершились победой греков. Персия лишилась своих владений в Эгейском море, на побережьях Геллеспонта (ныне Дарданеллы) и Боспора (ныне Босфор) и признала самостоятельность греческих полисов в Малой Азии.



утверждая права разума. Значит, греческий дух пришёл в платонизме к самоотрицанию.

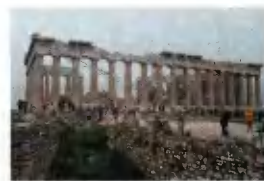
Особенно ярко это проявилось в учении о государстве. Если независимо от людей существует абсолют — высшее космическое благо, то всё должно быть направлено к нему, в том числе и государственная жизнь. Отсюда Платон вывел картину «идеального государства», очень похожего на большую казарму. У многих оно вызвало отвращение. Но главное, что проблем греческого мира утопическое реформирование полисов уже не могло решить.

Греческое общество во времена Платона было не то, что при Фалесе. Только новая победоносная и невиданная доселе война с варварами могла вывести греков из тупика. В такой ситуации платонизм как идеология устарел. Следовало не искать истину, а, наоборот, с высоты уже найденной истины взирать на мир и завоевывать его. Время требовало новой философии, ориентированной на практические действия, не на углубление, а на расширение знания. Не диалог, наполненный поисками истины, а трактат с её изложением — вот в чём теперь нуждалось греческое общество. Необходимо было «замести под ковёр» все апории, дать окончательный ответ на все накопившиеся вопросы и создать систему наук как основу жизни общества.

После Платона наука должна была двигаться в ином стратегическом направлении. Выход удалось найти самому талантливому его ученику — Аристотелю. Он отказался от взгляда на мир «сверху вниз», заменив его взглядом «снизу вверх»: не от теории к вещам, а от вещей к теории. Время чистого умозрения прошло, надо опираться на твёрдо установленные факты, ни одним из которых нельзя пренебречь. Факты — с одной стороны, логика — с другой, только их соединение может дать твёрдое знание о природе.

Платон блестяще доказал, что физика как наука невозможна (ведь правдоподобный миф и наука — разные вещи). «Платон мне друг, но истина дороже» — эти слова, по преданию, принадлежат Аристотелю — человеку, создавшему физическую науку и почти на 2 тыс. лет примирившему едва ли не всех физиков.

У Аристотеля физика заняла почётное место в едином взгляде на Космос, человека и общество. Его великий воспитанник Александр Македонский, силой объединяя греков и завоевывая ойкумену, мог предложить миру не только меч, но и нечто большее — целостное и ясное мировоззрение.



Парфенон, Афины.

Ойкумена — по представлениям древних греков, обитаемая часть суши. Она включала Европу, кроме северной её части, Малую и Переднюю Азию, Северную Африку и Индию.

ПЛАТОН. ЖИЗНЬ В СУМЕРКАХ

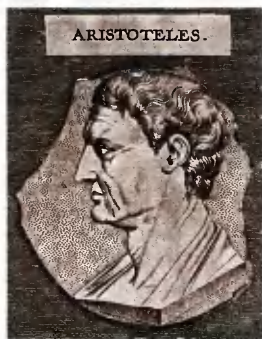
В юности Платон встретился с Сократом и стал верным учеником этого не написавшего ни строчки философа, которого прославил в своих диалогах. Для Афин, да и для всей Греции, то было тяжёлое время Пелопоннесской братоубийственной войны (431—404 гг. до н. э.). Тянувшаяся больше 20 лет, она окончилась поражением афинского флота у устья той самой реки Эгоспотамы, возле которой за 62 года до этого, во времена Анаксагора, упал знаменитый метеорит. После капитуляции Афин спартанцы упразднили там демократию и привели к власти правительство «тридцати тиранов» во главе с Критием, одним из учеников Сократа. Вскоре после гражданской войны демократию восстановили, но тень Крития пала на Сократа: спустя пять лет он был обвинён в неояльности к авторитету богов и казнён.

Потрясённый смертью учителя, Платон надолго покинул Афины. В Южной Италии он подружился с пифагорейцем Архитом Тарентским (около 428—365 до н. э.), известным математиком и астрономом, который несколько раз избирался правителем Тарента. Есть сведения, что Платон посетил также престарелого Филолая и приобрёл его книги (поэтому весьма вероятно, что ученик Платона Аристотель их знал). В конце своих путешествий 40-летний Платон оказался при дворе правителя Сиракуз Дионисия Старшего. Чем-то он прогневил тирана, и тот приказал отвезти философа на остров Эгину. На Эгине, воевавшей в то время с Афинами, был принят закон обращаться в рабство любого афинянина, ступившего на их землю. Но Платон уже был достаточно известен, один из его почитателей выкупил философа и отпустил на волю. Афинские друзья также собрали нужную для выкупа сумму и отдали её Платону. На эти деньги приобрели участок в пригороде Афин, где Платон основал свою знаменитую школу. Место это в честь героя Академа называлось Академией. Так же стала именоваться и школа.

Платон ещё дважды посещал Сиракузы, куда его настойчиво приглашал Дионисий Младший, сменивший умершего Дионисия Старшего. Но оба раза дело кончалось ссорами и преследованиями, причём в последнее посещение 60-летнего философа спас от расправы Архит.



АРИСТОТЕЛЬ СТАГИРИТ



Аристотель.
Гравюра. XVII в.

Учёный, идеи которого определяли направление развития всей европейской науки от античности до Нового времени, — Аристотель (384—322 до н. э.) родился в городе Стагире, недалеко от границы с Македонией. Согласно преданию, род философа вёл начало от сына Аполлона бога Асклепия — покровителя медицины, и искусство врачевания передавалось в их семье из поколения в поколение. Гомер упоминает в «Илиаде» прадеда Аристотеля — Махаона, считавшегося самым хорошим врачом в греческом войске. (Он исцелил афинского царя Менелая, раненного троянцами.) Отец Аристотеля Никомах был одним из лучших медиков своего времени, другом и придворным лекарем македонского царя Аминты III. Аристотель тоже считался неплохим врачом, однако его достижения в других науках гораздо более значительны. Создатель новой системы познания, которая впервые опиралась не только на мышление, но и на опыт, он разработал правила научного мышления и его категории, методы исследования и доказательства. Философ охватил всё множество знаний, накопленных к этому време-

ни человечеством, преломив их во множество новых наук, включая физику. Считается, что Аристотель первым составил и каталог книг своей огромной библиотеки.

ЮНОСТЬ

Детство Аристотеля прошло при дворе Аминты III; он дружил с сыном царя Филиппом — будущим основателем Македонской империи и отцом Александра Великого. Здесь Аристотель и приобрёл аристократические привычки, которые сохранил на всю жизнь. Обладая не очень привлекательной внешностью (он был небольшого роста, сухощав, близорук и шепелявил), философ очень следил за собой: всегда безукоризненно одевался, имел роскошную причёску и носил на пальцах перстни. Проще говоря, был щёголем.

Вероятно, именно отец, желая, чтобы сын унаследовал престижную должность придворного лекаря, дал ему первые уроки врачевания и естествознания. Никомах умер, когда Аристотелю исполнилось 15 лет; опекуном молодого человека стал его родственник Проксен, прибывший для этого в Стагиру из Мизии. Будущий философ унаследовал от отца значительное состояние и, возможно, большую библиотеку, благодаря чему мог постоянно развивать свои способности. Рукописи стоили тогда больших денег, но Проксен покупал юноше самые дорогие сочинения, не считаясь с ценой. Таким образом, Аристотель ещё в молодости привык много читать, что было в то время большой редкостью.

В возрасте 17 лет Аристотель отправился в Афины продолжать образование. Несмотря на то что пик расцвета города уже миновал и слабеющая демократия Атики уступала

■ Атика — в древности область на юго-востоке Средней Греции.





грубой силе полуварварской македонской монархии, Афины по-прежнему по праву считались научным и культурным центром Греции. Здесь, в общественном саду, украшенном статуями и храмами, располагалась знаменитая афинская Академия — первая в мире философская школа, основанная Платоном. Своего будущего учителя молодой человек в Афинах не застал, поскольку тот путешествовал по Египту, Италии, Сицилии и Кирене. На посту главы Академии его замещал Евдокс Книдский (около 408 — около 355 до н. э.). Но Аристотель нашёл в Афинах немало учеников философа и к приезду Платона был уже хорошо знаком с основными положениями его учения.

АРИСТОТЕЛЬ И ПЛАТОН

Благодаря своему таланту Аристотель быстро стал самым блестящим воспитанником афинской Академии. Платон говорил: «Аристотель — душа моей школы». Сравнивая его с любимым учеником Ксенократом, глава Академии любил повторять: «Одному нужна узда, а другому шпоры», намекая на то, что способности Аристотеля и его стремление к знанию столь велики, что юношу необходимо сдерживать. По-видимому, рано развившемуся таланту быстро стало тесно в рамках учения даже такого гения, как Платон, и Аристотель начал создавать свою философскую концепцию. Часто его взгляды не совпадали со взглядами учителя и, конечно, два гения неоднократно горячо спорили между собой. Платону приписывают следующее изречение: «Аристотель меня брыкает, как сосунок-жеребёнок свою мать». Это породило слухи о сильной вражде между самыми великими философами Древнего мира, но маловероятно, что они когда-либо опускались до взаимных оскорблений. Несмотря на то что в сочинениях Аристотель часто

полемизирует со своим учителем, о личности Платона великий Стагирит отзывался всегда с большим уважением. Например, в диалоге «Эвдем, или О душе» Аристотель говорит, имея в виду Платона: «Дурной человек даже не имеет права говорить о нём».

Работы Аристотеля, созданные во время пребывания в Академии, стали широко известны и принесли ему заслуженное уважение наиболее просвещённых современников. Так, римский писатель Авл Геллий (около 130—?) в сочинении «Аттические ночи» приводит текст письма, посланного философу царём Филиппом II после рождения его сына Александра: «Филипп шлёт привет Аристотелю. Знай, у меня родился сын. Я, конечно же, благодарен богам, не столько за то, что он родился, сколько за то, что его появление на свет пришлось на твою жизнь. Ведь я надеюсь, что, воспитанный и обученный тобой, он станет достойным и нас, и того, чтобы принять на себя наши дела».

Удивительно, что царь Македонии, считавшейся в Греции варварским государством, где традиционно больше почиталось воинское искусство, а не философия, смог по достоинству оценить гений Аристотеля. В то же время в Афинах, которые были центром культуры и науки Северного Средиземноморья, учёный не смог даже получить гражданства и до конца считался «метеком» — иноземцем, не имеющим права принимать участия в политической жизни города.

В афинской Академии Аристотель провёл 20 лет, вплоть до смерти своего учителя. Затем Академию возглавил Спевсипп, о котором Диоген Лаэртский писал следующее: «Платоновых догм он придерживался твёрдо, но нрав у него был иной — склонный к гневу и падкий на удовольствие». Помимо этого Спевсипп, в отличие от своего наставника и родственника Платона, стал брать деньги за обучение. Видимо, Аристотель, к тому моменту разочаровавшийся



Аристотель.
Гравюра. XVI в.



Тирани (в Древней Греции и в некоторых средневековых государствах Италии) — человек, насильственно захвативший власть.

в философии Платона, не захотел оставаться в Академии, совершенно справедливо полагая, что её новый руководитель не обладает ни мудростью, ни талантом их общего учителя. Вместе с Ксенократом философ уехал к своему родственнику, бывшему ученику Платона Гермия — тирану города Атарней, греческой колонии на побережье Малой Азии.

Здесь Аристотель женился на племяннице Гермия Пифиаде, родившей ему дочь. Однако Пифиада рано умерла, и позднее он женился вторично — на своей наложнице Герпиллиде. Она родила сына, которого Аристотель назвал в честь своего отца Никомахом.

Трёхлетнее пребывание Аристотеля при дворе правителя Атарней закончилось неожиданно и трагично. В 345 г. до н. э. Гермий был обманом захвачен и вскоре казнён по приказу царя Персии Артаксеркса III. Город быстро заняли персы, и философам пришлось спасаться бегством.

Ксенократ вернулся в Афины, где стал главой Академии после Спевсиппа, а Аристотель поселился у своего самого известного ученика Теофраста, на острове Лесбос, в городе Митилена.

АРИСТОТЕЛЬ И АЛЕКСАНДР

Вскоре после бегства из Атарней, в 343 г. до н. э., философ получил приглашение от царя Филиппа II стать учителем Александра, которому исполнилось 13 лет. Историк Плутарх в «Сравнительных жизнеописаниях» рассказывает, что в благодарность за обучение своего сына Филипп возстановил разрушенный им в войне с Афинами родной город Аристотеля Стагиру и вернул туда бежавших или попавших в рабство стагиритян.

Для занятий и бесед царь Филипп отвёл Аристотелю и Александру посвящённую нимфам рощу около македонского селения Миезы. По словам Плутарха, Александр усвоил не только учение о нравственности и государстве, но и более глубокие, тайные знания, называемые философами «устными», или «скрытыми». Через много лет, находясь в Азии, Александр узнал, что Аристотель некоторые из этих учений опубликовал в книгах, и написал ему следующее письмо: «Александр Аристотелю желает благополучия. Ты поступил неправильно, обнаруживая учения, предназначенные только для устного преподавания. Чем же будем мы отличаться от остальных людей, если те самые учения, на которых мы были воспитаны, сделаются общим достоянием? Я хотел бы превосходить других не столько могуществом, сколько знаниями о высших предметах. Будь здоров».

Несомненно, Аристотель оказал огромное влияние на личность молодого Александра. Этому способствовало и то, что будущий царь никогда не проявлял большого интереса к спортивным и военным упражнениям, предпочитая им изучение философии и литературы. Например, список «Илиады» Гомера, исправленный философом и известный под названием «Илиада из шкатулки», он всегда имел при себе и хранил под подушкой вместе с кинжалом. Вероятно,

АРИСТОТЕЛЬ ОТВЕЧАЕТ НА ВОПРОСЫ

- Какой прок людям лгать?
- *Тот, что им не поверят, даже когда они скажут правду.*
- Зачем ты подаёшь милостыню человеку дурного нрава?
- *Я подаю не нраву, а человеку.*
- Что быстро стареет?
- *Благодарность.*
- Что такое надежда?
- *Сон наяву.*
- Что есть воспитание?
- *В счастье — украшение, в несчастье — прибежище.*
- Что есть друг?
- *Одна душа в двух телах.*
- В чём польза от философии?
- *Став философом, начинаешь делать добровольно то, что другие делают в страхе перед законом.*
- Как ученикам преуспеть?
- *Догонять тех, кто впереди, и не ждать тех, кто позади.*

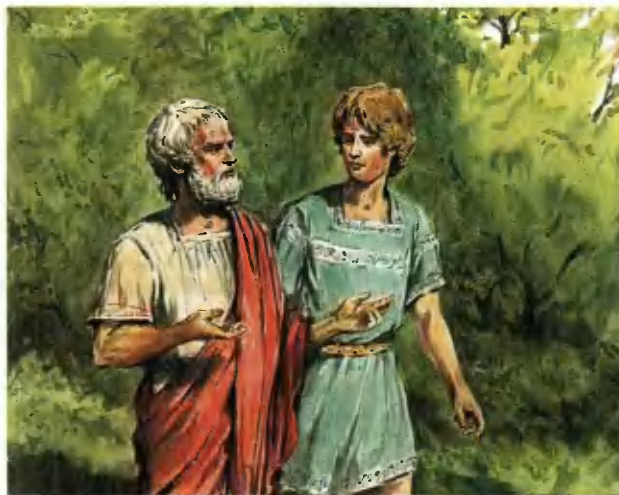


именно Аристотель привил юноше любовь к медицине — Александр считался неплохим врачом и в походах часто давал своим офицерам медицинские советы.

Вскоре Аристотелю пришлось прервать воспитание царственного подопечного: Филипп II, постоянно находясь в военных походах, не мог эффективно управлять Македонией и Александру пришлось фактически заменить отца на троне. Но Аристотель ещё на протяжении четырёх лет находился при молодом правителе, который относился к нему с большим уважением и по-царски отблагодарил своего учителя. Римский писатель и учёный Плиний Старший (23 или 24—79) писал, что, когда Александр стал царём, он выделил в помощь учёному несколько тысяч человек. Вероятно, эти люди отлавливали животных в завоёванных Александром странах, изучали и описывали их. Собранные ими сведения легли в основу знаменитых трактатов Аристотеля «История животных» и «О частях животных».

Не исключено, что Аристотель не только получал материалы через своего родственника Каллисфена, но и сам участвовал в походе Александра в Индию — описание внешнего и внутреннего строения индийского слона выполнено с таким блеском и точностью, что могло принадлежать только самому Аристотелю. Позднее царь Македонии предложил философу астрономическую по тем временам сумму в 800 талантов для покрытия издержек по созданию «Истории животных». В этой работе Аристотель предложил классификацию животных, которая была общепринятой в европейской науке вплоть до XVIII в., когда шведский естествоиспытатель Карл Линней создал свою систему.

В 335 г. до н. э. Аристотель возвратился в Афины; Александру в качестве наставника философ порекомендовал своего родственника



Аристотель и Александр.

Каллисфена. Но вскоре отношения последнего с царём резко ухудшились. После того как сравняли с землёй один из крупнейших греческих городов Фивы и его жителей продали в рабство, а Афины сдались на милость победителя, вся Греция оказалась под властью молодого монарха. Каллисфен не скрывал своего отрицательного отношения к переменам в характере Александра, который всё больше походил на восточного деспота. Он стал заносчивым, не терпел возражений и легко впадал в ярость.





Александр Македонский. Изображение на серебряном тетрадрахме, выпущенном в Александрии Птолемеем I. 305 г. до н. э.

Придворные же привыкли к традиционным для варварской Македонии простым отношениям между монархом и его ближайшим окружением.

Участь Каллисфена была решена, когда он сказал, что победы Александра вызваны не доблестью его армии, а враждой между греческими городами, добавив: «Часто при расприх почёт достаётся вудел негодяю». Аристотель в отчаянии написал своему неосторожному родственнику: «Скоро умрёшь ты, о сын мой, судя по тому, что вещаешь». Каллисфена обвинили в участии в заговоре против Александра и казнили, а отношения монарха с его великим учителем прекратились окончательно. Известно, что царь Македонии неоднократно презрительно отзывался о философе. Аристотель платил ему тем же. Существует даже легенда, согласно которой Александр Великий был отравлен своим полководцем Антипатром, якобы давшим ему яд по совету Аристотеля.

НОВАЯ ШКОЛА

Вернувшись в Афины, Аристотель не примкнул к Академии, возглавляемой тогда Ксенократом. Заявив: «Позор молчать, коль Ксенократ болтает!», он основал свою философскую школу (335 г. до н. э.) и разместил её в противоположном от Академии конце города, в роще, посвящённой Аполлону Ликейскому. Отсюда и название школы — Ликей.

Здесь возникла знаменитая школа перипатетиков, вскоре ставшая одной из самых влиятельных философских школ Средиземноморья. Название «перипатетики» происходит от греческого «перипатетикос», что означает «прогуливающийся». Известно, что Аристотель имел привычку преподавать, прогуливаясь по двору Ликея. Существовала также другая легенда: в Македонии философ, заботясь о

здоровье Александра, ещё не окрепшего после болезни, не позволял ему много сидеть и давал уроки, гуляя со своим воспитанником вне стен дворца.

Аристотель систематизировал философские знания, разделив их на практические (этика, политика, риторика, экономика, поэтика) и теоретические (математика, физика, метафизика). Лекции, которые Аристотель читал своим многочисленным ученикам, также делились на два вида: научные (эзотерические) и популярные (акроматические). Первые, предназначенные для образованных учеников, проводились утром; вторые, для широкого круга слушателей, — после обеда.

В 323 г. до н. э. умер Александр Великий. Это событие оказалось роковым для Аристотеля, имя которого было неразрывно связано с македонским царским двором. Сторонники антимакедонской партии начали преследовать философа и вскоре привлекли его к суду за безбожие. Официальным предлогом стал гимн, посвящённый им покойному Гермия и своей первой жене Пифиаде. Аристотеля обвинили в том, что он воздавал им почести, положенные только Аполлону и богине плодородия Деметре. Философ, понимая, что процесс не будет справедливым, бежал в Халкиду на острове Эвбея, на родину своей матери. Позже, намекая на казнь Сократа по приговору афинского суда, он говорил: «Я не хочу, чтоб афиняне совершили ещё одно преступление против философии».

Через год, в Халкиде, в возрасте 62 лет, в окружении родственников и многочисленных учеников, один из самых великих учёных Древнего мира умер от болезни желудка, мучившей его всю жизнь. Школу перипатетиков возглавил любимый ученик Аристотеля Теофраст.

Из дошедшего до нас завещания философа видно, что он очень тепло относился к родственникам и



Александр Македонский. Изображение на монете. Эллинистический период.



друзьям: Аристотель проявил заботу обо всех без исключения членах своей большой семьи. Будучи сторонником рабства, он тем не менее призывал к мягкому обращению с рабами. Некоторых собственных слуг и рабов философ приказал после своей смерти освободить, щедро наградив.

СУДЬБА НАУЧНОГО НАСЛЕДИЯ АРИСТОТЕЛЯ

По свидетельству Диогена Лаэртского, стилё (греч. «палочка для писания на наощённых досках у древних греков») Аристотеля принадлежит около 350 сочинений и 14 книг писем к Александру Великому, Филиппу II, Антипатру, философу Демокриту и др. В своих трудах Аристотель рассматривал самые разнообразные вопросы естествознания и культуры: от политики до медицины, от метеорологии до поэзии. Из них до наших дней дошло около одной четверти; ранние работы Аристотеля, созданные в платоновской Академии, не сохранились совсем.

Аристотель был блестящим и язвительным оратором, спорить с которым противники боялись. Риторический талант Аристотеля отразился в его трудах. Цицерон, славившийся своим красноречием, характеризует слог философа, говорил: «Река, текущая чистым золотом».

Трудно назвать другого учёного, чьё творчество оказало такое влияние на мировую науку и культуру. Идеи Аристотеля, сильно искажённые различными комментаторами и превращённые сначала перипатетиками, а потом и европейским духовенством в мёртвые догмы, почти на два тысячелетия определили развитие естествознания в Европе и арабском мире. Впоследствии его учение подвергли жёсткой критике, возможно не всегда обоснованной. Например, известный английский философ Фрэнсис Бэкон (1561—1626) говорил: «Философия



Аристотеля уничтожила полемическими опровержениями остальные философии, наподобие того, как постопают оттоманские султаны со своими братьями», а также: «В физике Аристотеля нет ничего, кроме звучания диалектических слов». И это далеко не самые грубые слова, которые были сказаны в его адрес.

Впрочем, подобная история в той или иной степени повторялась практически со всеми великими учёными, не исключая Ньютона и Эйнштейна. Но, по-видимому, никого так яростно не защищали и так же яростно не ругали, как великого Стагирита, что, безусловно, является ярким свидетельством огромного влияния древнегреческого философа на всю мировую научную мысль. Не подлежит сомнению тот факт, что, если бы не было Аристотеля, наука вообще и физика в частности выглядели бы сейчас по-другому. Лучше или хуже? Вероятно, этот вопрос навсегда останется открытым.

Трактат Аристотеля «О физике». На полях — рукописные пометки на древнегреческом и латинском языках. Лион, Франция. 1557 г.

Антипатр — военачальник Александра Македонского.



ПЕРВАЯ ФИЗИЧЕСКАЯ КАРТИНА МИРА

Ко времени Аристотеля накопилось множество спорных решений важных мировоззренческих проблем и не было общепринятой картины мира. Существует ли пустота и бесконечна ли Вселенная, как утверждали атомисты — сторонники учения Левкиппа и Демокрита? Прав ли был пифагорец Филолай, считавший, что Земля движется? Вечно ли существовал Космос, или он когда-то возник, как полагали Фалес и Платон? Допустимо ли объяснить природу на основе противоречия вслед за Гераклитом Эфесским? Вращается ли Земля вокруг своей оси, как утверждал Гераклд Понтийский? Являются ли чувственно воспринимаемые вещи лишь тенями идеальных сущностей — идей (эйдосов), как учил Платон, или отдельного от вещей царства идей нет?

Эти и многие другие вопросы бурно обсуждались, но длительные споры не приводили к согласию. Предстояло прежде всего разобраться в том, как вообще возникает знание, что такое наука и каковы её задачи, в чём заключаются причины изменений и неизменности вещей, каковы цели познания. Эти важнейшие для философии и науки проблемы требовали комплексного, уни-

версального решения. Именно за них и взялся Аристотель, вошедший в историю мировой науки и культуры как самый универсальный мыслитель.

Он поставил перед собой цель разобраться с позиций здравого смысла в хаосе разноречивых мнений, в огромном беспорядочном ворохе противоречий, который представляла собой к этому времени античная наука. И надо признать, в его эпоху не существовало ни одного факта, которому бы он не дал научного объяснения. Однако, как это ни парадоксально, нет почти ни одного суждения Аристотеля, которое впоследствии не было бы опровергнуто или оспорено.

АРИСТОТЕЛЕВСКАЯ ФИЗИКА: ЗА И ПРОТИВ

Французский писатель и учёный-популяризатор Бернар Ле Бовье Фонтенель, один из тех, кто подготавливал эпоху Просвещения, в 1686 г. писал: «Ничто так сильно не задерживает прогресс, ничто так страшно не ограничивает умы, как излишнее поклонение древности. Поскольку последующие поколения посвятили себя культу Аристотеля и искали истину исключительно в его загадочных писаниях, а ни в коем случае не в природе, то не только философия не получила никакого развития, но, более того, она погрязла в трясине галиматии и непостижимых идей, вытянуть её из которой стоило миру глобальных усилий. Аристотель никогда не был истинным философом, но он подавил многих тех, кто стал бы истинным философом, если бы им это было дозволено. Беда в том, что если такого рода фантазии однажды получают право на существование среди людей, то это надолго; пока умы освобождаются от них, проходят века,



Сократ не советовал заниматься изучением небесных явлений, пытаясь уяснить, как божество производит каждое из них. Этого, думал Сократ, людям не удастся постичь никогда. Тот же, кто занят подобными изысканиями, рискует сойти с ума.



даже после того, как все признают их смешотворность».

Такое отношение к Аристотелю и его учению о природе стало в эпоху Просвещения общепринятым. В учебниках физики XIX—XX вв. об Аристотеле упоминают, как правило, лишь для того, чтобы на его ошибках быстрее научить основным принципам механики Галилея — Ньютона.

И действительно, как современный человек может воспринимать, например, следующие утверждения Аристотеля: воздух помогает движению камня, брошенного под углом к горизонту; более тяжёлые тела всегда падают быстрее менее тяжёлых; равномерное прямолинейное движение тела невозможно без приложенной к нему внешней силы; верхние слои воздуха могут сгущаться и от этого воспламеняться так, что кажется, будто падают звёзды... Да была ли вообще в физике Аристотеля хоть одна верная мысль?

Не случайно многие современные учёные и историки науки считают Аристотеля лишь крёстным отцом физики (именно он ввёл в употребление сам термин «физика»), но не её основателем. В трактатах мыслителя «Физика», «О небе», «О возникновении и уничтожении», «Метеорологика» сделаны порой слишком смелые обобщения, которые науке,

может быть, вообще не под силу, ибо они не имеют под собой достаточного количества опытных фактов. (Галилей, например, полагал, что «человеческая наука никогда не решит, конечна ли Вселенная или бесконечна».) Эти обобщения необходимы были Аристотелю для создания законченной картины мира, что является характерной чертой натуральной философии, а не физики.

С точки зрения задач, решаемых наукой Нового времени, физика Аристотеля выглядит совершенно беспомощной, бесполезной и наивной. В ней обнаруживается столько нелепостей, что может показаться непонятным, как Аристотеля на протяжении столетий могли считать величайшим авторитетом в науке о природе. Однако начало физике как науке, возникающей из тщательных наблюдений и строгих рассуждений, было положено именно Аристотелем. Ему глубоко претили фантазии философов, их легковесные суждения, приводящие познание в тупик из-за невозможности отличить истину от лжи. Он стал первым, кто твердо решил не пренебрегать фактами наблюдений и логикой, добиться их гармоничного сочетания, в котором должны проступить черты божественности Космоса. Спустя 17 столетий Ньютон черпал вдохновение из этого же источника — стремления постичь божественную сущность мироздания. «Лишь тогда, — отмечал Аристотель, — когда имеется достаточное число наблюдений небесных явлений, можно найти доказательства в учении о небесных светилах. Равным образом обстоит дело и во всяком другом искусстве и науке». Своих оппонентов Аристотель часто «бьёт» указанием на факты, не вписывающиеся в их теории: «Те, кто лучше знает природные явления, скорее могут делать предположения о первоначалах, позволяющих связать вместе многое. Напротив, те, кто

Галилео Галилей писал: «Я не говорю, что не следует слушать Аристотеля, наоборот, я хвалю тех, кто всматривается в него и прилежно его изучает. Я порицаю только склонность настолько отдаваться во власть Аристотеля, чтобы вслепую подписываться под каждым его словом».



В ЧЁМ ЗАКЛЮЧАЕТСЯ ЗАДАЧА НАУКИ?

«Удивление побуждает людей философствовать, — писал Аристотель. — Все люди от природы стремятся к знанию», причём «к знанию стали стремиться ради понимания, а не ради какой-нибудь пользы».

Высшее знание есть мудрость. Ею может обладать только Бог, человеку же дано лишь стремление к мудрости, в этом его предназначение и этим он отличается от животных. Природа человека такова, что он может быть скорее любителем мудрости — философом (от греч. «филео» — «люблю» и «софия» — «мудрость»), чем истинным мудрецом. «Я знаю, что я ничего не знаю», — сказал Сократ. И продолжил: «Но я хочу знать».

По Аристотелю, подлинная мудрость — ценность сама по себе. Поэтому те знания, которые не являются целью, а служат средством для извлечения выгоды, не могут быть подлинной мудростью. Выходит, что там, где появляется польза, заканчивается божественная наука. Высшее знание и польза — «две вещи несовместные».

И хотя наука действительно начинается с удивления, её цель — избавление от незнания, а значит, и от удивления. Тот, кто вступил на путь познания, шаг за шагом приближается к подлинному умиротворению — спокойному и возвышенному созерцанию мировой гармонии.

Удивление было началом познания и для основоположников новой европейской философии Фрэнсиса Бэкона

и Рене Декарта. Однако они поставили перед наукой совершенно иные цели. Главная из них — власть над природой, её подчинение человеку, превращение колоссальных сил, тающихся в ней, в покорных слуг, работающих на удовлетворение потребностей людей. Именно практическая польза стала критерием доступной человеку истины. Природа предстала не более чем гигантским механизмом, которым следует научиться управлять. Учёный может и не знать истинного устройства мира, главное для него — совпадение теоретической модели с данными наблюдений, тогда теорию можно положить в основание прикладных исследований. Так, знаменитый философ-энциклопедист XVIII в. Дени Дидро писал: «Мы не знаем почти ничего... всё определяется полезностью».

Аристотель, напротив, задачу научного исследования видел в возможности наслаждаться созерцанием божественного совершенства мироустройства, а совсем не в том, чтобы использовать знание о природных явлениях для развития техники. Именно созерцательная деятельность интеллекта как высшая способность человека позволяет ему уподобиться божеству.

Поэтому совершенно бессмысленно упрекать физику Аристотеля в неспособности решать те задачи, которые она перед собой не ставила. Ведь и Аристотелю достижения новоевропейской науки показались бы столь же малоценными и «ненаучными», сколь ненаучными представлялись его идеи Бэкону и Декарту.

Однако в Новое время и позднее находились мыслители, не разделявшие механистическое мировоззрение. Знаменитый поэт XIX столетия Фёдор Иванович Тютчев всегда отстаивал близкий к аристотелевскому взгляд на мир:

*Не то, что мните вы, природа:
Не слепок, не бездушный лик —
В ней есть душа, в ней есть свобода,
В ней есть любовь, в ней есть язык...*



А уже в XX в. философ Алексей Фёдорович Лосев писал: «Механика Ньютона построена на гипотезе однородного и бесконечного пространства. Мир не имеет границ, т. е. не имеет формы. Для меня это значит, что он — бесформен. Мир — абсолютно однородное пространство. Для меня это значит, что он — абсолютно плоскостен, невыразителен, нерельефен. Неимоверной скукой веет от такого мира. Прибавьте к этому абсолютную темноту и нечеловеческий холод межпланетных пространств... Читая учебник астрономии, чувствую, что кто-то палкой выгоняет меня из собственного дома и ещё готов плюнуть в физиономию. А за что?».

Строго говоря, претензии Лосева обращены не к Ньютону, а к его последователям. В XIX в. ньютоновская механика была истолкована в механистическом духе, близком к картезианскому (латинизированное написание фамилии Декарта — Картезий). Характерны в этом отношении слова французского физика, астронома и математика Пьера Симона Лапласа, сказанные им Наполеону Бонапарту: «При построении системы мира я не нуждался в гипотезе о существовании Бога». Тогда как сам Ньютон, изучая природу, желал прежде всего постичь Божественное провидение. Не случайно он называл свою науку не физикой, а натуральной философией. Физика Аристотеля — тоже натуральная философия, или философия природы, а не просто одна из естественных наук.





дения Аристотеля, высказанные им из-за недостатка опытных данных лишь предположительно, в дальнейшем были «канонизированы» — последователи великих учёных нередко бывают более категоричны в суждениях, нежели их учителя. Сам же Аристотель писал: «Коль скоро речь идёт о явлениях, не доступных чувственному восприятию, доказательство можно считать достаточно обоснованным, если мы возведём их к возможным причинам».

Аристотель, наконец, изобрёл и основной жанр научного творчества — трактат. До него традиционными формами философского произведения были поэма и диалог. И в наше время научные труды по структуре напоминают аристотелевские. Сначала Аристотель ставит проблему, о которой собирается говорить. Затем, приступая к её рассмотрению, разбирает мнения по данной теме своих предшественников и современников, детально анализируя их достоинства и недостатки (в основном недостатки, потому

чрезмерно предаётся пространным рассуждениям и не наблюдает за тем, что присуще вещам, легко обнаруживают узость своих взглядов».

Например, исследуя лунные затмения, Аристотель получает важное подтверждение идее о шарообразности Земли: тень, падающая от неё на Луну, всегда имеет круглый край, а ведь только шар во всех положениях отбрасывает круглую тень. «Наблюдение звёзд, — пишет Аристотель, — с очевидностью доказывает не только то, что Земля круглая, но и то, что она небольшого размера. Стоит нам немного переместиться к югу или к северу, как горизонт явственно становится другим: картина звёздного неба над головой значительно меняется, и при переезде на север или на юг видны не одни и те же звёзды... Таким образом, из этого ясно не только то, что Земля круглой формы, но и то, что она небольшой шар: иначе мы не замечали бы [указанных изменений] столь быстро в результате столь незначительного перемещения».

Стремясь искать всему веские основания в опыте и логике, а не фантазировать, Аристотель тем самым заложил традицию, которой позднее следовал и Ньютон, избравший своим девизом изречение «Гипотез не измышляю». Однако многие суж-





что достоинств во мнениях философов прошлого и своих современников Аристотель находит немного). И только сделав, как мы сказали бы сегодня, литературный обзор, излагает собственное суждение о поставленной проблеме.

ЧТО ТАКОЕ ПРИРОДА?

Многие философы до Аристотеля создавали поэтические и прозаические произведения под традиционным названием «О природе». Но единого взгляда на мир не существовало. Чтобы установить истинную природу вещей, требовалось создать науку, которая, опираясь в первую очередь на логику и наблюдения, занялась бы изучением вопроса о том, что такое природа вообще, и отсюда выводила бы её частные проявления. Аристотель взялся разработать новый, более совершенный метод, который позволил бы прийти к согласию по принципиальным вопросам.

Науку о природе он назвал физикой (от *греч.* «физис» — «природа»). И естественно, первый вопрос, на который философ попытался найти ответ: что же такое природа? Если знание природы предполагает понимание причин происходящего, следовательно, природа вещей — то, что отвечает на вопрос, почему какое-либо явление протекает именно так,

а не иначе. Природа вещи — её сущность, то, что делает данную вещь именно тем, чем она является. По-другому сущность вещи можно назвать её понятием, идеей (древние греки говорили «эйдос», а римляне — «форма»). Природа не просто то, что нас окружает, что нам дано в чувственном опыте. Она не лежит на поверхности явлений, а скрыта в чувственно данных вещах. Распознать её с помощью наблюдений и строгих рассуждений и есть задача физики.

Познать природу, по Аристотелю, — значит проникнуть умственным взором за кулисы той сцены, где разыгрываются все явления, понять ненаблюдаемые, скрытые умопостигаемые сущности — причины.

Аристотель выделил четыре вида причин: материальную, формальную, производящую (или движущую) и целевую (или конечную). «Причина в одном смысле обозначает входящий в состав вещи материал, из которого вещь возникает, — каковы, например, медь для статуи и серебро для чаши... В другом смысле так называется форма и образец, иначе говоря — понятие сути бытия и более общие роды этого понятия... Далее, причина — это источник, откуда берёт первое своё начало изменение или успокоение: так, например, человек, давший совет, является причиной, и отец есть причина ребёнка, и вообще то, что делает, есть причина того, что делается, и то, что изменяет, — причина того, что изменяется. Кроме того, о причине говорится в смысле цели; а цель — это то, ради чего, — например, цель гулянья — здоровье. В самом деле, почему человек гуляет, говорим мы. Чтобы быть здоровым. И сказавши так, мы считаем, что указали причину».

Первые две причины в основном характеризуют неизменное состояние вещи, а две другие — процесс её возникновения. Для новоевропейской физики объяснение явлений через целевые (конечные) причины





оказалось неприемлемым, и в этом состоит одно из важнейших её отличий от физики Аристотеля. Но разве для того, чтобы появился дом, не важна цель его строительства? И не подведёт рано или поздно нас вопрос, почему мир устроен так, а не иначе, к вопросу, зачем он был создан именно таким? Физика Нового времени, в основе которой лежит гелиоцентрическая система мира, могла принимать подобного рода рассуждения, только когда речь шла о вещах, созданных человеком, а не оприродных объектах и явлениях.

Вот как действуют все четыре аристотелевские причины в случае, например, падения камня. Материальная причина камня — это то, из чего он состоит. В конечном счёте он состоит из первой материи, не обладающей никакими свойствами. Формальная причина камня — это определённый набор характеристик, которые делают его именно данным камнем, а не куском дерева или железа. В дереве, например, смешаны два элемента (земля и огонь), на которые оно, по мнению Аристотеля, и разлагается при горении. В камне же содержится только элемент земли, которому свойственно стремление занять центральное положение во Вселенной. Вот почему оказавшийся в неестественном для себя месте (например, в воздухе) камень будет стремиться вернуть всю полноту собственной формы, т. е. возвратиться в своё, установленное природой место. В этом заключается целевая причина падения камня. А обрести завершенность формы (упасть) ему помогает вся Вселенная — именно она сообщает камню информацию о нарушении естественного порядка вещей и способствует его исправлению. Такова производящая причина.

Поскольку падение камня происходит без видимой посторонней помощи, то источник этого движения находится в самой природе мироустройства. Значит, падение камня

происходит по природе, или естественно.

Вывод о том, что движение камня вниз — естественное, не вытекает лишь из наблюдений. Требуется теоретический анализ движения и его природы. Именно в этом и заключается задача физики: отталкиваясь от наблюдений, дойти до знания того, что происходит по природе, а что — против природы, и найти всему разумное основание. По природе, или естественно, движутся те тела, для которых источник движения находится в них самих, их не толкают и не тянут другие предметы. Естественное движение само по себе направлено к определённой цели, подчиняется конечной причине. Если же источник движения тела находится вовне, такое движение будет насильственным. Любое тело, насильственно приведённое в движение, обязательно стремится к своему естественному движению, которое в данном случае нарушено.

Задача физики — изучать только естественные движения. Огромное количество насильственных движений не являются в физике Аристотеля предметом исследования. Во-первых, потому, что физика есть наука именно о природе вещей. Во-вторых, потому, что причиной любого насильственного движения всегда в конце





Трактат Аристотеля
«Метеорология».
Текст на греческом
и латинском языках.
1585 г.

ЗНАЛ ЛИ АРИСТОТЕЛЬ О ПРИНЦИПЕ ИНЕРЦИИ?

Из того умозрительного факта, что в пустом пространстве первоначально покоящееся тело не может прийти в движение, не следует, что тело в пустоте вообще не будет двигаться, если его, скажем, толкнуть. Рассматривая мысленно движение тела в пустоте, если бы она существовала, Аристотель пишет: «Никто не сможет сказать, почему тело, приведенное в движение, где-нибудь остановится, ибо почему оно скорее остановится здесь, а не там? Следовательно, ему необходимо или покоиться, или бесконечно двигаться, если только не помешает что-нибудь более сильное». Другими словами, в бесконечном пустом пространстве тело вечно двигалось бы прямолинейно и равномерно.

Однако неверно утверждать, что уже тогда, в IV в. до н. э., был выдвинут принцип инерции (известен как первый закон механики, опубликованный Ньютоном в 1687 г.). Этот принцип — плод механического мировоззрения, которое «изымает» из вещей причину изменения своего состояния покоя (или движения), лишает вещи способности самостоятельно начать движение, делает их инертными. Высказывание Аристотеля надо понимать просто как применение к данным условиям принципа достаточного основания: может происходить только то, что чем-то выделяется из всех остальных вариантов и не имеет равнозначной альтернативы. Если же тело при движении остаётся самим собой, т. е. в момент толчка к нему не добавляется ничего телесного, количество которого уменьшалось бы при движении, то нет никакого основания полагать, что одна точка траектории тела в пустом пространстве предпочтительнее другой, в которой оно могло бы остановиться. А потому тело, приведенное в пустоте в движение, никогда не остановится.

Однако это ещё не принцип инерции. В самом деле, главное содержание первого закона Ньютона заключается в том, что единственной причиной ускорения тела является внешняя приложенная к нему сила. Отсюда следует то, с чем мог согласиться и Аристотель: в пустоте (где не может быть никаких внешних сил) тело всегда двигалось бы без ускорения. Однако, по Аристотелю, пустота невозможна, а в реальном неоднородно заполненном пространстве тело может начать ускоренное движение и без внешней силы, ведь причина ускорения (хотя бы частично) находится в нём самом. Согласно Ньютону, такого, напротив, быть не может, поскольку материя по своей сути инертна, безжизненна. Аристотель, оставаясь в рамках геоцентризма, не мог причину ускорения тела понимать только как внешнее воздействие. Поэтому в его физике в принципе не могло быть закона инерции.

концов является какое-то естественное движение, иначе быть не может.

Для того чтобы вырваться из лабиринта аристотелизма, нужно было насильственные движения сделать предметом физического рассуждения, что и начал в XVI—XVII вв. осуществлять Галилей, а закончил Ньютон. Однако Эйнштейн в общей теории относительности в каком-то смысле возвращается на позиции Аристотеля. В соответствии с теорией относительности падение камня происходит не под действием внешней силы тяготения, как было у Ньютона, а естественным образом, следуя структуре искривлённого Землёй пространства-времени. Эйнштейн мечтал всю физику перестроить так, чтобы в ней остались только естественные движения, но осуществить эту мечту ему не удалось.

ПУСТОТЫ НЕ СУЩЕСТВУЕТ

Из идеи первичности естественных движений вытекает суждение о невозможности существования пустоты. Возражая Демокриту, Аристотель утверждал, что «или ни один предмет нигде не перемещается по природе, или, если это происходит, нет пустоты». Естественные движения не могут осуществляться в пустоте.

В пустом пространстве тела вообще не могли бы сдвинуться с места. В самом деле, в пустоте, окружающей тело, нет ни верха, ни низа, в ней все направления равноправны и нет никакого основания для предпочтения одного из них. Через пустоту не может просочиться никакая информация о том, в какой стороне находится Земля. Как же тогда тело сможет начать падать?

С современной точки зрения тело падает потому, что на него действует гравитационное поле Земли. Однако не означает ли это, что между Землёй и телом находится не совсем пустое пространство (пространство без вся-



кой материи)? Учёные говорят, что гравитационное поле, заполняющее всё мировое пространство, есть особый вид материи, который не является веществом. Выходит, Аристотель прав в том, что абсолютной пустоты не существует?

Разумеется, ни о каких физических полях у Аристотеля и речи быть не могло. По его мнению, всё пространство Вселенной заполнено тем или иным видом вещества (в основном эфиром). Но, как бы то ни было, утверждение о невозможности пустоты находится в полном соответствии, с одной стороны, с опытом, доступным во времена Аристотеля (тяжёлые тела в воздушной или водной среде, во-первых, падают и, во-вторых, падают неодинаково), а с другой — с логикой (в пустоте движение начаться не может).

ПРЕВРАЩЕНИЯ ЭЛЕМЕНТОВ

Самым надёжным ощущением, которое реже других вводит в заблуждение, Аристотель считал осязание. Даже зрение чаще приводит к оптическому обману, чем ощущения, возникающие от прикосновения к предметам. Поэтому именно качества, связанные с осязанием, можно считать наиболее фундаментальными.

Опыт показывает, что все предметы на Земле по отношению к осязанию делятся на тёплые или холодные, влажные или сухие, мягкие или твёрдые, шероховатые или гладкие и т. д. Однако только тепло и влажность могут радикально менять состояние тел. Влажное (сухое) и тёплое (холодное) — это своего рода движущие силы, превращающие совершенно бездейственную материю в элементы, из которых в свою очередь состоят чувственно воспринимаемые тела. Каждый из четырёх элементов подлунного мира (земля, вода, воздух, огонь) представляет собой материю, соединённую с двумя из этих четырёх



качеств: земля — сочетание материи с сухим и холодным, вода — с влажным и холодным, воздух — с влажным и тёплым, огонь — с сухим и тёплым.

«Огню противоположна вода, воздуху — земля; ведь они состоят из противоположных свойств. Однако так как их четыре, то каждый элемент имеет одно свойство: земля скорее суха, чем холодна, вода скорее холодна, чем влажна, воздух скорее влажен, чем горяч, огонь скорее горяч, чем сух», — писал Аристотель.

Элементы могут превращаться друг в друга. Этим объясняются качественные изменения в вещах. Легче переходят друг в друга элементы, которые различаются одним качеством, труднее те, у которых таких качеств два. Например, земле легче превратиться в воду (если сухость в ней будет преодолена влажностью), чем в воздух, ведь тогда придётся преодолеть и сухость, и холод.

На небе же не происходит никаких изменений, оно вечно вращается по своим законам. Небесные светила состоят из особого, пятого, элемента, который Аристотель вслед за Эмпедоклом (V в. до н. э.) именует эфиром. Позже в латинских текстах он получит название «квинтэссенция», что означает «пятая сущность». (Аристотель, правда, считал её первой, ибо она божественна.) Эфир не превращается в другие элементы, как и последние в эфир. Поэтому небесный и земной миры принципиально отличаются друг от друга.



БОГ — ПЕРВОДВИГАТЕЛЬ

Русский философ Алексей Фёдорович Лосев (1893—1988) отмечал, что «и пространство, и время у Аристотеля... всегда имеют свою физиономию, всегда бурлят жизненными стремлениями и всегда отвечают на тот или иной вопрос ценностного характера». Космос Аристотель воспринимал как живое произведение искусства, а задачу физики видел в том, чтобы дойти до созерцания умом одушевлённой вселенской красоты и наслаждаться ею. С этим связано учение о неподвижном божественном перво двигателе, которое по праву считают вершиной физики Аристотеля.

Отдельно существующая вещь представляет собой единство материи и формы. Например, медный шар — воплощение формы шара в медной материи. Медь сама по себе содержит возможность существования медного шара, или, иначе, медь —

это медный шар в возможности. Однако медь, из которой состоит шар, тоже есть некая реальность, обладающая набором известных характеристик, составляющих форму данной реальности (меди). А значит, медь, понимаемая как вещь (как кусок меди, форма и объём которого нас уже не интересуют), тоже должна иметь свою материю. Такой материей Аристотель считал традиционные для античности элементы — землю, воду, воздух и огонь. Они содержат в себе больше возможностей для воплощения различных форм, чем медь.

Каждый отдельный элемент (например, земля) тоже имеет ряд характеристик, отличающих его от остальных элементов, т. е. он обладает своей формой. Отвлекаясь от неё, мы получим уже первоматерию, которой не присущи никакие характеристики. Такую материю, лишённую формы, нельзя представить. Она есть чистая возможность всех вещей, и её можно только мыслить.

Теперь, если не спускаться, а восходить по лестнице уровней существующих вещей, мы придём не к первоматерии, а к чистой форме. Она представляет собой уже не чистую возможность, а чистую действительность, это форма всех форм, абсолютное совершенство. Шар из бронзы совершеннее бесформенного куска бронзы, а бронзовая статуя Афродиты совершеннее бронзового шара. Но статуя Афродиты неживая, и она не может сама двигаться, тогда как источник движения живого существа находится в нём самом, поэтому оно совершеннее неживого предмета. В то же время в животном можно выделить то, что движется, — тело, и то, что движет, — душу как средоточие телесных желаний. Следовательно, душа как источник движения животного совершеннее его тела.

Человек помимо животной души обладает ещё и разумом (или разумной душой). Он может, исходя из разумных побуждений, обуздать стра-





сти души. Значит, разум как повелитель страстей совершеннее животной души; это ещё один шаг к абсолютному совершенству.

Однако человек — лишь часть Космоса. Часть зависит от целого, и жизнь человека зависит от жизни Космоса. Целое же совершеннее своей части. Поскольку Космос — абсолютное целое, он обладает высшим совершенством, и, значит, источник его движения находится в нём самом. Причём этот источник должен приводить в движение всё остальное, т. е. он должен быть первым двигателем, за которым уже ничего стоять не может.

Перводвигатель неподвижен, иначе возник бы вопрос о том, что является источником его движения. И если бы таковой отыскался, то наш перводвигатель не был бы первым.

Неподвижный перводвигатель может служить источником движения, только выступая в роли целевой причины, — он должен быть тем, к чему стремятся, т. е. конечной целью, конечным благом для всего существующего. А это означает, что перводвигатель представляет собой абсолютное благо, подлинное совершенство. Перводвигатель, следовательно, отвечает всем характеристикам Бога. Значит, он и есть Бог.

Таким образом, физика Аристотеля выполняет свою задачу — она приходит к созерцанию умом высшей Божественной сущности. Занимаясь этой наукой, Аристотель и его последователи достигали возвышенного и умиротворённого состояния души, приближаясь к античному идеалу человеческого существования, — созерцательной жизни философа.

ГЕОЦЕНТРИЗМ: ОШИБКА ИЛИ СТУПЕНЬ ПОЗНАНИЯ?

Физику Аристотеля можно назвать физикой геоцентризма, так как лишь в рамках представления о неподвиж-

ности Земли она вполне последовательна и красива. Аристотель отверг идею Филолая об обращении Земли вокруг Центрального Огня и идею Платона о вращении Земли вокруг собственной оси, развитую затем его учеником Гераклидом Понтийским. Выводы из этих идей Аристотель считал противоречащими фактам. В самом деле, рассуждал Аристотель, если Земля по природе вечно движется в пространстве как единое целое, то каждая её часть должна двигаться одинаково. Однако камни падают на Землю, а не перемещаются параллельно ей, зависая на определённой высоте. Кроме того, если Земля вечно вращается вокруг собственной оси, круговое движение будет естественным для всех её частей, за исключением центральной точки. Значит, камень, отпущенный на некоторой высоте, должен двигаться не к центру земного шара, а по окружности вокруг него, чего, как показывает опыт, не бывает.

Аристотель полагал, что не надо придумывать какие-то невероятные гипотезы о движении Земли, если все известные грекам факты можно объяснить проще и естественней: «Это подтверждается и астрономическими теориями математиков: наблюдаемые явления... происходят в соответствии с предпосылкой, что Земля находится в центре».

Того же принципа придерживаются и современные учёные: не выдвигать сложную гипотезу, если можно обойтись более простой. Поэтому возникает вопрос: так был ли неправ Аристотель? Как должен был поступить на его месте настоящий учёный, для которого истина есть то, что добыто с помощью научного метода?





Трактат Аристотеля
«О логике».
Греческая
рукопись. XVII в.



Истина в науке о природе — это, скорее, процесс, путь, а не существующая вечно в неизменном виде, застывшая совокупность идей, которые постепенно открываются людьми и накапливаются, не претерпевая в дальнейшем принципиальных изменений, как, например, происходит в математике. Вопрос: ошибкой или необходимым этапом познания было геоцентрическое мировоззрение? — очень непрост.

Провал геоцентризма и в теории, и на практике являлись необходимым этапом для перехода познания на новый уровень. Однако этот провал не мог произойти прежде, чем были исчерпаны все попытки отстоять старые, хорошо согласованные со многими наблюдениями, представления. Во времена же Аристотеля геоцентризм не был устаревшей теорией, его возможности ещё далеко не были исчерпаны. В тот период именно геоцентризм и соответственно физика Аристотеля являлись истинными в том смысле, что они следовали в русле научного метода, как его понимали греки. На учение о неподвижной Земле через шесть веков после Аристотеля опирался александрийский учёный Клавдий Птолемей, создавая «Альмагест» — шедевр греческой астрономии, не превзойдённый вплоть до Коперника и Галилея.

Современный американский историк и философ науки Пауль Ф. Эйерабэнд писал: «Астрономия, физика, психология, эпистемология (теория познания. — *Прим. ред.*) — все эти

дисциплины объединяются в аристотелевской философии и создают систему, которая последовательна, рациональна и находится в согласии с результатами наблюдения... Анализ показывает внутреннюю силу аристотелевской системы. ...Совершенно невероятно, чтобы идея движения Земли была подхвачена сразу же в момент её появления».

НАСЛЕДИЕ АРИСТОТЕЛЯ

Универсализм Аристотеля, его твёрдое намерение построить стройную, всеобъемлющую и при этом научную картину мира, оказался палкой о двух концах. С одной стороны, Аристотель дал начало множеству наук, от физики до филологии, сделал важнейший шаг в становлении самого научного метода. С другой — объяснив всё, его учение надолго стало путями для развития живой мысли. В своём стремлении объять необъятное Аристотель часто брался за вопросы, представлявшие в IV в. до н. э. большую проблему для точного их разрешения. Сам он был осторожен, часто говорил лишь о «возможных причинах», употреблял такие выражения, как «пожалуй», «приблизительно», «исходя из того, что нам теперь известно» и т. п. Это и есть научный подход — объяснять на основе надёжно установленного. Если же данных не достаточно, то объяснение рассматривается как гипотеза. Многие рассуждения Аристотеля в его понимании были именно гипотезами, но потом они стали догмами. А с догмой бороться очень трудно, потому что это уже не наука, а идеология.

Вероятно, будущие поколения с улыбкой посмотрят на многие наши представления о Вселенной, так же как мы сегодня смотрим на физику Аристотеля. Кроме того, нет гарантии, что наука будущего не вернётся к некоторым положениям аристотелевской физики, но на новом уровне,

ведь в XX в. подобные попытки уже предпринимались. Один из основоположников квантовой механики немецкий физик Вернер Гейзенберг (1901—1976) писал: «Понятие возможности, игравшее столь существенную роль в философии Аристотеля, в современной физике вновь выдвинулось на центральное место. Математические законы квантовой теории можно считать формулировкой аристотелевского понятия „дυναмис“ или „потенция“. Спокойный, уравновешенный подход Аристотеля к решению сложнейших задач, стоящих перед наукой, его неискоренимый здравый смысл и вера в способность разума проникнуть в тайны природы актуальны и в наши дни. Знакомясь с одной из самых ярких страниц в истории науки — с физикой Аристотеля, мы расширяем не только свой исторический горизонт. Приобщение к живой мысли великого человека — лучший способ понять, что такое научное мышление и наука вообще, что ей подвластно, а что нет.

Как знать, может быть, в XXI столетии в каком-нибудь университете ещё будет читать курс лекций под названием «Актуальные проблемы физики Аристотеля». Только к геоцентризму мы уже не вернёмся.

Физика Аристотеля решала свои задачи, принципиально отличающиеся от тех, что стояли перед физикой Нового времени. Однако общее для них то, что они носили универсальный характер. Аристотелевская физика являлась органической частью единого мировоззрения, которое должно было стать (и стало) идеологической основой нового мирового порядка, о котором мечтал Александр Македонский. Поэтому Аристотель получил мощную поддержку со стороны власти. Его Ликей противостоял платоновской Академии как символу прошлого — полисной Греции. Насту-

пала эпоха эллинизма, сопровождавшаяся распространением греческой культуры по всей ойкумене. Платонизм с его консервативными идеями для этого уже не годился, и не случайно он потом эволюционировал в сторону религии, всё больше отходя от науки. Полисная Греция, последним выдающимся идеологом которой был Платон, переживала глубокий кризис, грозивший уничтожить всю греческую цивилизацию. Следовало повернуться лицом к миру, а не замыкаться в полисе с его проблемами. Философия должна была охватить к тому времени проблемы всего человечества, а не только греков.

Из отдельных платоновских положений, как из кирпичей, Аристотель сложил совершенно новое здание, о котором его учитель и подумать не мог. Будучи учеником талантливым, Аристотель привнёс немало новаторского и многие тезисы Платона пересмотрел. В итоге их учения получились почти противоположными. Но, несмотря на это, без Платона не было бы и Аристотеля.

Когда же в XVI—XVII вв. пришло время расставаться с геоцентризмом, учение Платона и для Коперника, и для Галилея оказалось ближе, чем учение Аристотеля...





МЕЖДУ АНТИЧНОСТЬЮ И ВОЗРОЖДЕНИЕМ

РАЗДЕЛЕНИЕ НАУК

Египту повезло, пожалуй, больше, чем остальным небольшим государствам, образовавшимся после распада империи Александра Македонского (356—323 до н. э.). Воцарившаяся здесь династия Птолемеев мирно и спокойно правила без малого три века (305—30 гг. до н. э.). Новая столица Египта, заложенная ещё при Александре в 332—331 гг. до н. э. и названная в его честь Александрией, стала крупнейшим центром средиземноморской культуры, куда стекались лучшие умы из самых отдалённых уголков разрушавшейся империи. Именно здесь представителям трёх культур — древнеегипетской, древнегреческой и древнееврейской — пришлось критически оценить представления друг друга о природе. А поскольку общих авторитетов не было, то единственным способом, позволившим им находить согласие, оказался метод логических доказательств, что положило начало развитию доказательной науки.

Александрийский учёный Евклид блестяще показал, как разрозненные утверждения относительно чисел и геометрических фигур могут быть приведены в единую систему, в ко-

торой каждое из них оказывается следствием немногих очевидных аксиом (см. статью «„Начала“ Евклида» в томе «Математика» «Энциклопедии для детей»). Математика стала эталоном доказательной науки. Метод Евклида был настолько в ней успешен, что возникло желание использовать его для доказательства иных групп утверждений, связав их друг с другом и сведя к самоочевидным исходным предположениям. Каждую такую группу естественно было считать отдельной наукой, и процесс разделения философии на дисциплины, начатый ещё Аристотелем, приобрёл новое направление. Происходила, как принято говорить, *дифференциация* наук (от *лат. differentia* — «различие», «разность»).

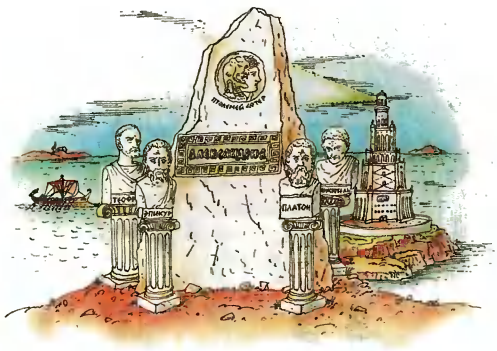
В том, что касается собственно естествознания, период, непосредственно следовавший за смертью Александра Македонского и распадом империи, отмечен признаками некоторого упадка и застоя. Новых философских идей не было, шла лишь классификация уже накопленных. И всё же в это время появляются три значительных имени — Теофраст, Стратон и Эпикур, предвосхитившие грядущий расцвет Александрии.

Теофраст (около 372 — около 287 до н. э.) возглавил афинскую школу последователей Аристотеля — *перипатетиков* (от *греч.* «перипатетикос» — «прогуливающиеся») — после смерти её основателя. Единую натурфилософию своего учителя он разделил на различные дисциплины, каждой из которых посвятил особое сочинение: «История растений», «О причинах растений», «О камнях», «О ветрах», «Мнения физиков» и т. д.

Стратон из Лампсака (340—270 до н. э.) стал главой школы перипатетиков после смерти Теофраста. Стратон во многом отошёл от по-



Александрийский маяк. Изображение на монете римского императора Антонина Пия (86—161).





ложений аристотелевской физики, предвосхитив тем самым её критику во времена Возрождения и в XVII в. Он положил начало критической традиции внутри школы, без разрыва с её основами. Так, Стратон отказался от представления аристотелевской

физики, согласно которому движение тяжёлых тел к центру Земли, а лёгких к небу объяснялось тем, что там находятся их естественные места. Он считал, что все тела во Вселенной стремятся вниз, т. е. к центру Земли, однако более тяжёлые вытесняют

ПРООБРАЗЫ НАУЧНЫХ ИНСТИТУТОВ: БИБЛИОТЕКА И МУСЕЙОН

Александрия славилась многими достопримечательностями. Первой среди них был маяк (около 280 г. до н. э.) на острове Фарос, одно из семи чудес света. Однако не меньшего восхищения заслуживали Александрийский мусейон и основанная при нём библиотека (начало III в. до н. э.). Оба учреждения содержались на средства царской казны и были построены по инициативе первого греческого царя Египта Птолемея I Сотера (305—283 гг. до н. э.).

Идея создания библиотеки принадлежала, очевидно, афинскому философу-перипатетику и оратору Деметрию Фалерскому (около 360 — около 280 до н. э.), которого один из преемников Александра Македонского Кассандр назначил в 317 г. до н. э. правителем города. В 307 г. до н. э., когда в Афинах была восстановлена демократия, Деметрий бежал в Египет. При дворе Птолемея его почитали за разнообразные познания в науках и искусстве.

Александрийская библиотека уникальна по самому замыслу: собрать всю накопившуюся к тому времени греческую литературу — как научную, так и художественную. Конечно, собрания рукописей существовали и раньше, — например, большие коллекции имелись у драматурга Еврипида и Аристотеля. Однако свои коллекции они собирали, руководствуясь личным вкусом и располагая не очень большими средствами. Теперь пополнение библиотеки было взято под государственный контроль. Книги со всех кораблей, прибывавших в александрийский порт, арестовывались, а владельцам возвращались красиво оформленные копии. В годы расцвета Александрии количество собранных здесь рукописей превышало 500 тыс., причём многие рукописи содержали не одно сочинение, а несколько. Возглавляли библиотеку, как правило, видные александрийские учёные, занимавшиеся воспитанием царских детей.

Погибла библиотека в результате нескольких пожаров. Первый случился во время захвата города войсками Юлиуса Цезаря в 47 г. до н. э., но тогда царица Клеопатра смогла спасти часть рукописей. Причинённый ущерб частично возместил сам Цезарь, подарив библиотеке большое количество рукописей. Второй пожар произошёл около 272 г. н. э., когда городом пытался овладеть римский император Аврелиан. Филиал библиотеки был уничтожен

христианскими фанатиками в 391 г. Остатки этого великолепного книгохранилища сожгли в 642 г. войска халифа Омара I. Предание гласит, что Омар приказал жечь рукописи со словами: «Если науки учат тому же, что написано в Коране, они излишни; если другому — они безбожны и преступны».

Основная часть библиотеки хранилась в Александрийском мусейоне (греч. «храм муз»). По описанию древнегреческого географа и историка Страбона, посетившего Египет в 24—20 гг. до н. э., Мусейон «имеет место для прогулок, экседру (крытая галерея с сиденьями. — Прим. ред.) и большой дом, где находится общая столовая для учёных, состоящих при Мусейоне». Здесь собирались учёные мужи, чтобы обсуждать проблемы философии, наставлять молодёжь, изучать рукописи, взятые из библиотеки, — всё это вместе считалось «служеньем муз».

С Мусейоном были так или иначе связаны все крупные учёные, работавшие в Александрии в то время. Большинство занималось историей, философией или географией. Известны среди учёных и женщины. Одна из них, Гипатия (около 370—415), стала видным математиком, астрономом и возглавляла александрийскую школу неоплатоников. Монахи-христиане объявили её предводительницей язычников. Гипатию растерзала толпа религиозных фанатиков. После её гибели начался интеллектуальный и культурный упадок Александрии.





менее тяжёлые, отчего и кажется, что последние стремятся вверх. Впоследствии эта точка зрения была развита Архимедом, сформулировавшим свой знаменитый закон плавания тел. У Эпикура Стратон заимствовал даже атомистические воззрения: материя, по его представлениям, состоит из частиц, разделённых промежутками, ответственными за сжимаемость тел.

Древнегреческий философ Эпикур (341—270 до н. э.) придал античному атомизму более привычный нам вид. В отличие от воззрений его предшественников, Демокрита и Левкиппа, мир, по Эпикуру, состоит из пустоты и мельчайших частиц материи — атомов, находящихся в непрерывном движении. Демокрит же считал, что атомы могут быть любого размера, даже сопоставимого с размерами Космоса.

ЕВКЛИД И АРХИМЕД. СОЮЗ ГЕОМЕТРИИ С МЕХАНИКОЙ

Чтобы физика приняла современный вид и смогла решить те задачи, которые сегодня можно определить как физические, ей надо было объединиться с математикой, точнее, овладеть её методами, стать математической наукой. Для этого самой математике сначала следовало достичь определённого теоретического уровня. Исторически сложилось так, что геометрия достигла его раньше прочих разделов математики и по самой своей природе могла быть применена прежде всего к задачам механики и оптики.

Создание теоретической геометрии связано с именем Евклида (III в. до н. э.). О его жизни почти ничего не известно, кроме того, что он основал в Александрии школу и преподавал в ней во времена Птолемея I Сотера. Его труд «Начала» (15 книг),

в котором были систематически изложены все известные тогда сведения по геометрии, на протяжении двух тысячелетий считался образцом строгости и последовательности не только для математики, но и для любой точной науки.

Евклиду также принадлежит (или, по крайней мере, приписывается) первая попытка перенести строгие математические рассуждения с абстрактных, не существующих в реальности предметов (геометрических тел и фигур) на природные явления — механические и оптические. До нашего времени сохранилось, причём в искажённом виде, всего три отрывка из рукописи Евклида по механике, вероятно входившие в один и тот же трактат.

Эти отрывки представляют собой развитие идей, изложенных в греческом трактате начала III в. до н. э. «Проблемы механики» (наиболее древнем известном нам сочинении по механике), который долгое время приписывали Аристотелю. Автор трактата неизвестен. Возможно, им был Стратон из Лампсака. «Проблемы механики» послужили поводом для многочисленных античных и средневековых комментариев, определивших теоретические контуры этой науки вплоть до Галилея.

Трактат Евклида отличается от «Проблем механики» главным образом тем, что автор стремится придать чисто качественным утверждениям «Проблем механики» систематизированную математическую форму определений, аксиом и теорем. Евклид сначала вывел соотношение, связывающее силу, вес и расстояние, которое данное тело проходит в данной среде, а затем пытался вывести из него закон рычага.

Ту же манеру изложения Евклид сохранил и в труде «Оптика», основанном на платоновской теории зрения, согласно которой зрительное ощущение возникает от соприкосновения «лучей зрения», испускаемых



Птолемей I Сотер,
царь Египта.
Изображение
на монете.



Евклид.
Гравюра. XVIII в.



глазами, с лучами, испускаемыми объектом. Евклид постулирует прямолинейность распространения «лучей зрения» и идентичность размеров предмета и его отражения в том случае, если предмет стоит на поверхности плоского зеркала. Отсюда он вывел теорему: расстояние, которое луч проходит от глаза до зеркала, так же относится к расстоянию, которое луч проходит от зеркала до предмета, как высота предмета — к высоте глаза над зеркалом. Одним из следствий этой теоремы оказывается закон равенства углов падения и отражения, известный грекам задолго до Евклида.

Ещё больших успехов в приложениях геометрических построений к задачам механики добился Архимед (около 287—212 до н. э.). Основную часть жизни учёный провёл в сицилийском городе Сиракузы, он также долго жил в Александрии и, видимо, получил здесь образование, причём в то же время, когда в Александрии преподавал Евклид. Вероятно, это определило и его интересы, и методы исследования, и форму изложения результатов. Как и Евклид, Архимед много занимался математикой, но, кроме

того, он был выдающимся изобретателем и инженером.

Трактаты, озаглавленные «О центрах тяжести» и «О весах или рычагах», в которых Архимед наиболее полно изложил основы своей механики, до нас не дошли. Целиком или в отрывках сохранились его сочинения «О равновесии плоских тел», «О квадратуре параболы», «О плавающих телах», а также его письмо Эратосфену Киренскому, которые дают достаточно полное представление о его взглядах.

В Архимедовых трактатах по механике заложены теоретические основы статики: в них впервые сформулировано понятие центра тяжести и дано доказательство закона рычага, более общее и математически строгое, чем приведённое Евклидом. Несмотря на интерес Архимеда к техническим приложениям науки и редкую изобретательность, характер его трактатов подчёркнуто теоретический, математический. Главные понятия сформулированы в определениях, которые связываются аксиомами. По их поводу затем делаются неочевидные утверждения в форме предложений и теорем.

В трактате «О плавающих телах» способ рассуждений гораздо более физический, чем в трактатах по механике, а сам известный закон Архимеда намного ближе к физике, чем подчёркнуто геометрический закон рычага. В основе закона Архимеда лежал опытный факт (при погружении тела в воду оно становится легче), подтверждённый потом теоретическими умозаключениями и расчётами. Поэтому наблюдения Архимеда в ванне иногда называют первым физическим экспериментом, а его закон — первым физическим законом.

Подобно Евклиду, Архимед интересовался не только механикой, но и оптикой. Однако его трактат по оптике не сохранился; до наших дней дошла лишь известная легенда



Архимед. Гравюра.

Если «лучи зрения», согласно Платону, испускаются из глаз, появляется вопрос, почему человек не видит в темноте. Философ объяснял это тем, что зрение возникает лишь при соединении двух потоков: «огонь, устремляющийся изнутри, сталкивается с внешним потоком света», «внутренний и внешний огонь вступают в общение и сливаются воедино».

Эратосфен Киренский (около 276—194 до н. э.) — древнегреческий учёный, автор трудов по математике (теории чисел), астрономии, философии, филологии, музыке. Он заложил основы математической географии и впервые измерил окружность Земли.





АРИСТАРХ САМОССКИЙ

Один из величайших учёных Древней Греции, первый астроном, предложивший гелиоцентрическую систему устройства Вселенной, Аристарх Самосский (около 310 — около 250 до н. э.) родился на острове Самос. В 125-ю Олимпиаду (280—277 гг. до н. э.) он наблюдал в Александрии солнечное затмение. В сочинении «Исчисление песчинок» («Псаммит») великий древнегреческий математик Архимед ссылается на не дошедшую до нас работу Аристарха «Предложения». Из этих ссылок следует: греческий астроном полагал, что звёзды образуют неподвижную сферу, в центре которой находится тоже неподвижное Солнце. Вокруг него движутся по окружности Земля и другие планеты (кроме Луны). Он также полагал, что расстояние от Солнца до Земли несоизмеримо мало по сравнению с расстоянием от Солнца до сферы неподвижных звёзд.

Сочинения, в которых Аристарх предлагал доказательства своей точки зрения, утрачены. Однако до нас полностью дошёл небольшой, но очень ценный его трактат «О размерах Солнца и Луны и расстояниях до них», впервые напечатанный в 1418 г. в Венеции. В нём Аристарх предлагает остроумный способ вычисления отношения расстояния от Солнца до Земли к расстоянию от Солнца до Луны. Требовалось лишь найти угол между Солнцем и Луной в моменты первой и последней четверти, т. е. когда с Земли видна половина лунного диска. Аристарх принял этот угол равным 87° и получил, что расстояние от Земли до Солнца примерно в 19 раз больше, чем расстояние от Земли до Луны. В действительности искомый угол равен $89^\circ 51'$, а отношение расстояний составляет $1/390$. Приборы, имевшиеся в распоряжении учёного, не позволяли точно измерить величину требуемого угла, но геометрическая основа рассуждений Аристарха безусловно верна.

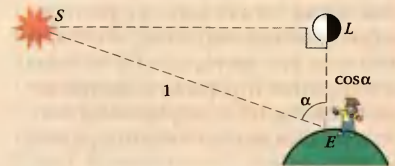
Видимые диаметры Солнца и Луны Аристарх принял равными, поскольку во время солнечных затмений Луна лишь ненадолго способна закрыть солнечный диск. Отсюда следовало, что диаметр Солнца в 19 раз превышает диаметр Луны. Аристарх знал, что во время лунных затмений тень Земли примерно в 2 раза больше Луны. С помощью несложных геометрических рассуждений Аристарх показал, что тень Земли сходится в точку на расстоянии в 3 раза большем, чем расстояние до Луны. Из этого следовало, что диаметр Земли больше диаметра Луны в 3 раза. Но тогда Солнце оказывалось больше, чем Земля, по крайней мере в $19/3 = 6,3$ раза, а его объём — в 250 раз.

Возможно, именно то, что Солнце гораздо больше Земли, побудило Аристарха поместить его в центр мира. По рассказу Плутарха, стоик Клеанф обвинил учёного в безбожии за то, что тот осмелился приписать движение священной «очагу мира» Земле — Гестии, как называли её древние греки. Аристарх был изгнан в Александрию, крупнейший в то время центр науки и культуры Средиземноморья. Здесь он и прожил до конца жизни.

Метод, предложенный Аристархом для определения отношений расстояний до Солнца и Луны, был первой и относительно удачной попыткой оценить масштабы космоса, фактически превратив астрономию из учения о Небе в науку о Вселенной.

Аристарх понял, что когда с Земли видна ровно половина лунного диска, то отрезок LE , связывающий центры Луны и Земли, перпендикулярен отрезку LS между центрами Луны и Солнца. Угол же между отрезками EL и ES , соединяющими Землю и Солнце, а также Землю и Луну, равен 87° . Следовательно, в треугольнике LSE с вершинами в центрах Солнца, Земли и Луны все углы известны, и без труда можно определить отношение его гипотенузы к катету, или отношение расстояний от Солнца и Луны до Земли. Поскольку $LE = SE \cdot \cos \alpha$, $\frac{SE}{LE} = \frac{1}{\cos \alpha}$. Для $\alpha = 87^\circ$ Солнце оказывается дальше Луны в 19 раз (для $\alpha = 89^\circ 51' —$ в 390 раз).

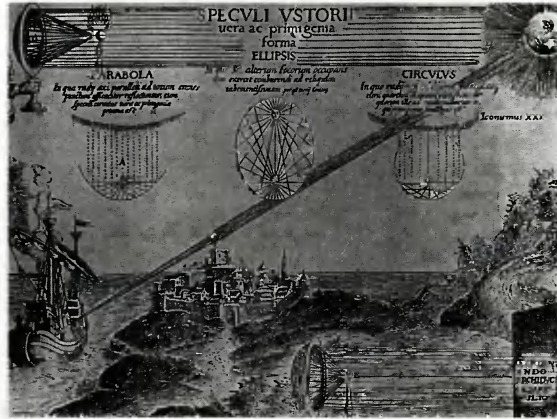
Аристарх не был знаком с тригонометрией в её современном виде, но он сумел с помощью сложных геометрических построений доказать, что SE/LE больше 18, но меньше 20. Если не владеть как тригонометрией, так и искусством геометрических доказательств, можно просто построить прямоугольный треугольник с углами 87° и 3° и убедиться, что гипотенуза больше малого катета в 19 раз.





об осаде Сиракуз римским флотом, который был уничтожен при помощи большого количества зеркал.

Именно Архимед в своих трудах совершил революционный переход от качественных рассуждений о равновесии и движениях «Проблем механики» Псевдо-Аристотеля к математической науке, соединяющей физические сущности строгим законом. Сочинения Архимеда оставались практически неизвестными на протяжении Средних веков и раннего Возрождения. Интерес к его трудам возник только в XVI в. Введённые тогда в механику «архимедовские традиции» послужили одним из элементов построения механической науки Нового времени.



его жизни почти ничего не известно, а сочинения не дошли до наших дней.

Сожжение римского флота. Гравюра. XVII в.

Витрувий, древнеримский архитектор и инженер второй половины I в. до н. э., рассказывает, что Ктесибий был сыном цирюльника и не имел математического образования. Однако им владела страсть к изобретательству. Ему, например, хотелось поместить в парикмахерской отца зеркало так, чтобы груз, подвешенный на скрытом шнуре, уравновешивал зеркало. Тогда посетители без труда могли бы приближать его к себе, а затем вновь поднимать.

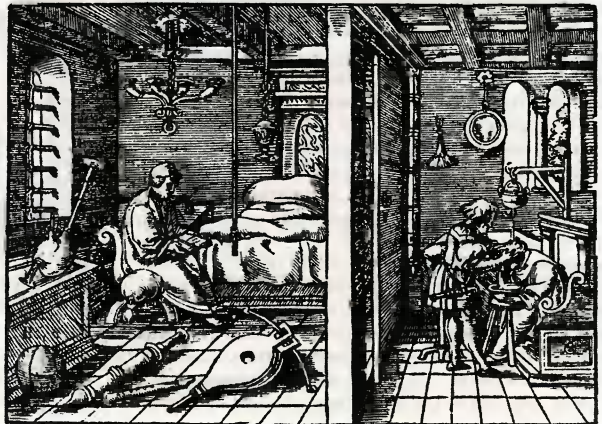
Ктесибий. Гравюра. XVI в.

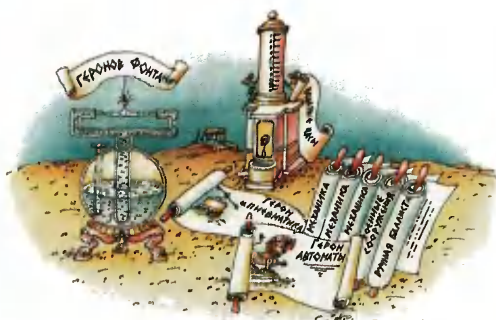
АЛЕКСАНДРИЙСКИЕ МЕХАНИКИ

Итак, в Александрии были сформулированы первые дошедшие до нас физические законы и возникла первая научная дисциплина, ставшая впоследствии частью физики, — механика. Правда, она была совсем не похожа на современную механику. Это скорее прародительница статики; она занималась теоретическим анализом простейших машин — рычага и наклонной плоскости. Но такая механика значительно отличалась от философского учения о движении, разработанного Аристотелем, поскольку в ней применялись количественные методы.

Успехи механики видоизменили аристотелевское разделение наук на «чистые» и «смешанные». Благодаря Евклиду и Архимеду к смешанным математическим наукам помимо астрономии и музыки причислили также механику и оптику.

Древнегреческий физик и инженер Ктесибий Александрийский (III в. до н. э.) был первым из посвятивших себя механическому искусству, чьё имя сохранилось в истории, хотя о





Видимо, именно Ктесибия принадлежит идея о том, что воздух «является телом» и, следовательно, его можно заставить выполнять полезную работу. Так появился новый раздел механики, посвящённый изучению полезных свойств сжатого воздуха, — пневматика. Сжатый гидравлическим насосом воздух заставлял, например, звучать орган. Витрувий сообщает также, что Ктесибий изготовил фигуры животных, приводившиеся в движение водой. Благодаря различным техническим при-

ЗАКАТ МЕХАНИКИ

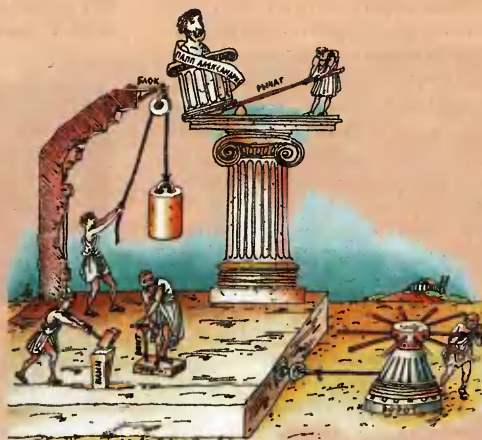
Последним выдающимся механиком и изобретателем эллинистической эпохи был Папп Александрийский (вторая половина III в. н. э.), рассмотревший с теоретической точки зрения работу пяти простейших механизмов. Он изложил свои соображения в трактате «Математическое собрание». Видимо предчувствуя закат античности, Папп стремился объединить в своём сочинении всё самое ценное, что дало это время. Его произведение отличается крайней разнородностью: старые теории в нём перемешаны с новой технической практикой, в традиционный (со времён Евклида и Архимеда) механический текст вклиниваются разъяснения о строении материи и её началах в духе античной науки о природе. Более того, Папп объявил «учение о материи и природе элементов мира» первой и важнейшей задачей механики, для которой изучение положения и тяжести тел, а также их движений в пространстве носит второстепенный характер.

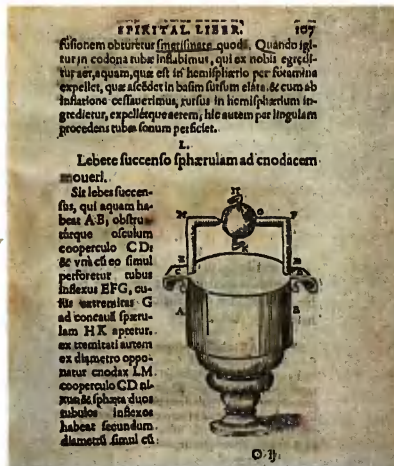
Папп разделил механику на теоретическую и «руководельную», понимая и ту и другую весьма широко. К первой он отнёс «геометрию, арифметику, астрономию и физику», а ко второй — «обработку меди, обработку железа, обработку дерева, строительное дело, живопись, изготовление подъёмных механизмов» и многое другое.

Как в теоретической, так и в практической части Папп, следуя Герону, предпочёл не давать точных доказательств своих утверждений, ограничиваясь лишь их формулировкой и ссылкой на Архимеда. В том, что касается наклонной плоскости, Папп обнаружил удивительное отличие от Герона. Подобно предшественнику, он безуспешно пытался вывести закон наклонной плоскости — в данном случае найти силу, необходимую, чтобы перемещать вдоль этой плоскости тело определённого веса. Но Папп совершил ошибку, отсутствовавшую у Герона: не умея отличить силу тяжести от силы трения, он полагал, что для движения по горизонтальной плоскости нужна конкретная конечная сила, определяемая весом тела. Герон же прямо

писал, что сила, необходимая для перемещения тела вдоль горизонтальной поверхности, зависит лишь от степени сцепления поверхности и тела и может быть поэтому сколь угодно малой, если поверхность достаточно гладкая.

В целом книга Паппа страдает хаотичностью изложения. Ему не удалось систематизировать колоссальный накопленный материал, и он не смог выбрать какую-нибудь руководящую идею. Трактат лишён и математической строгости, хотя бы отдалённо напоминающей ту, которая была достигнута в трудах Евклида и Архимеда. В то же время чувствуется и недостаток технического чутья, присущего Герону. Однако в сочинении Паппа можно видеть тот же союз механики с геометрией, что и в трактатах Евклида и Архимеда, и попытку распространить этот союз на всю науку о природе.





«Термоскоп Филона. Изображение и описание из книги Герона «Пневматика», переведённой на латынь и изданной в XVI в.

«Золипиа. Изображение и описание из книги Герона «Пневматика».

способлениям журчание воды внутри фигур напоминало голоса этих животных.

Добиваясь равномерного вытекания воды из резервуара, Ктесибий усовершенствовал механизм водяных часов, впервые использовав зубчатую передачу. Эти часы могли отсчитывать только целое количество часов: каждый час в резервуар с водой падал камешек.

Другой учёный, вероятно ученик Ктесибия, Филон Византийский был автором лишь частично дошедшего до нас «Механического синтаксиса». Заслугой Филона стало создание технической терминологии и основ технической эстетики.

Помимо подробного описания различных военных сооружений Филон рассказал об опытах с *термоскопом* (от греч. «терме» — «тепло» и «скопео» — «смотрю»). Это были первые опыты подобного рода, сведения о которых дошли до нашего времени. Его термоскоп представлял собой два стеклянных шара, соединённых стеклянной трубкой. Один шар заполнен водой, другой — воздухом. При нагревании шара, заполненного воздухом, в воде поднимаются пузырьки, свидетельствующие о расширении воздуха;

при нагревании шара, заполненного водой, она поднимается в трубке и падает в шар с воздухом. Таким образом Филон установил, что и вода, и воздух обладают способностью расширяться при нагревании.

Результаты этого опыта использовали в дальнейших изобретениях alexсандрийские механики, самым заметным среди них был Герон Александрийский (около I в. н. э.). Помимо трудов по математике он оставил довольно много сочинений по механике, большая часть которых сохранилась, — это «Пневматика» в двух книгах, «Автоматы», «Военные сооружения» и «Ручная баллиста». Кроме того, в арабском переводе и в сильно искажённом виде дошли три книги его «Механики».

В предисловии к «Военным сооружениям» Герон назвал себя учеником Ктесибия. Так же как и его наставник, он подробно описал инженерные сооружения и механические забавы. Наиболее знаменитыми среди них были двери храма, которые сами открывались, когда зажигали жертвенник, и *золипиа*, или колесо Герона, — первая действующая паровая машина, далёкий предок современных реактивных турбин. Иногда

Автоматы Герона совершенно не похожи на современные. Греческое слово «автоматос» означает всего лишь «нечто, само приводящее себя в движение». Например, французский философ XVII в. Рене Декарт называл автоматами механические часы. В сочинениях Герона этим словом обозначены главным образом различные заводные устройства либо устройства, приводимые в движение текущей водой или сыплющимся песком, преимущественно игрушечные.



ОПТИКА ПОЗДНЕЙ АНТИЧНОСТИ

Помимо технических изобретений, описанных в трактатах по механике, Александрийские учёные проводили также оптические опыты, о которых рассказывается в трудах по оптике и катоптрике. Различие между этими двумя дисциплинами не очень понятно нашим современникам: оптика изучает механизм зрения, образование теней, прохождение света сквозь отверстия, а катоптрика занимается зеркалами и отражением света от них.

Заложенную Евклидом традицию продолжил живший в Александрии древнегреческий учёный Клавдий Птолемей (около 90 — около 160), больше известный сочинением по астрономии «Альмагест». Его трактат по оптике и катоптрике на протяжении многих веков оставался самым авторитетным исследованием оптических явлений. В отличие от Евклида, ограничившегося только геометрическими аспектами оптических явлений, он попытался вскрыть физический механизм бинокулярного зрения (от лат. *bini* — «пара», «два» и *oculus* — «глаз») и объяснить природу цвета.

В трактате Птолемея дана первая из дошедших до наших дней, хотя и ошибочная, формулировка закона преломления. Точнее, она оказалась справедливой лишь для малых углов: учёный утверждал, что отношение угла преломления к углу падения постоянно для данной границы сред (и равно относительноному коэффициенту преломления). Только в XVII в. был открыт правильный закон, отличающийся от закона Птолемея тем, что в нём вместо отношения углов фигурирует отношение их синусов.

Для того чтобы найти этот закон, Птолемей использовал одну из первых экспериментальных установок. Он вывел закон чисто экспериментальным путём, так как никаких теоретических предположений у него быть не могло. Однако, обнаружив правило, связывающее углы падающего и преломлённого лучей, Птолемей совершил некоторую подтасовку, стремясь привести данные своих измерений (выполненных, кстати сказать, с поразительной точностью) в соответствие с ошибочной формулировкой закона. Так что кроме всего прочего он дал миру и первый случай научной недобросовестности.



Клавдий Птолемей. Миниатюра из рукописи XV в.

Ещё одно важное открытие Птолемея находится на границе оптики и астрономии. Он смог объяснить тот факт, что при приближении небесных тел к горизонту скорость их движения уменьшается. Учёный понял: в данном случае происходит то же, что и в классическом опыте с камешком в чашке. Камешек лежит в пустой чашке и поэтому не виден извне, однако если налить в чашку воды — он становится виден, так как луч света преломляется в воде. Человек, стоящий на земле, видит звезду, ушедшую за горизонт, поскольку луч света преломляется в воздухе. По мере приближения звезды к горизонту угол преломления увеличивается и кажется, что звезда по небосводу движется медленно.

Краткая работа «Катоптрика», принадлежащая Герону, в соответствии со вкусами автора посвящена разнообразным оптическим фокусам и чудесам. Однако здесь впервые появился вариационный принцип, подобный тем, которые сыграли значительную роль в механике и оптике XV—XIX вв. Герон обнаружил, что при отражении от поверхности зеркал свет распространяется вдоль линий минимальной длины, а также, что «из всех лучей, падающих из данной точки и отражающихся в данную точку, минимальны те, которые от плоских и сферических зеркал отражаются под равными углами».



учёный рассматривал и теоретические вопросы. Например, в первой книге «Пневматики» он разъяснил, что если бы пустота не существовала, как думали тогда многие философы, то было бы невозможно сжать воздух. «По утверждениям физиков, воздух состоит из крошечных, мельчайших, не видимых нам молекул»; благодаря пустотам между ними его можно сжать и заставить выполнять работу.

Во второй книге «Механики» также есть теоретический раздел, посвящённый пяти простейшим механизмам: вороту, рычагу, блоку, клину (наклонной плоскости) и винту. С тех пор изложение теории этих пяти механизмов стало обязательным для любого теоретического сочинения по механике вплоть до трудов Галилея.

В «Механике» Герона впервые было сформулировано условие равновесия тела на наклонной плоскости. Однако учёному не удалось вывести правильную формулу — она появилась лишь в Средние века.

НАУКА О ПРИРОДЕ В ДРЕВНЕМ РИМЕ

Римская империя была плохим местом для развития наук. Оказалось, что римская культура, прославленная своими поэтами, драматургами, архитекторами, ораторами и правоведами, не способна доказать ни одной новой теоремы и не может открыть ни одного нового закона. Само расширение её границ нередко приводило к происшествиям, самым прискорбным образом отразившимся на всей последующей истории человечества (например, убийство Архимеда во время захвата Сиракуз или пожар в Александрийской библиотеке 47 г. до н. э.). Именно в Древнем Риме началась пауза в развитии естественных наук, затянувшаяся в Европе почти на всё I тысячелетие н. э.



На в общем-то безрадостном фоне римской науки выделяется поэт Тит Лукреций Кар (I в. до н. э.). Хотя он не достиг оригинальных результатов, но тем не менее сыграл важную роль благодаря стилистически точному изложению взглядов своих предшественников.

О Лукреции Каре практически не сохранилось биографических сведений. Святой Иероним Евсевий (около 342—420), христианский писатель

БОГИ И ТЕРМИНЫ

В поэме «О природе вещей» Лукреций утверждал, что причина любых явлений — в законах природы. Разум вполне может их понять, если не боится гнева богов:

*Значит, изгнать этот страх из души и потёмки рассеять
Должны не солнца лучи и не света сиянье дневного,
Но природа сама своим видом и внутренним строем.
За основание тут мы берём положенье такое:
Из ничего не творится ничто по божественной воле.*

Всё существующее порождается материей и её свойствами: «...из материи всё вырастает своей и живёт ей».

Особое значение поэмы Лукреция состоит в том, что в ней была выработана научная латинская терминология. Он сам постоянно жаловался на нехватку слов:

*Не сомневаюсь я в том, что учения тёмные греков
Ясно в латинских стихах изложить затруднительно будет:
Главное, к новым словам прибегать мне нередко придётся
При нищете языка и наличии новых понятий.*



Согласно легенде, около 609 г. (или 610 г.), получив откровение от Аллаха, пророк Мухаммад (около 570—632) выступил в арабском городе Мекка с проповедью новой веры — ислама. В 630—631 гг. мусульмане под руководством Мухаммада подчинили большую часть Аравийского полуострова и образовали новое государство с пророком во главе. В середине VIII — начале IX в. благодаря военным походам арабов были завоеваны некоторые страны Ближнего и Среднего Востока, Северной Африки и Юго-Западной Европы и создано новое могучее государство — Халифат.

и богослов, рассказал о Лукреции, что тот родился в 94 г. до н. э., в зрелом возрасте был отравлен любовным напитком и обезумел, во время кратких просветлений написал несколько книг и покончил с собой в 44 года.

Лукреций в поэме «О природе вещей» изложил основы философии Эпикура. С точки зрения науки о природе важны две идеи поэмы: атомизм, т. е. учение о том, что материя состоит из пустоты и находящихся в непрекращающемся движении атомов, и *агностицизм* (от греч. «агнос-тос» — «недоступный познанию»), т. е. положение о принципиальной непознаваемости Вселенной и недоступности истины. Например, наблюдаемым изменениям Луны можно дать три объяснения: Луна светит не собственным, а отражённым солнечным светом; Луна светит собственным светом, но вокруг неё движется ещё одно невидимое тело, периодически заслоняющее Луну целиком или частично; Луна каждый день рождается заново, имея другую форму.

Согласно Лукрецию, все три приведённых объяснения имеют право на существование и невозможно узнать, какое из них правильно. Поэтому надо успокоиться и принять своё незнание как данность.



На самом деле если бы видимый диск Луны закрывался каким-то другим небесным телом, то линия, ограничивающая освещённую часть диска, сохраняла бы свою форму. В действительности же тень всегда проходит через диаметрально противоположные точки видимого диска, и поэтому кривизна кромки тени постоянно меняется.

ФИЗИКА СРЕДНЕВЕКОВОГО ВОСТОКА

Александрия, задуманная некогда как главный город империи Александра Македонского, постепенно превратилась в римскую провинцию, затем в византийскую и, наконец, к 642 г. попала в руки новых хозяев. Жители Аравийского полуострова, возбуждённые новой воинственной религиозной доктриной — исламом, начали двигаться на запад, вытесняя отсюда сломленных римлян, терпящих тяжёлые поражения от северных соседей-варваров. Арабские учёные, получив доступ к греческим рукописям, проявили к ним гораздо больший интерес, чем римляне. Лишь благодаря многочисленным арабским переводам и комментариям сохранились и позднее были востребованы европейской культурой многие труды античных учёных. Рассуждения древних мыслителей привлекли арабов не столько возможным практическим применением, сколько красотой и строгостью.

Для арабских мыслителей греческие философские тексты, утратив живой и непосредственный характер, превратились в своего рода священные книги (позже нечто подобное произойдёт и в Европе). Их содержание словно окаменело и стало источником бесконечных схоластических упражнении. Священный смысл приобрели даже простые, взятые из быта древних греков предметы, скажем веса или рычаг. Об этом можно су-



дять, например, по «Трактату о римских весах» арабского математика Сабита ибн Курры (836—901).

Родившись в Сирии, Сабит ибн Курра вынужден был бежать оттуда из-за религиозного инакомыслия. Последние годы жизни он провёл в должности придворного астронома в Багдаде — арабской столице, в значительной мере перенявшей традиции греческой Александрии, посвятив своё свободное время сочинению астрономических, математических и механических трактатов.

По структуре «Трактат о римских весах» напоминает аналогичные произведения Евклида и Архимеда, однако в математическом аппарате на смену геометрическим построениям пришёл алгебраический способ рассуждений. Сначала доказывается правило рычага в том виде, в каком оно было представлено у Евклида и Архимеда, затем доказывается, что это правило не зависит от длины подвеса грузов. Попутно Сабит ибн Курра доказывает, что если подвесы не перпендикулярны рычагу, то в качестве плеч нужно рассматривать расстояния от неподвижной точки до оснований перпендикуляров, опущенных от грузов на линию рычага. Дальше теорема распространяется на случай нескольких грузов и т. д.

Всё изложение напоминает сложную, утончённую игру. Её эстетизм подчеркнут названием трактата — ведь речь идёт не о весах вообще, а о «римских весах», о которых когда-то, почти тысячу лет назад, писал великий Евклид в такой далёкой от багдадского двора Александрии, давно превратившейся из прекрасной столицы античного царства в захудалую египетскую деревушку.

Различные разделы физики Аристотеля, в том числе касавшиеся теории движения, были разобраны в многочисленных комментариях арабских философов: Фараби, Ибн Сины, Ибн Рушда (латинизированное имя — Аверроэс) и Бирун и.

Особенно известны стали в Средней Азии, а затем и в Европе труды Абу Али Ибн Сины (около 980—1037), известного на Западе под латинизированным именем Авиценна. Наибольшую славу ему принесли медицинские сочинения, но Ибн Сина также писал о физике, музыке, математике, алхимии, философии. В его знаменитой энциклопедии «Книга исцеления» есть раздел, посвящённый физике, где исследуется философская сторона вопросов движения, пространства, силы, а также вопросы оптики.

В этом разделе Ибн Сина развивает критику аристотелевского учения о движении, начатую александрийским учёным Иоанном Филопоном (VI в.). Согласно Филопону, в момент сообщения телу скорости в него входит некая движущая способность (кинетическая мощь), помогающая телу двигаться после того, как оно покинуло движитель (скажем, руку, которая его толкнула). Ибн Сина ввёл понятие «стремление», переведённое впоследствии на латынь как «импетус». Это «стремление» поддерживает движение брошенного тела, помогая ему преодолевать сопротивление среды (например, воздуха). Пока «стремление», вложенное в тело в момент броска, не израсходуется, тело движется насильственным движением, и только после этого оно движется естественно — вниз, к центру Земли. В XII в. учение Ибн Сины об импетусе стало известно в Парижском университете. Альберт Великий прямо ссылаясь на Ибн Сину, а позже это учение систематически развил Жан Буридан.

Большой интерес для истории науки представляет трактат по минералогии, который Абу Рейхан Мухаммед ибн Ахмед аль-Бируни (973 — около 1050) написал незадолго до смерти. В этом трактате он доказывал неизменность и познаваемость законов природы, не зависящих от веры в Бога. Люди, считал Бируни, склонны



Авиценна.
Старинная гравюра.

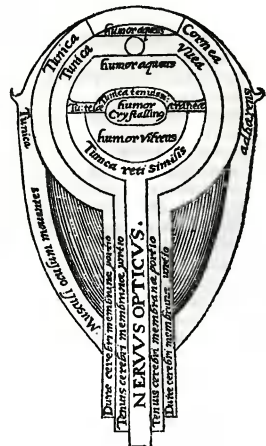
Плечо силы — кратчайшее расстояние от данной точки (центра) до линии действия силы, т. е. длина перпендикуляра, опущенного из центра на эту линию.

Абу Наср ибн Мухаммед аль-Фараби (870—950) родился недалеко от современного Ташкента. Из-за неблагоприятных политических обстоятельств он ещё ребёнком вместе с отцом переселился в Багдад, а затем скитался по Сирии и Египту. Он автор первых арабских комментариев к естественнонаучным книгам Аристотеля, неизвестным в то время на христианском Западе, — трактатам «Физика», «О небе», «Метеорология». Кроме того, Фараби написал комментарий к «Альмагесту» Птолемея и сочинениям Евклида.



Авиценна с учениками.

Структура глаза.
Рисунок из латинского
перевода труда
аль-Хайсама
«Сокровище оптики»,
изданного в XVI в.



приписывать «Божественной премудрости то, чего не знают о законах природы». Лишь познав эти законы, можно понять, почему поднимается вода в фонтанах, отчего бывают дождь и грозы. Человек, пытающийся спастись от грозы или дождя при помощи молитвы или заклинания, так же смешон, как человек, который надеется молитвой поднять воду в фонтане. И тот и другой не знают «действительных причин явлений».

Особо важной задачей Бируни считал определение удельного веса различных минералов, что привело учёного к некоторым теоретическим вопросам статики. Однако гораздо больших успехов здесь достиг его последователь аль-Хазини, написавший в 1121—1122 гг. в Хорезме «Книгу о весах мудрости». Весы, описанные в книге, позволяют отличить чистый металл от подделок, распознавать металлические сплавы, определить настоящую ценность разных монет. Рассказ о принципах работы этого инструмента сопровождается рассмотрением общих вопросов механики: определения центров тяжести, потери веса тела в воде, равновесия плавающих тел и т. п.

Наиболее яркие достижения в оптике связаны с именем Ибн аль-Хайсама (965—1039), которого в Европе называли Альгасен. Именно ему удалось сделать существенные добавления к оптике Птолемея, и в том виде, в каком законы этой науки были сформулированы им в трактате «Сокровище оптики» (семь книг, латинский перевод осуществлён в XII в.), они оставались неизменными до сочинений Иоганна Кеплера. Прежде всего Ибн аль-Хайсам окончательно отказался от платоновской теории «света очей», согласно которой главная роль в механизме зрения принадлежит лучам, испускаемым глазами. «Естественный свет и цветовые лучи воздействуют на глаз» — таково его утверждение.

Далее Ибн аль-Хайсам установил такое правило: лучи, исходящие от рассматриваемого тела, воздействуют на воспринимающий орган глаза, — по его представлениям, это передняя поверхность хрусталика (такому заблуждению суждено было продержаться до открытий Кеплера). Тогда между точками объекта и изображения возникает соответствие по следующему правилу: обе точки должны лежать на прямой, проходящей через геометрический центр глаза.

Значительная часть «Сокровища оптики» посвящена чудесам, иллюзиям и галлюцинациям; она содержит большое количество любопытных наблюдений. Это направление оптики было особенно популярно во времена Возрождения.

ПЕРВОЕ ЕВРОПЕЙСКОЕ ВОЗРОЖДЕНИЕ. ПЕРЕВОДЧИКИ И КОММЕНТАТОРЫ

Повисшая над Европой многовековая пауза в изучении законов природы была прервана лишь в X в., когда вновь стали возникать города и появились предпосылки новой технологической волны. Источником преобразований могло стать только научное знание, но европейцы постигали это очень медленно. Первый импульс, благодаря которому в Европу начала возвращаться античная мудрость, сохранившаяся в старинных рукописях и арабских книгах, был дан Гербертом из Ориака (около 940—1003), вошедшим в историю также под именем Папы Римского Сильвестра II (999—1003 гг.). Свою уникальную учёность Герберт приобрёл в арабской Испании, где провёл три года в монастыре Санта-Мария де Рипой, знаменитом прекрасной библиотекой. Некоторые биографы рассказывают и о его пу-



тешествии в Индию. Таким образом, Герберт соприкоснулся с двумя наиболее образованными нациями того времени — индийцами и арабами, от которых, будучи человеком необычайно любознательным, перенял страсть к книгам. К концу жизни Герберт собрал больше четырёх сундуков рукописей по математике, метафизике, алхимии, астрологии и магии. Именно он ввёл в обиход европейцев индо-арабскую систему счисления, заменившую неуклюжие, очень плохо приспособленные к арифметическим выкладкам римские цифры.

Герберт начал работу по переводу арабских и древнегреческих текстов на латынь, которая продолжалась и после его смерти. В эту эпоху, получившую название эпохи переводчиков, несколько поколений учёных посвятили жизнь переводу основных произведений античных и арабских авторов. Рукописи попадали в Европу через Византию, страны ислама (прежде всего через арабскую Испанию), а также через Индию. За два века — с середины XI до середины XIII столетия — на латынь переведено большинство дошедших до нас сочинений древнегреческих и арабских учёных и писателей.

Одновременно стало развиваться образование. Старейшие европейские университеты были открыты в Болонье в конце XI в., в Оксфорде в XII в., ещё один в Париже (Сорбонна) в 1215 г. Основой для университетов служили, как правило, общеобразовательные школы (*лат. studia generalia*), где изучались логика, риторика и грамматика, или медицинские колледжи.

Последующие несколько веков учёные главным образом стремились осмыслить и прокомментировать вновь открытую античную литературу. Эпоха переводчиков сменилась эпохой комментаторов.

Одним из первых и наиболее значительных комментаторов был Ро-

берт Гроссетест (около 1175—1253), английский философ и естествоиспытатель из Оксфордского университета. Его комментарии к трактатам Аристотеля «Вторая аналитика» и «Физика», по сути, сформировали представления о научном методе и роли эксперимента в исследованиях природы для всего позднего Средневековья. Именно в борьбе с этими представлениями создавались новые взгляды в конце эпохи Возрождения.

Особый интерес Гроссетеста вызвала оптика, причём в несколько необычном контексте по сравнению с трудами арабских учёных. Согласно библейской «Книге бытия», свет был первым Божественным творением, следовательно, утверждал Гроссетест, он является посредником, передающим созидательный импульс от Бога миру. Распространившись в мире, свет создал пространство и материю; отразившись от внешней сферы Космоса, он затвердел, образовав прочие небесные сферы. Так что понять законы распространения света — значит приблизиться к постижению тайны Божественного сотворения мира. Это восприятие оптики в большой степени перенял ученик Гроссетеста монах-францисканец Роджер Бэкон (около 1214—1292), английский философ и естествоиспытатель.

В XIV в. на долю жителей Европы выпали неслыханные до этого времени потрясения. Столетняя война (1337—1453 гг.), чудовищный голод, пандемия «чёрной смерти» — чумы, свирепствовавшей в Европе в 1348—1350 гг., — уменьшили её население более чем в два раза. Всё это, конечно, не способствовало интеллектуальному прогрессу. Однако именно тогда были написаны наиболее значительные сочинения по математике и её приложениям в различных областях знания, например в теории движения и механике, т. е. теории простейших механизмов (статике).



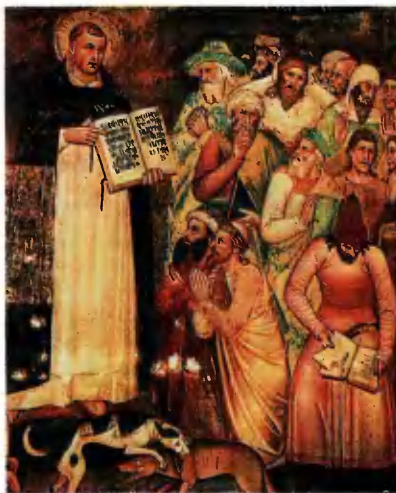
Папа Сильвестр II
(Герберт из Орийака).
Э. Шевиньяр.
Гравюра на дереве.

Особенно много произведений перевёл Герард Кременский (около 1114—1187). Благодаря ему Европа познакомилась с трудами Евклида, Птолемея, Архимеда, Гиппократы, Галена, Фараби, Авиценны. Арабский язык Герард изучал в испанском городе Толедо (там он и умер).





ми и античной мудростью, с другой — пыталась ввести эту мудрость в христианский религиозный контекст. Это, разумеется, не всегда удавалось. Например, в Парижском университете несколько раз на протяжении XIII в. запрещалось преподавать натурфилософию Аристотеля. Однако уже в XIV столетии, в значительной степени благодаря работам Святого Фомы Аквинского (1225 или 1226—1274) схоласты смогли преодолеть противоречие между аристотелевской натурфилософией и христианскими догматами и прочно связать их друг с другом. Возникшее учение получило название «томизм» (латинское имя его создателя — Thomas), а в XVI в. на Тридентском соборе оно приобрело статус официальной философской доктрины католичества. Именно представители томизма, т. е. продукта синтеза учения Аристотеля с христианством, а не учения Аристотеля в чистом



Святой Фома
стыдит еретиков.
Деталь фрески.

виде, выступили потом главными оппонентами медленно формирующегося нового взгляда на природу, названного позднее «научный метод».

АРХИМЕД ИЗ СИРАКУЗ

Самый выдающийся механик и геометр древности — Архимед (около 287—212 до н. э.) родился в городе Сиракузы на острове Сицилия, в семье математика и астронома Фидия. Вероятно, именно отец дал ему первые уроки астрономии и геометрии. Уже в юности Архимед был знаком с «Началами» Евклида. Впоследствии в своих работах он неоднократно ссылался на это знаменитое сочинение.

Фидий был человеком небогатым, но состоял в родстве с неким Гиероном, сражавшимся в войске Пирра во время Итальянского похода (280 г. до н. э.). В той войне Гиерон сумел так себя проявить, что после возвращения Пирра в Грецию стал царём в Сиракузах. По-видимому, это улучшило материальное положение его

родных и позволило Фидию отправить сына учиться в Александрию.

В то время Александрия и Афины были признанными центрами образования в Средиземноморье, и если в литературе и философии первенство принадлежало Афинам, то лучших астрономов, математиков и медиков, без сомнения, собрала столица Птолемеев. Сюда и отправился Архимед. Учёные жили при Александрийском музее. Этот легендарный научный центр был основан царём Птолемеем I Сотером. Он хотел привлечь в Александрию всех крупных учёных и, освободив их от забот о хлебе насущном, предоставить неограниченный досуг для занятий наукой. Учёные мужи жили при храме муз на полном содержании царя; в огромном зале устраивались



Платон.
Миниатюра
из рукописи XIII в.

Схоласты — представители господствующего в эпоху Средневековья направления религиозной философии. Они стремились согласовать достижения античной философии и науки с догмами христианства.

В Мертонском колледже Оксфордского университета возникла школа математиков, получившая известность под названием Мертонской. Её членами были Томас Бардвардин (1290—1349) и его ученики — Уильям Хейтесбери, Джон Дамблтон, Ричард Киллингтон и Ричард Суйнсхед, которых за своеобразный для того времени подход к описанию действительности прозвали *калькуляторами* (лат. *calculatores*). Они пытались найти количественную взаимосвязь между причиной движения и её эффектом, иначе говоря — между силой и скоростью. Сложность задачи состояла в том, что не было ни методов измерения скорости и силы, ни способов теоретического определения этих величин. Тем не менее калькуляторам удалось прийти к понятию равноускоренного движения и сформулировать правило, согласно которому такое движение «эквивалентно» (в смысле равенства пройденных путей) равномерному движению со средней скоростью.

Аналогичное правило нашли и учёные Парижского университета Жан Буридан (около 1300 — около

1358) и Николай Орём (1323—1382). Буридан обратил внимание на необъяснимость с точки зрения физики Аристотеля движения брошенного тела (например, камня), которое происходит, когда на тело не действует никакая сила. Учёный предположил, что причиной движения может быть не только внешняя сила, но и количество движения, накопленное самим телом. Таким образом Буридану удалось вплотную подойти к выводу о том, что тело, на которое действует постоянная сила, должно двигаться не с постоянной скоростью, как утверждал Аристотель, а с постоянным ускорением. И хотя этого вывода он не сделал, важность понятия равноускоренного движения стала ясна его ученику Орему, сумевшему разработать специальную технику графического представления такого движения. Орём утверждал: всякое качество, в том числе и скорость, может быть изображено в виде отрезка, протяжённость которого называется интенсивностью качества. Следовательно, между различными качествами, а значит, и скоростями возможно установить отношение, как между отрезками.

В форме комментария к Аристотелю возродилось и учение о простых механизмах. Ещё в XII в. было написано несколько трактатов о пяти простейших механизмах. Автор, Иордан Неморарий (между XI и XIII вв.), кроме всего прочего дал в них одно из первых правильных решений задачи о равновесии тел на наклонной плоскости, с которой не справились alexandрийские механики Герон и Папп. Сочинения Неморария высоко оценил и Роджер Бэкон, заметивший, что наука о тяжестях «прекрасна и слишком трудна для людей, не искушённых в опытным познании причин, относящихся к движению лёгких и тяжёлых тел».

Западно-европейская схоластическая мысль, с одной стороны, преклонялась перед античными текста-





Атлант, держащий земной шар, и Архимед, измеряющий шар циркулем.

совместные трапезы, во время которых они обсуждали различные научные вопросы и давали уроки окружающим их ученикам. Деньги из государственной казны выделялись щедро. Например, Эратосфену, ре-

шившему измерить окружность Земли, пришлось проводить наблюдения из Родоса, Александрии и Сиены. Царь финансировал эти, очень дорогие по тем временам, экспедиции. В результате окружность удалось определить с феноменальной точностью — ошибка составила всего 300 км.

Очевидно, что Архимед не смог бы найти лучшего места для развития своего гения. Здесь он повстречал знаменитого математика и географа Эратосфена и астронома Конона. С ними, а также с учеником Конона Досифеем Архимед поддерживал отношения и после отъезда из Александрии. Им математик посылал свои работы, сопровождая каждую письмом. По форме большинства сочинений Архимеда производят впечатление посланий друзьям. В Мусейоне учёный создал, возможно, первую из прославивших его машин — «улитку», предназначенную для подачи воды на поля. В основе её конструкции был вал с винтовой поверхностью, помещённый внутри на-

ПРОВОЗВЕСТИК БУДУЩЕГО

В своей работе «Псаммит» («Исчисление песчинок») Архимед ссылается на одного из самых известных астрономов того времени — Аристарха Самосского. Аристарх был одним из первых исследователей звёздного неба, предположивших, что не Солнце вращается вокруг Земли, а Земля вокруг Солнца. За это смелого астронома изгнали из Афин. Вполне вероятно, что и Архимед принял гелиоцентрическую систему устройства мира, поскольку он с уважением отзывался о работах Аристарха, бывшего в то время в опале у официальной греческой науки.

Интересна история открытия текста письма Архимеда Эратосфену. Оно обнаружено в 1906 г. при-

ват-доцентом Петербургского университета Пападопуло-Керамевсом в библиотеке одного из иерусалимских монастырей. Под строками богословского трактата просматривались плохо смытые буквы более раннего текста. Такие рукописи не редкость: в Средние века пергамен был очень дорог и переписчики частенько смывали или стирали текст со страниц древних книг, а пергамен вновь использовали. Пападопуло-Керамевс понял, что древний текст относится к математике. По приведённой им выдержке датский историк математики Гейберг определил, что написанное принадлежит Архимеду.

Среди работ, восстановленных Гейбергом, было и послание Эратосфену. В этом письме сиракузский математик сообщает, что Демокрит первый сформулировал,

хотя и не дал доказательств, теоремы об объёме конуса и пирамиды. Архимед пишет также, что методы, использованные им и первым атомистом при решении подобных задач, содержат много общего. Он разлагает конусы и шары на очень тонкие кружки (цилиндры) и, доказывая нужное ему предположение для одного из них, отмечает, что это верно и для остальных. Потом математик делает вывод: «Так как всё тело состоит из этих кружков и целиком заполнено ими, то утверждение верно для всего тела». В этом умозаключении явно прослеживается влияние идей атомистов. А метод, разработанный Архимедом, стал, возможно, первым в истории науки прообразом математического анализа, впоследствии усовершенствованного Ньютоном и Лейбницем.



клонной трубы и получивший название «архимедов винт». Вращаясь, спираль винта поднимала воду на высоту до 4 м.

Из Александрии Архимед вернулся в родные Сиракузы. Здесь учёный под покровительством Гиерона, не обременённый денежными проблемами, полностью посвятил себя любимой геометрии.

Архимед, согласно многочисленным свидетельствам, относился к довольно редкому типу людей, для которых не существует ничего, кроме целиком поглотившей их страсти. Для него такой страстью стала геометрия. Плутарх писал про Архимеда: «Нельзя не верить рассказам, будто он был тайно очарован некой сиреной, не покидавшей его ни на миг, а потому забывал о пище и об уходе за телом, и его нередко силой приходилось тащить мыться и умащаться, но и в бане он продолжал чертить геометрические фигуры на золе очага и даже на собственном теле, натёртом маслом, проводил пальцем какие-то линии — поистине вдохновлённый Музами, весь во власти великого наслаждения».

Несомненно, как механик и математик, Архимед на несколько столетий опередил своё время. Ему приписывают до 40 открытий в области практической механики, большинство из которых до наших дней не сохранилось. Сиракузского учёного можно назвать предшественником Ньютона и Лейбница — родоначальников дифференциального и интегрального исчисления. Исследуя спираль, которую впоследствии назвали «архимедовой», он дал построение касательной к ней, — следовательно, Архимед был близок к понятию производной. Он также нашёл сумму бесконечной убывающей геометрической прогрессии — это был первый в истории математики бесконечный ряд. И всё же сам учёный особенно ценил свои открытия в геометрии: он составил формулы вычисления пло-

щадей различных геометрических фигур и объёмных тел, в том числе площади эллипса, параболического сегмента, площади поверхностей конуса и шара. Занимаясь вычислением отношения длины окружности к её диаметру, Архимед впервые предложил для этой величины обозначение «пи» и достаточно точно определил его цифровое значение: в пределах от $22/7$ до $223/71$.

Согласно самой известной легенде об Архимеде, однажды Гиерон поручил ему найти способ проверить содержание золота в жертвенном венце. Царь подозревал, что ювелир, изготовивший корону, утаил часть золота и заменил его более дешёвой бронзой. Перед Архимедом стояла довольно сложная задача: определить объём короны сложной формы. Не переставая думать над этим, он полез в ванну и увидел, что, погрузившись в воду, своим телом вытеснил часть жидкости на пол бани, причём его тело стало легче. И тут его осенило. Архимед выскочил из ванны и, забыв об одежде, побежал по улицам Сиракуз, крича: «Эврика!» («Нашёл!»). Так был открыт первый закон гидростатики, в формулировке учёного гласивший: «Всякое тело при погружении в жидкость теряет

«Эврика!»
Иллюстрация
из трактата
«Десять книг
об архитектуре»
Витрувия. Базель.
Издание 1575 г.





в весе столько, сколько весит вытесненная им жидкость». Закон был назван в честь его создателя законом Архимеда.

Механические игрушки, послужившие образцами для грозных машин, впоследствии остановивших римское войско, видимо, никогда Архимеда всерьёз не интересовали. Он был сыном своего времени, а целью занятий наукой тогда считалось чистое, бескорыстное познание. Первых геометров, Евдокса и Архита, создавших механические конструкции для того, чтобы сделать преподавание геометрии более наглядным, резко критиковал Платон, чья философская школа была тогда ведущей в Аттике. Платон упрекнул их в том, что они губят достоинства геометрии, так как она «от бестелесного и умопостигаемого опускается до чувственного и вновь сопрягается с телами». В результате этого механика была отделена от традиционной геометрии и считалась чисто военной наукой.

Тем не менее ставшая притчей во языцех рассеянность учёного и его подчёркнутое увлечение максимально оторванной от жизни геометрией не помешали Архимеду создать машины, вызвавшие восхищение как его «приземлённых» современников,

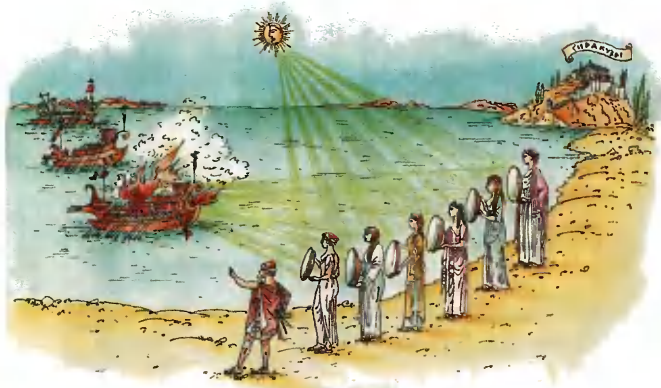
так и учёных последующих поколений. Именно благодаря не имеющим аналогов сокрушительным механическим монстрам, перед которыми дрогнула одна из самых сильных армий того времени, имя великого математика и попало в труды таких серьёзных военных историков, как Плутарх, Полибий, Тит Ливий.

А началось всё с письма Архимеда царю Гиерону, в котором математик утверждал, что, применяя незначительную силу, возможно переместить очень большой груз. Именно тогда из уст Архимеда впервые прозвучали слова: «Дайте мне точку опоры, и я сдвину землю». Гиерон потребовал доказательств. По приказу учёного на берег вытащили трёхмачтовый грузовой корабль и наполнили его кладью. Затем на судно забралась большая команда. Архимед, сев поодаль, безо всякого напряжения вытягивал канат, пропущенный через составной блок — полиспаст. Он придвигал корабль к себе так медленно и ровно, будто тот плыл по воде. Царь был поражён. Поняв всю мощь механизмов, он убедил учёного построить несколько боевых машин. Сам Гиерон не успел увидеть их в действии: машиныгодились жителям Сиракуз через несколько лет после смерти царя.

Сиракузы, долгое время занимавшие нейтральную позицию в споре Рима с Карфагеном, решили выступить на стороне последнего. В 214 г. до н. э. римский полководец Марцелл осадил город. Его армия встала у стен Сиракуз; флот, состоявший из 60 кораблей, подошёл с моря. Солдаты Марцелла на связанных друг с другом восьми кораблях установили осадную машину, которую римляне называли «самбука», — она была похожа на одноимённый музыкальный инструмент.

Плутарх так описал случившееся: «Римляне напали и с суши и с моря, и сиракузляне притихли от страха. Но тут Архимед привёл в действие свои

Талант (от греч. «талантос» — «вес», «веса») — самая крупная весовая и денежно-счётная единица Древней Греции, Египта, Вавилона и ряда областей Малой Азии.





машины». В неприятеля полетели стрелы разных размеров и огромные каменные глыбы, сокрушавшие всё на своём пути. На вражеские суда стали опускаться укрепленные на стенах брусья и топить их, сильно толкая. С помощью огромных железных рук и клювов, похожих на журавлиные, защитники Сиракуз хватили корабли Марцелла, вытаскивали из воды носом вверх, а потом кормой вперёд пускали на дно или бросали на камни. Самбуку разбили тремя камнями, каждый весом в 10 талантов, выпущенными из огромной катапульты. По некоторым свидетельствам, Архимед уничтожил множество кораблей неприятеля, используя совершенно неожиданный способ. Женщины Сиракуз, собравшиеся на берегу, направляли с помощью бронзовых зеркал солнечные лучи на корабли римлян, отчего смола на них вспыхивала.

Римская армия отступила. Было решено ночью незаметно подойти вплотную к стене, чтобы оказаться вне досягаемости машин Архимеда. Но учёный предусмотрел и это: из просверленных в стене отверстий машины, бьющие на небольшие расстояния, обрушили на армию Марцелла град стрел. На головы римлян со стен посыпались камни. Марцелл назвал Архимеда «Бриареем от геометрии, который берёт из моря наши суда и с презрением бросает их прочь и превзошёл сказочных сторуких великанов, столько снарядов он в нас мечет». Видя, что солдаты запуганы до крайности и впадают в панику, как только заметят над крепостной стеной верёвку или кусок дерева, думая, что это какое-то разрушительное устройство Архимеда, полководец решил отказаться от наступательных действий и положиться на время.

Два года благодаря машинам Архимеда и подземной системе снабжения Сиракуз водой, также созданной по проекту учёного, жителям города удавалось сдерживать натиск армий

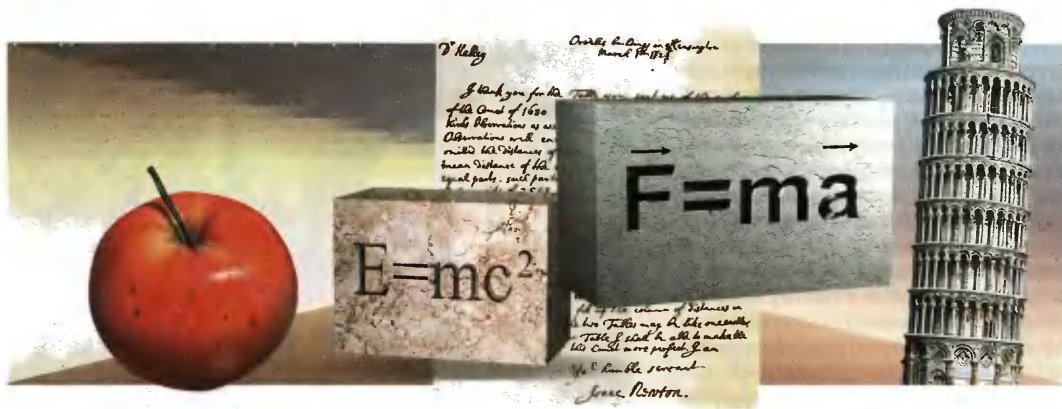


Марцелла. Но в 212 г. до н. э., обнаружив и разрушив систему водоснабжения Сиракуз, а также воспользовавшись тем, что осаждённые во время празднеств, посвящённых богине Артемиде, опьянели и потеряли бдительность, римляне ворвались в город. Согласно легенде, legionер застал Архимеда в саду, когда тот пытался решить очередную геометрическую задачу, не обращая ни малейшего внимания на происходящее в городе. Солдат попытался силой увести его. Архимед закричал: «Не трогай мои чертежи». Legionер в гневе зарубил учёного мечом. По словам Плутарха, убийство Архимеда больше всего расстроило Марцелла, который надеялся поставить талант учёного на службу Риму. Он изгнал его убийцу из армии, а математика приказал похоронить с почестями.

Архимед был погребён в полном соответствии с завещанием: на могильном камне изображён шар, вписанный в цилиндр. Определение соотношений объёмов этих двух тел Архимед считал своим лучшим открытием и просил изобразить их на своём надгробии.

Бриарей — в греческой мифологии сын Урана и Геи. Чудовище с 50 головами и сотней рук.





ЦАРИЦА НАУК

КАК ФИЗИКА СТАЛА НАУКОЙ

В XV в. в Западной Европе (в Италии с XIV в.) началась новая эпоха — Возрождение (Ренессанс). Не только монахи, но и вполне светские люди зачитывались рукописями древних римлян и греков, прямыми потомками которых они себя вдруг почувствовали. На смену суровому аскетизму Средних веков пришла любовь к жизни в её самых светских и чувственных формах. Вслед за античными знаниями вернулись и античные ценности: красота, гармония и свобода личности. К XVII в. наука не была больше ограничена стенами монастырей и университетов, на протяжении многих веков оказавшихся её единственным прибежищем. О математических доказательствах заговорили европейские монархи. Они заинтересовались движениями небесных светил, и далеко

не всегда в связи с их влиянием на судьбу. Впервые к знанию потянулись дворяне — те, кто ранее мог полностью согласиться со словами римского полководца Гая Марция: «У меня не было охоты его [греческий язык]

Учёный монах в келье.
Средневековая
книжная миниатюра.





учить, ведь он нисколько не прибавил мужества тем, кто его знал».

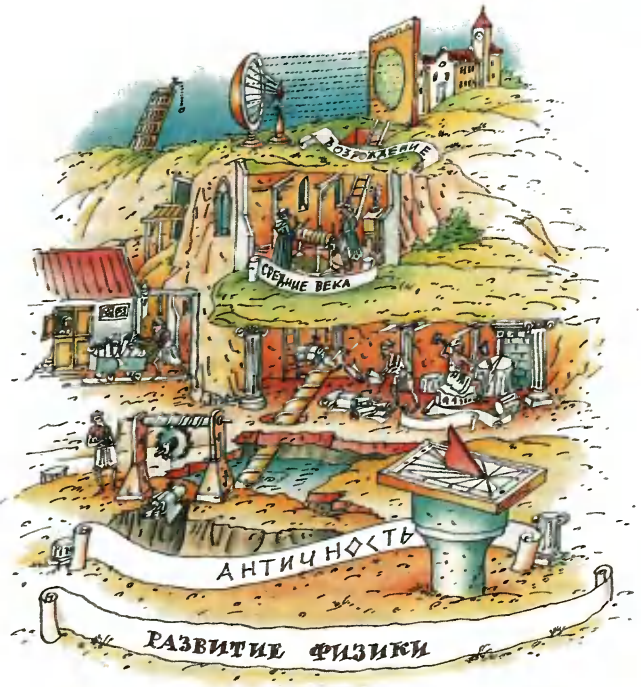
Христианский фанатизм сменился неслыханным вольнодумством: мало какая ещё эпоха в истории христианской цивилизации породила такое количество еретических и даже откровенно безбожных сочинений. Иногда античным богам, героям и философам поклонялись как святым — например, Аристотелю, а Юпитера даже отождествляли с Иисусом Христом.

В ходе начавшейся в XVI в. Реформации (от *лат.* *reformatio* — «преобразование») Христианская церковь утратила своё единство, и кроме католицизма в Западной Европе появилось несколько направлений протестантизма. По всем странам некогда единого католического мира прокатилась волна жестоких и кровопролитных религиозных войн.

Кризис средневекового мировоззрения привёл и к радикальной перемене в отношении к науке. Стандартная схоластическая формула, что всякое знание подчинено и служит целям богословия, со временем начала вытесняться новыми идеями, утверждающими самостоятельную ценность науки и даже её независимость от богословия.

Интерес ренессансного мыслителя проходит путь от Божественного к человеческому, природа поражает и увлекает его многообразием и красотой своих проявлений. Он начал изучать природу как открытую книгу, которая даёт знание, не содержащееся в Священном Писании, однако приближающее его по своему могуществу к Богу. Правда, в эпоху Возрождения физика ещё не выделялась из философии, этот переход только подготавливался. Интерес к природе не связан пока с решением конкретных практических задач, и познание природы скорее является делом художника, чем учёного.

С нарождающейся наукой связывались самые необычные надежды.



«Знание — сила», — заявлял английский философ нового поколения Фрэнсис Бэкон (1561—1626). Он мечтал о том, чтобы европейские христиане, расколовшиеся в результате Реформации в вере, примирились в знании. Объединяющая сила науки заключается в её открытости разуму: всякий сомневающийся может сам проверить любое утверждение, отказавшись от предрассудков.

Фрэнсис Бэкон ошибся: кровопролитная Тридцатилетняя война (1618—1648 гг.) показала, что знание законов математики и движения светил ничуть не мешало вражде и убийствам, точно так же как не мешало этому христианское смирение. Однако подлинная сила нового знания проявилась несколько позднее, когда развернулась индустриальная революция XVIII столетия.

■ Тридцатилетнюю войну вели с одной стороны испанские и австрийские Габсбурги и католические князья Германии, а также Речь Посполитая (поборники католицизма), с другой — германские протестантские князья, Франция, Швеция и Дания, поддержанные Англией, Голландией и Россией (выступали под знаменем протестантизма). В результате победу одержала антигабсбургская коалиция.



ИЗ «КЕЛЬИ ПОМЫСЛОВ» НАВСТРЕЧУ ПРИРОДЕ

Применение метода математических доказательств, который был открыт древними греками и развит александрийскими, а затем и арабскими учёными, к изучению явлений природы позволил превратить физику из раздела философии во вполне самостоятельную дисциплину — физику уже в современном понимании слова. Именно в этом была суть научной революции, произошедшей в XVII в. Новая физика начала описывать природу на языке точных количественных понятий, имеющих математическое определение и связанных с измеряемыми величинами. Для того чтобы рассчитать значение физической величины математически, нужна теория, а для её измерения необходим эксперимент.

Описывать явления при помощи величин, имеющих численное выражение, — совсем не значит уметь их измерять. Учёные Средневековья, например, нередко использовали «градус скорости» для численного описания «интенсивности» движения, т. е. его скорости. Их совершенно не беспокоило, что способ измерения этого градуса отсутствует. Средневековые теории не имели целью опи-

сать реальные движения, происходившие в природе. В них ценилась логическая безупречность и красота рассуждений. Но всё же без таких теорий научная революция оказалась бы невозможной.

Ренессансный мыслитель стремился покинуть «келью своих помыслов», как обозначил итальянский поэт Данте Алигьери обычное для средневекового учёного состояние отрешённости от внешнего мира и погружённости в абстрактные умозаключения.

Родоначалником экспериментального метода иногда называют английского философа и естествоиспытателя Роджера Бэкона (около 1214—1292). Свои сочинения, как было принято в то время, Роджер Бэкон назвал довольно бесхитростно: «Сочинение побольше», «Сочинение поменьше» и «Сочинение третье», но высказал в них мысли, вполне достойные гораздо более поздних времён. Например, такую: «Опытная наука — царица умозрительных наук и имеет за собой... важные преимущества. Она исследует тайны природы своими собственными силами». Или такую: «Без опыта ничто не может быть узнано достаточным образом».

Однако слово «опыт» имеет у Роджера Бэкона непривычный для нас смысл, что видно, в частности, из следующего высказывания: «Опыт может быть двояким: один посредством внешних ощущений... но этот опыт недостаточен для человека, потому что он не полностью говорит о вещах телесных и ничего не говорит о духовных. Значит, необходимо, чтобы ум человеческий использовал другой опыт». По мысли Бэкона, это опыт Святых Отцов, который они почерпнули из озарений свыше, а не из одних только внешних ощущений.

В «Сочинении побольше» Бэкон высоко оценил роль математики: «Математика — дверь и ключ к науке».

Александрия — город в Египте на Средиземном море, основанный Александром Македонским в 332—331 гг. до н. э. При правителях из династии Птолемеев (305—30 гг. до н. э.) она была столицей Египта и центром эллинистической культуры. Впоследствии Александрия стала одним из центров раннего христианства. Значение Александрии как культурной и научной столицы Востока сохранялось и в Средние века.





А некоторые его главы имеют названия: «Глава... в которой показывается сила математики в науках и в делах и во всяческих занятиях в мире», «Глава... в которой доказывается рассуждением, что всякая наука нуждается в математике».

Элементы математического и экспериментального подходов к познанию мира можно найти и в трудах другого учёного позднего Средневековья, Альберта Саксонского (1316—1390). Два его наблюдения сыграли важную роль в последующем развитии науки. Во-первых, он обратил внимание на то, что центр тяжести может не совпадать с геометрическим центром тела. Во-вторых, Альберт Саксонский признал: свободное падение не является равномерным движением (как следовало из физики Аристотеля), иначе говоря, скорость падающего тела не остаётся постоянной. По его мнению, скорость должна быть пропорциональна либо пройденному пути, либо затраченному времени.

Учёные эпохи Возрождения постепенно приближались к современному пониманию того, что такое опыт. В отличие от простого наблюдения опыт разделён на отдельные эксперименты. В каждом из них предполагается активное воздействие экспериментатора на природу, изолирующее

изучаемое им явление от посторонних факторов. Если пассивное наблюдение — монолог природы, то эксперимент сходен с диалогом: учёный задаёт вопрос, а природа на него отвечает. При этом каждый вопрос основывается на определённых *априорных* (от *лат.* *a priori* — «из предшествующего»), доопытных, представлениях о явлениях, которые затрагивает эксперимент. А поскольку в мире нет ничего изолированного, не смешанного, то экспериментатору приходится прилагать особые усилия (например, собирать экспериментальную установку), чтобы наблюдать интересующее его явление в чистом виде.

В частности, философ и учёный Николай Кузанский (настоящее имя Николай Кребс; 1401—1464) предложил способ определить, сколько первоэлементов: земли, воды и воздуха — содержится в дереве. Нужно взять кусок дерева и взвесить его, затем сжечь и взвесить то, что осталось. Вес золы — это вес земли, разница между изначальным весом и весом золы будет равна весу воды (зола, согласно аристотелевской физике, состоит только из элемента земли, а воздух веса не имеет). Взвешивая один и тот же кусок дерева в воздухе, воде и масле, можно определить и сколько в нём воздуха.

Саксония — средневековое княжество в Восточной Германии.





Рембрандт. Фауст.
Гравюра. Около 1652 г.

Описанная процедура очень близка к тому, что можно было бы назвать экспериментом. Кузанский неявно предполагает: суммарная масса всех входящих в тело компонентов должна сохраняться независимо от происходящих с телом превращений. Этот принцип в XVIII столетии будет обоснован как один из главных в естествознании и получит название *принцип сохранения материи*.

Экспериментальный метод осмысливался с философских позиций Фрэнсисом Бэконом и окончательно сформировался в сочинениях Гали-

лео Галилея, которые состоят главным образом из описаний последовательных стадий экспериментов. При этом оказалось, что во многих случаях эксперименты даже можно не проводить: достаточно лишь четко сформулировать вопрос природе, и ответ будет ясен.

В ПОИСКАХ ТАЙНОГО ЗНАНИЯ

В середине XV столетия флорентийский гуманист и философ Марсилио Фичино (1433—1499) взялся полностью перевести на латынь диалоги Платона. Он же возглавил флорентийскую Платоновскую академию (основана в 1459 г.), которая объявила своей основной целью изучение и пропаганду философии Платона и его последователей.

Платонизм как философское учение утверждает существование наряду с миром вещей также мира идей, поэтому его представителей всегда отличал повышенный интерес к тайному, или оккультному (от *лат.* *occultus* — «тайный», «сокровенный»), знанию. Маги и чародеи, астрологи и алхимики наводнили Европу. Многие монархи считали престижным собирать их у себя при дворе. Больше других преуспел в этом император Священной Римской империи Рудольф II Габсбург (1576—1612 гг.), получивший даже прозвище Короля Алхимиков. Далеко не все среди них были шарлатанами, некоторые сделали важные научные открытия и исследовали неизвестные прежде явления природы.

Хотя алхимия и не привела к открытию «философского камня», однако позволила получить много ценных сведений о химических соединениях и их реакциях. Астрология, не слишком преуспев в том, что касается предсказаний судьбы, способствовала развитию наблюдательной астрономии. Так называемая нату-

ГУМАНИСТЫ

Слово «гуманизм» (от *лат.* *humanus* — «человеческий», «человечный») имеет по крайней мере два значения. В первом и наиболее употребительном в настоящее время значении оно подразумевает интерес к человеческой индивидуальности вообще, признание прав и свобод личности, понимание блага человека как наивысшей ценности. Но в XV в. это слово имело другой смысл: изучение классических рукописей, реставрация античной латыни и как следствие усвоение ценностей и идеалов греко-римской эпохи.

Само название движения — «гуманизм» — происходит от латинского *studia humanitatis*, что означает «совокупность гуманитарных наук» — грамматики, риторики, истории и этики. Первым гуманистом часто называют знаменитого итальянского поэта Франческо Петрарку (1304—1374). Среди наиболее видных представителей этого движения — Джованни Боккаччо (1313—1375) и Поджо Браччолини (1380—1459).





ральная магия, объяснявшая физические явления симпатиями и антипатиями «ангелов» или «демонов» различных предметов по отношению

друг к другу, способствовала исследованию природных явлений — от «искривления» световых лучей при помощи «оптических стёкол» и зеркал

«ДЕМОНИЧЕСКИЙ ОБМАН»

Особое внимание в сочинениях по натуральной магии уделялось оптике. В христианской традиции зрение всегда считалось самым обманчивым из всех человеческих чувств. Демоническим обманом считали, например, кажущийся излом палки, опущенной в воду. Сохранились решения различных церковных инстанций, запрещающие верующим пользоваться очками, так как линзы искажают действительность в угоду демонам.

Разнообразные чудеса описаны в энциклопедиях итальянского математика, философа и врача Джироламо Кардано (1501—1576) «О тонкости вещей» и «О разнообразных вещах», в «Натуральной магии» Джамбаттисты делла Порта (1535—1615) и в книге немецкого естествоиспытателя Афанасия Кирхера (1601—1680) «Великое искусство света и тени». В этих сочинениях, например, описывается действительное изображение вогнутых зеркал. В отличие от плоского зеркала, которое образует только мнимое изображение позади себя, вогнутое зеркало формирует и мнимое изображение позади себя, и действительное перед собой. Таким образом, скрыв

зеркало, можно создать иллюзию парящей в воздухе тени — изображения, скажем, невидимой статуи. Этот опыт проделывали также с горящей свечой, которую можно ясно видеть, но нельзя задуть и о которую нельзя обжечься (Кирхер называл его «опытом с безвредным пламенем»). Многие полагали, что с помощью выпуклых зеркал можно получить изображения духов.

Опыты с плоскими зеркалами строились главным образом на множественности отражений в зеркалах, расположенных под углом друг к другу. Порта описал необычное «театральное зеркало», известное ещё древнегреческому учёному Герону Александрийскому (около I в.): в действительности это несколько зеркал, помещённых вдоль сторон правильного многоугольника. С помощью такого устройства можно превращать изображение слона в «целое стадо слонов, казалось собранных из всей Азии и всей Африки».

В последних изданиях «Натуральной магии» Порта описал среди подобных чудес и зрительную трубу. Он пытался даже оспорить приоритет в изобретении телескопа у Галилео Галилея. В действительности, хотя по времени эти описания предшествуют

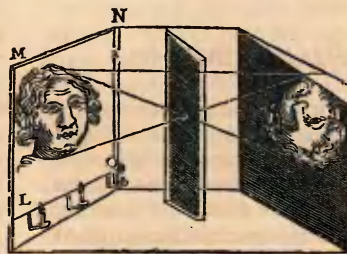


А. Кирхер. Книга «Великое искусство света и тени». Титульный лист. 1671 г.

опытам Галилея, вряд ли он мог бы ими воспользоваться. Порта сам не понимал, за счёт чего происходит увеличение объектов, а в практическом плане — искусстве шлифовки стёкол и придания им сферической формы — Галилей значительно превзошёл и его, и всех остальных шлифовальщиков стёкол того времени.



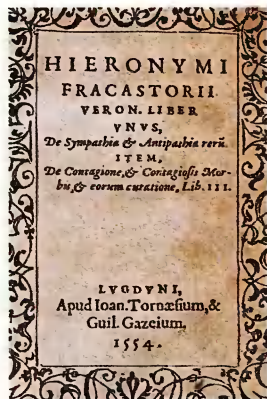
Джамбаттиста делла Порта. Портрет из его книги «Физиогномика». 1588 г.



Страница из книги А. Кирхера «Великое искусство света и тени».



Афанасий Кирхер. Старинная гравюра.



Д. Фракасторо.
Трактат «О контагии,
о контагиозных
болезнях и лечении».
Титульный лист.
1554 г.

Некромантия — магическое искусство узнавать о будущем, общаясь с душами умерших.

Леонардо да Винчи.



до болезней, поражающих внутренние органы человека.

Таким объяснениям различных природных явлений симпатиями и антипатиями посвятил свой трактат «О контагии, о контагиозных болезнях и лечении» (1546 г.) итальянский врач и естествоиспытатель Джироламо Фракасторо (1478—1553). Некоторые его догадки, однако, опережали время. Например, он был не согласен с тем, что причину болезней следует искать в перемещении светил, как думали астрологи. Причина болезней, считал учёный, заключается в невидимых глазу живых существах, приносящих вред организму. Фракасторо оспаривал и принятое тогда мнение, что магнитная стрелка поворачивается к северу из-за симпатии к Полярной звезде. По его представлениям, стрелка проявляет свою симпатию к железным горам, по-видимому имеющим сблизи полюсов.

Натуральная магия предлагала объяснения большого количества явлений, которые тогда никаким другим образом объяснить не удавалось. Но её толкования устраивали не всех. Резко отрицательно выступал против этих идей Леонардо да Винчи (1452—1519). «Из речей человеческих глупейшей должна почитаться та, которая распространяется о суевериях некромантии», — писал он.

ЛЕОНАРДО ДА ВИНЧИ

Если средневековые учёные больше ценили слово, можно сказать, прислушивались к природе, то естествоиспытатели Возрождения стали к ней присматриваться. Наиболее ярко это проявилось в творчестве Леонардо да Винчи — никто из учёных Возрождения не распахнул двери «кельи своих помыслов» навстречу природе с такой готовностью, как он. Поразительно одарённый художник и музыкант, он в то же время был одержимым

естествоиспытателем — анатомом, геологом, ботаником, зоологом.

Научное наследие Леонардо удивительно: его работы многочисленны и разнообразны, но среди них нет ни одного законченного произведения. Рукописи да Винчи трудно читать не только потому, что они написаны так называемым зеркальным письмом (левой рукой и справа налево) и их можно разобрать лишь с помощью зеркала. Автор постоянно себя перебивает, часто не доводит мысли до конца, смешивает различные темы. Вместе с тем рукописи Леонардо — свидетельство нескончаемого диалога с природой. Его интересовало всё, и он хотел, всматриваясь и наблюдая, познать природу во всё её многообразие. Можно найти любопытные примеры экспериментального мышления в наблюдениях Леонардо. В частности, для доказательства того, что муха производит жужжание крыльями, он предлагал смазать их мёдом. Звук при этом становится глуше и ниже. Такого, очевидно, не было бы, если бы муха жужжала, выдыхая воздух через рот.

К размышлениям о задачах механики Леонардо привела мечта подняться в воздух — ей он отдал многие годы напряжённого труда. Им были спроектированы различные аппараты и приспособления, которые, как надеялся да Винчи, могли помочь её осуществлению; среди них — прообразы парашюта и вертолёта. Подобно многим современникам, он наблюдал за движением свободно падающего тела, пытался понять природу силы удара. Однако его заключения редко шли дальше общих положений типа: «Всякое природное действие совершается кратчайшим путём, и вот почему свободное падение тяжести совершается к центру мира, так как это — наиболее короткое расстояние между движущимся телом и самым низким местом Вселенной». К гораздо более существенным выводам Леонардо пришёл



в практических вопросах, связанных с решением технических задач.

Многие его инженерные проекты касались гидротехнических работ. Он предложил строить каналы в окрестностях Флоренции, чтобы изменить течение реки Арно, оставив без воды враждебную тогда Флоренции Пизу. Размышляя над этими проблемами, Леонардо смог открыть принцип сообщающихся сосудов и вплотную приблизился к открытию основного закона гидростатики, утверждающего, что давление передаётся жидкостью одинаково во всех направлениях (закон Паскаля).

Леонардо да Винчи не имел систематического образования. Время от времени он посмеивался над книжниками — гуманистами, увлечёнными античными авторами, и средневековыми схоластами: «Хотя я и не умею так, как они, цитировать авторов, я буду цитировать гораздо более достойную вещь — опыт, наставника из наставников».

РЕВОЛЮЦИЯ В КОСМОСЕ

Событие, которое, по мнению большинства историков, положило начало научной революции XVII в., было чрезвычайно неприметным. Вышла в свет книга польского каноника Николая Коперника (1473—1543), озаглавленная «О вращении небесных сфер». Это произошло в 1543 г. — в год его смерти. Легенда гласит, что первый экземпляр книги Коперник увидел уже на смертном одре.

Николай Коперник происходил из небольшого польского городка Торунь Вармийского епископата, окружённого со всех сторон землями крестоносцев Тевтонского ордена. Отец Николая умер рано, и его воспитанием занялся дядя по материнской линии, епископ Вармийский Лукаш Ваченроде. (Формально он подчинялся Папе Римскому и являлся вассалом польского короля,



но на деле был полновластным правителем Вармии). Епископ смог обеспечить племяннику хорошее образование: в 1491 г. Коперник поступил в Краковский университет, а потом учился в университетах Болоньи и Падуи. Он изучал право, древнегреческий язык, математику, философию, однако наибольший интерес у него вызвала астрономия. Начиная с 1497 г. — времени его приезда в Болонью — Коперник уже проводил систематические наблюдения за небесными светилами. Он обнаружил значительные расхождения между расчётами Птолемея и своими наблюдениями, которые можно было объяснить либо собственными ошибками, либо ошибками теории. После многочисленных проверок польский астроном избрал второй путь.

Основное предположение, сделанное Коперником в рукописи «Малый комментарий о гипотезах, относящихся к небесным движениям» (1515 г.), кажется вполне невинным: расчёты движения небесных тел получатся гораздо более простыми и точными, если рассматривать движение не относительно Земли, как поступал Птолемей, а относительно Солнца. Главная книга Коперника



Николай Коперник. Портрет работы неизвестного художника.



Памятник Н. Копернику возле Ягеллонского университета. Краков.

■ Каббала (древнеевр. «предание») — мистическое течение в иудаизме.

■ Булла (лат. «шарик», на средневековой латыни «печать», «документ с печатью») — в Средние века круглая металлическая печать, скреплявшая папский, императорский или королевский законодательные акты. Так назывались и сами эти акты.

«О вращении небесных сфер» открывалась небольшим анонимным предисловием, которое вначале приписывалось самому Николаю Копернику, однако, как впоследствии выяснилось, принадлежало перу издателя книги Андреаса Осиандера, богослова и лютеранского проповедника. В нём говорилось, что гипотеза о центральном положении Солнца носит математический характер, т. е. введена лишь для того, чтобы облегчить вычисления. Осиандер исходил из известной ещё с античности относительности: видимые движения небесных тел можно объяснить с помощью самых разных геометрических конструкций.

Однако из текста книги становилось ясно, что автор исходит из абсолютного смысла своей гипотезы, доказывая, что Солнце и в самом деле неподвижно, а Земля обращается вокруг него по орбите (годовое обращение), одновременно вращаясь вокруг своей оси (суточное вращение). Такая постановка вопроса имела далеко идущие последствия. Под удар попала аристотелевская физика, которая опиралась на здравый смысл и философские аргументы, с одной стороны, и была прочно связана с христианской теологией — с другой.

Борьба за признание гелиоцентрической теории стала одним из ос-

новных сюжетов развития науки в течение ещё двух веков и одним из главных признаков конца Возрождения. За мыслью Коперника следовали идеи не просто чуждые, но враждебные духу эпохи. Обожествление человека — «венца творения» и воспевание природы, подвластной человеческому гению, — эти основы гуманизма раннего Возрождения теперь если не опрокинулись, то, во всяком случае, пошатнулись. Человек покинул центр мира, и теперь, подобно пылинке, несётся в бескрайнем пустом пространстве Космоса.

Коперник не первый предлагал поместить Солнце в центр мироздания, а Землю низвести до статуса рядовой планеты. Не случайно эту теорию называли пифагорейской. Связывали её также с мифическим древнеегипетским персонажем Гермесом Трисмегистом (от *греч.* «трисмегистос» — «трижды величайший»), изобретателем письменности и носителем древней мудрости, учителем библейского пророка Моисея. В действительности приписываемые Трисмегисту трактаты датируются II—III вв. и принадлежат перу одного из последователей Платона. Эти сочинения были очень популярны в эпоху Возрождения и оказали значительное воздействие на мыслителей того времени. Герметические науки включали алхимию, астрологию, каббалу и магию и были доступны только посвящённым. Большая часть из них была осуждена папской буллой в 1585 г., подтверждённой в 1631 г. Урбаном VIII.

В Средние века возможность движения Земли рассматривали французские схоласты Никола Орём и Жан Буридан. Николай Кузанский считал, что Земля движется около центра мира, положение которого ещё не определено. Сильное влияние герметических наук испытал также итальянский философ и поэт Джордано Бруно (1548—1600), увидевший в сочинении Коперника науч-





НИКОЛАЙ КОПЕРНИК. «О ВРАЩЕНИЯХ НЕБЕСНЫХ СФЕР»

Труд Николая Коперника «О вращении небесных сфер» — одна из великих книг, ставших ступенями в истории познания человеком окружающего мира и самого себя. Этим сочинением скромный каноник из Вармийской епархии, что на севере современной Польши, не только произвёл переворот в астрономии, но и изменил всю картину мира.

Основные положения новой, гелиоцентрической системы мира Коперник сформулировал следующим образом: «Все замечаемые нами у Солнца движения не свойственны ему, но принадлежат Земле и нашей сфере, вместе с которой мы вращаемся вокруг Солнца, как и всякая другая планета; таким образом, Земля имеет несколько движений. Кажущиеся прямые и обратные движения планет принадлежат не им, но Земле. Таким образом, одно это её движение достаточно для объяснения большого числа видимых в небе неравномерностей». Так Коперник силой своего разума «остановил Солнце и сдвинул Землю».

Рукопись Николая Коперника, над которой он работал около 30 лет, была опубликована в мае 1543 г., незадолго до кончины её автора. Печаль его друзей усугубило предпосланное книге анонимное предисловие «К читателю. О гипотезах, лежащих в основе этой книги». Как выяснил Иоганн Кеплер, его написал и поместил при печатании книги Андреас Осигандер, протестантский богослов и математик, наблюдавший за изданием. «Поскольку никакой разум не в состоянии исследовать истинные причины, или гипотезы, этих движений, — говорилось в предисловии Осигандера, — астроном должен изобрести и разработать хоть какие-нибудь гипотезы, при помощи которых можно было бы на основании принципов геометрии правильно вычислять эти движения как для будущего, так и для прошедшего времени. И то и другое искусный автор этой кни-

ги выполнил в совершенстве. Ведь нет необходимости, чтобы эти гипотезы были верными или даже вероятными, достаточно только одного, чтобы они давали сходящийся с наблюдениями способ расчёта...» В предисловии явно ошущается страх перед новыми представлениями, неведомо куда ведущими человечество.

Инквизиция серьёзно отнеслась к теории Коперника и в 1616 г. включила его труд в печально знаменитый «Индекс запрещённых книг». Запрет отменили только в XIX в.

Русский перевод труда Николая Коперника «О вращении небесных сфер», выполненный профессором, историком математики и астрономии Иваном Николаевичем Веселовским (1892—1977), опубликован в 1964 г. издательством «Наука» в серии «Классики науки»; основанной академиком Сергеем Ивановичем Вавиловым.



Система мира Коперника. Хромолитография. 1670 г.

ное подтверждение идеи Гермеса Трисмегиста о бесконечности Вселенной и множественности миров.

Учение Джордано Бруно не основывалось на научном методе. Он прежде всего был религиозным мыслителем и надеялся на основе герметизма добиться объединения Католической и Протестантских церквей. Помимо прочего Бруно отрицал непорочное зачатие, Божественность Христа и считал необходимым разрешить многожёнство. Бруно высказал и ряд важных научных соображений, сыгравших впоследствии большую роль в формировании гелиоцентрической системы мира. Так,

он логически обосновал, что учение Коперника позволяет устранить из космологии «сферу неподвижных звёзд». Считалось, что звёзды, не двигаясь друг относительно друга, все вместе вращаются вокруг центра мира и Земли. Чтобы такое согласованное движение было возможно, звёзды, как предполагалось, должны быть прикреплены к твёрдой сфере, вращающейся с постоянной скоростью. Однако, если движение звёзд объясняется вращением Земли, сфера уже не нужна, и звёзды могут располагаться на произвольных расстояниях от Земли. Благодаря Бруно стало ясно не только то, что Земля —



Джордано Бруно.
Старинная гравюра.



«Альфонсинские таблицы» названы так потому, что они были выполнены астрономами для короля Кастилии и Леона Альфонса X Мудрого.

Тихо Браге.
Старинная гравюра.



планета, но и что Солнце — лишь одна из множества звёзд. Инквизиция сочла его взгляды еретическими, и 17 февраля 1600 г. его сожгли на костре в Риме. Перед смертью учёный произнёс: «Сжечь — не значит опровергнуть».

ФИЗИКА КОСМОСА

В том же году, когда был сожжён Джордано Бруно, произошло ещё одно событие, сыгравшее в истории научной революции не меньшую роль, чем книга Николая Коперника. Преподаватель математики лютеранской школы австрийского города Грац Иоганн Кеплер направился в Прагу по приглашению Тихо Браге, придворного астронома императора Священной Римской империи Рудольфа II.

Тихо Браге (1546—1601), выходец из богатой и аристократической датской семьи, получил хорошее образование. Он изучал право в Копенгагенском университете, а затем переехал в Лейпциг, где начал проводить систематические астрономические наблюдения и принял окончательное решение посвятить свою жизнь этой науке. На его решение повлияло несколько обстоятельств. Во-первых, ещё в Копенгагене Браге смог наблюдать солнечное затмение 21 августа 1560 г., предсказанное заранее, и сам факт предсказания поразил мальчика. Во-вторых, в Лейпциге в августе 1563 г. он наблюдал соединение (максимальное сближение на небосводе) Юпитера и Сатурна. Дата этого события содержалась в «Пруссских таблицах», которые составил немецкий математик Эразм Рейнгольд на основе теории Коперника, однако Рейнгольд ошибся на несколько дней. Ошибка в используемых тогда «Альфонсинских таблицах», вычисленных согласно теории Птолемея, оказалась ещё больше — около месяца. Принципи-

альная возможность предсказать подобные явления и существующие в вычислениях ошибки побудили Браге начать систематические и длительные наблюдения за светилами. Он постоянно стремился повышать точность своих наблюдений и создавать новые, всё более совершенные астрономические приборы.

11 ноября 1572 г. произошло ещё одно событие, поразившее Браге. На небе появилась новая, необычайно яркая звезда в созвездии Кассиопеи. Такого события ни Браге, ни кто-либо другой предсказать не мог. Более того, оно противоречило принципам аристотелевской физики, согласно которым небеса вечны и неизменны. Появление новой звезды потрясло не одного Браге — вся Европа была взбуждена, но только он, едва увидев звезду, приступил к ежедневным и тщательным измерениям её положения. Итогом его наблюдений стала книга «О новой звезде» (1573 г.). Впервые в истории научной литературы половина книги была занята подробными описаниями использованного инструментария, способов измерения и их результатов. Выводы, которые сделал Браге, таковы: новая звезда не располагается в подлунном пространстве, как думали тогда многие, поскольку она не обладает параллаксом и её угловые расстояния от прочих звёзд Кассиопеи остаются неизменными. Её, по мнению Браге, следовало отнести к сфере неподвижных звёзд, что не соответствовало теории Аристотеля о неизменности подлунного мира.

Этот вывод был в дальнейшем подкреплён и его наблюдениями за кометами, также не обладавшими параллаксом. Кометы, которые, как и новую звезду 1572 г., пришлось отнести к надлунной сфере, тоже не вписывались в теорию Аристотеля. Однако Браге не принимал и взглядов Коперника. Прежде всего его смущало то, что человек уже



не находится в центре мира, а это, считал Браге, противоречит некоторым местам Библии. Но были и физические аргументы, обсуждавшиеся ещё во времена античности и в Средние века. Если бы Земля двигалась по орбите, то тогда наблюдался бы параллакс неподвижных звёзд, чего Браге не смог обнаружить даже с помощью самых совершенных своих приборов. Если бы Земля совершала суточное вращение, то камень, падающий с вершины мачты, не мог бы упасть к её основанию, а должен был отклониться к западу.

Эти соображения подтолкнули Браге к созданию собственной космологической системы, в которой Земля неподвижна и располагается в центре Вселенной; вокруг Земли вращались Луна и Солнце, а Меркурий, Венера, Марс и остальные известные тогда планеты Солнечной системы двигались вокруг Солнца в соответствии с учением Коперника. Теория датского астронома нашла горячих сторонников среди иезуитов, ставших после Тридентского собора главными выразителями научных взглядов католичества. Они решительно отвергали всякие попытки аллегорически толковать Библию, включая и те места, где речь идёт о неподвижности Земли и движении Солнца.

На протяжении своей жизни Тихо Браге собрал огромное количество наблюдений, выполненных с невиданной до тех пор точностью, аккуратностью и систематичностью, но у него не было ни сил, ни времени обработать их. Всё это предстояло осуществить Иоганну Кеплеру (1571—1630).

Тихо Браге не мог бы сделать лучшего выбора. Больше всего на свете Кеплер любил числа и вычисления. Однако космологические конструкции Тихо Браге ему не нравились. Кеплер с воодушевлением принял идею Коперника, поскольку она соответствовала его пифагорейскому



мировоззрению. Кеплер был в гораздо большей степени пифагорейцем, чем коперниканцем. В центре мира, считал он, должен быть Центральный Огонь, причина всех движений.

Таким образом, Кеплер ещё дальше ушёл от аристотелевской космологии, перенёс в центр мира не только Солнце, но и перводвигатель. Среди наблюдений Тихо Браге важное место занимали наблюдения за Марсом. Расчёт орбиты этой планеты всегда вызывал особые трудности у астрономов из-за того, что, как потом выяснилось, форма орбиты Марса больше отличается от окружности, чем форма орбиты любой другой планеты Солнечной системы. Кеплер думал, что причина ошибок его предшественников заключается в неправильной системе Птолемея, и стал вычислять орбиту Марса, исходя из системы Коперника. Результат был довольно хорош — истинное положение Марса отличалось от расчётного не более чем на $8'$, но и это Кеплера не устроило. Он был абсолютно уверен в точности измерений Браге, ошибку искать следовало в расчётах!

Он вновь погрузился в длительные вычисления и наконец смог установить, что орбита Марса имеет форму эллипса. Затем учёный распространил этот вывод и на все остальные



Тихо Браге в обсерватории. Гравюра из книги Т. Браге «Механика обновлённой астрономии». 1602 г.

■ Параллакс (от греч. «параллаксис» — «отклонение») — видимое изменение положения небесного светила вследствие перемещения наблюдателя.

■ Тридентский собор — Вселенский собор Католической церкви, заседавший в 1545—1547, 1551—1552 и 1562—1563 гг. в итальянском городе Тренто (лат. Tridentum), а в 1547—1549 гг. — в Болонье. Он закрепил догматы католичества, усилил гонения на еретиков и ввёл строгую церковную цензуру.



планеты Солнечной системы — так появился первый закон Кеплера.

Теория Птолемея была по своей сути математической, т. е. она сводилась к подгонке сложной системы

окружностей к наблюдаемым движениям небесных тел. Кеплера же интересовали причины движений, хотя он не понимал, какого рода они могут быть. Его первые попытки носили

ИОГАНН КЕПЛЕР

«Даже непродолжительное время, проведённое без пользы, причиняет ему страдание. Вместе с тем он далёк от того, чтобы упорно сторониться человеческого общества. В денежных вопросах он почти скуп, в экономии твёрд, строг к мелочам и ко всему, что приводит к напрасной потере времени. Вместе с тем он питает к работе непреодолимое отвращение, столь сильное, что часто лишь страсть к познанию удерживает его от того, чтобы не бросить начатое. И всё же то, к чему он стремится, прекрасно, и в большинстве случаев ему удавалось постичь истину».

Так Кеплер писал о себе. Ему, очевидно, нравилось сочинять, и кроме пространственных трактатов, большая часть которых до сих пор не переведена даже на английский, его обширное наследие включает переписку и рассуждения на самые разные темы, в том числе о себе и своей семье.

Хотя Кеплера не сожгли на костре, как Бруно, и не призывали под угрозой пыток отречься от своих открытий, как Галилея, в его жизни было немало скитаний и бедствий. Церковные власти предписывали ему и его семье в 24 часа покинуть город, в котором он жил. Монархи, у которых он служил, годами не платили ему жалованья. А его первая жена тяжело болела и в последние годы жизни перестала узнавать даже детей и мужа.

Кеплер родился 27 декабря 1571 г. в маленьком городке Вайль-дер-Штадт, расположенном в Швабии, на юге Гер-

мании; в то время там проживало немногим более 200 семей. Его дед принадлежал к местной аристократии и некоторое время даже был мэром. Но в предках Кеплера жил какой-то странный авантюрный дух. Тётку Иоганна сожгли живём, заподозрив в занятиях магией, чудом избежала костра его мать. Отец много бродяжничал, воевал со своими единоверцами в Нидерландах, вступив в войско герцога Альбы; однажды едва не был повешен, а потом бесследно исчез, вероятно, погиб. Некоторое время отец Кеплера содержал таверну, и его жена частенько забавлялась тем, что подмешивала в питьё гостям различные снадобья, влияющие на психику, и наблюдала за произведённым эффектом.

И всё же Кеплеру отчасти повезло. Перешедший в лютеранство герцог Вюртемберга (Швабия) заботился о хорошем образовании для лютеранских священников, что могло бы помочь им побеждать католиков в диспутах. Благодаря этому Кеплер бесплатно получил хорошее образование сначала в монастырской школе в Адельберге, а затем в университете Тюбингена. Правда, теологический факультет университета он так и не закончил: университетские власти назначили Кеплера на место умершего учителя математики в лютеранской школе австрийского города Граца.

Это был маленький захолустный городок, в котором протестанты постоянно подвергались гонениям. Однако именно здесь Кеплер стал много заниматься математикой, оставив свою мечту быть теологом, и пришёл к мысли: «Теперь я вижу, что при усердии могу прославить Бога и в астрономии». В 1596 г. он выпустил первый труд под названием «Предвестник космографических сочинений, содержащий космографическую тайну относительно удивительных отношений между Небесными Орбитами, а также истинные и должные основания для их Числа, Величины и Периодических Движений». И вновь судьба Кеплера радикально изменилась: книга послужила поводом к знакомству с Галилеем, а также основанием для приглашения в Прагу в качестве помощника императорского астронома Тихо Браге.

В 1600 г. Кеплер переехал в Чехию. Через год Браге неожиданно умер, и Кеплеру было предложено занять его место. Так до 1612 г. он и оставался придворным математиком и астрономом императора Священной Римской империи Рудольфа II (1576—1612). Здесь его никто не преследовал за протестантские убеждения и приверженность теории Коперника, ведь среди тех, кем окружил себя Рудольф II, встречались люди и с более странными взглядами — маги и алхимики. Но после смерти императора и начала Тридцатилетней войны (1618—1648 гг.) всё изменилось. Для католиков протестант Кеплер был еретиком,



Юзеф Скробиньский.
Учитель и ученик (Коперник и Кеплер). XX в.



скорее магический, нежели физический характер: Кеплер хотел объяснить строение Солнечной системы, поместив между небесными сферами правильные многогранники.

Узнав об исследованиях английского физика и врача Уильяма Гильберта, написавшего трактат «О магните, магнитных телах и о большом магните — Земле» (1600 г.), Кеплер

Жан Кальвин (1509—1564) основал новое направление протестантизма — кальвинизм.

а лютеране считали его отступником за симпатию к взглядам Жана Кальвина. Но Кеплер не мог пойти на компромисс в религиозных убеждениях, которые для него были тесно связаны с космологическими представлениями.

Известно, что пифагорейцы считали источником силы, приводящей Космос в движение, Центральный Огонь. Для них этот источник совпадал с Богом. Коперник, поместив Солнце в центр мироздания, оставил Бога на периферии мира или даже за его пределами. Таким образом Солнце было лишено и Божественных атрибутов, и возможности физически воздействовать на вращающиеся вокруг него планеты. Более того, согласно Копернику, в центре Вселенной, строго говоря, находится не Солнце, а центр земной орбиты, по отношению к которому Солнце немного смещено. Кеплера подобная теория не устраивала. Он восстановил и Божественные, и физические функции Солнца, поместив его в центр Вселенной и возвратив ему ответственность за все движения Космоса. Центральное положение Солнца для Кеплера было воплощением догмата о Святой Троице. Бог Отец представлен здесь Солнцем, являющимся Перводвигателем; Бог Сын — сферой неподвижных звезд; Бог Дух Святой — невидимая сила, излучаемая Богом Отцом, пронизывающая всю Вселенную и заставляющая её двигаться.

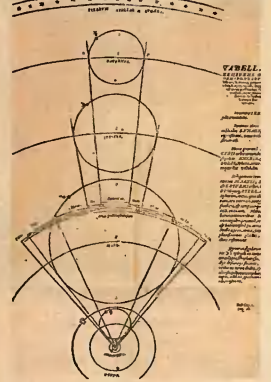
Кеплер много сделал для развития не только астрономии и космологии, но и оптики. Ещё в начале XVII в., наблюдая за Солнцем с помощью камеры-обскуры (от лат. *obscurus* — «тёмный»), он смог описать принцип формирования изображения в ней практически так же, как это делается в современной геометрической оптике. В 1602 г. Кеплер первым правильно описал работу человеческого глаза, догадавшись, что изображение формируется на сетчатке, а не в хрусталике, как думали ранее. Он понял, что хрусталик проецирует на сетчатку световые лучи, подобно тому как линза проецирует их на лист бумаги.

Кеплеру не был известен точный закон преломления света. Однако даже при помощи приписываемого Птолемею приблизительного закона, согласно которому угол преломления пропорционален углу падения, учёный смог правильно описать, как выпуклая линза собирает лучи — при этом он впервые использовал понятие *фокуса* — и объяснить многие оптические эффекты.

Значительное количество своих оптических открытий, связанных с наблюдательной астрономией, он изложил в книге «Оптическая часть астрономии» (1604 г.). В 1611 г., воодушевлённый сочинением Галилея «Звёздный вестник», где излагались первые астрономические открытия, сделанные с помощью телескопа, Кеплер создал собственную вер-



Рудольф II. Гравюра из первого издания «Новой астрономии» И. Кеплера. 1609 г.



И. Кеплер. «Космография». Схема устройства Космоса согласно взглядам пифагорейцев. 1585 г.

сию телескопа, решив эту задачу на основе теории. И в объектив, и в окуляр он поместил собирающие (выпуклые) линзы. Со временем оказалось, что такой прибор (позднее его называли рефрактором Кеплера) лучше подходит для астрономических наблюдений, чем телескоп Галилея. Но, увы, Кеплер не был таким хорошим инженером, как Галилей, и ему не удалось хорошо отшлифовать стёкла. Даже понимая, как устроен телескоп и почему он создаёт увеличенное изображение удалённых объектов, Кеплер не мог увидеть спутники Юпитера так же ясно, как Галилей, не знавший принципа работы телескопа. Тщетно Кеплер взывал к Галилею с просьбами прислать ему один из них. Рассмотреть спутники Юпитера учёному удалось, лишь когда в Прагу приехал курфюрст (от нем. *kurfürsten* — «князя-избирателя») Кёльнский Эрнст и на несколько недель одолжил подаренный ему Галилеем телескоп.

Всю жизнь главным удовольствием для Кеплера оставался поиск численных закономерностей. Он писал: «Цифры доставляют мне огромную радость, потому что они обозначают числа, то есть нечто, существовавшее раньше небес. Ибо числа были созданы вначале, одновременно с материей; небеса же были созданы только на второй день... Идеи чисел были и остаются в Боге от вечности, они и есть сам Бог; они, следовательно, присутствуют в любом разуме, созданном по подобию Бога. В этом согласны как языческие философы, так и учителя Церкви».



Иоганн Кеплер.
Старинная гравюра.

Памфлет — злободневное публицистическое произведение на общественно-политическую тему, написанное с обличительной целью.

предпринял попытку охарактеризовать действующие во Вселенной силы как магнитные. Солнце он полагал гигантским магнитом, один полюс которого расположен в центре, а другой равномерно распределён по всей сфере. Таким образом учёный надеялся объяснить периодическое приближение и удаление планет от светила. Кеплер обнаружил, что скорости планет вблизи Солнца больше, чем вдали от него, и даже нашёл точный количественный закон: скорости планет на орбитах таковы, что отрезок, соединяющий Солнце с планетой (радиус-вектор), заметает равные площади за равные промежутки времени. Этот закон получил название второго закона Кеплера.

Последняя попытка учёного найти универсальный закон строения Вселенной была основана на классической пифагорейской идее о «музыке сфер». Кеплер думал, что каждая планета, двигаясь по орбите, издаёт музыкальный звук, высота которого пропорциональна её скорости. Пифагор, согласно легенде, утверждал, что слышит эти звуки, складывающиеся в Божественную гармонию мира; они незаметны для простых смертных, не способных уловить ничего постоянно присутствующего. Стремясь расчитать музыкальную гамму каждой из планет, Кеплер нашёл свой третий закон — отношения квадратов периодов обращения планет вокруг Солнца равны отношениям кубов их средних расстояний до него.

СОЗДАНИЕ НАУЧНОГО МЕТОДА ГАЛИЛЕО ГАЛИЛЕЕМ

Рождение физики как самостоятельной науки по праву связано с именем великого флорентийского учёного и писателя Галилея Галилея (1564—1642). Сам он предпочитал называться математиком и философом.

Галилей освободил физику от подчинения той или иной философской

доктрине. Он не ставил вопрос о конечных (метафизических) причинах явлений — его больше интересовали детали; он не спрашивал «почему?», он спрашивал «как?». Но, в отличие от теорий, например Леонардо да Винчи, состоящих из конкретных правил и причин для всего разнообразия реальных объектов, теории Галилея справедливы скорее для идеального мира, состоящего из математических (геометрических) объектов, который он называет «бумажным». С помощью эксперимента можно определить и даже точно подсчитать, насколько реальность не совпадает со своим идеальным образом. Именно так, используя сравнение самого Галилея, рачительный хозяин умеет определить точный вес сахара в ящиках, вычитая вес ящиков из показаний весов. Более того, эксперимент, оказывается, можно проводить и в идеальном мире тоже, только он должен быть мысленным. Именно мысленный эксперимент позволил учёному прийти к выводу, что никакое механическое явление, никакой механический опыт не помогут установить наличие прямолинейного поступательного движения — утверждение, ныне известное как *принцип относительности Галилея*.

С появлением «бумажного мира» Галилея физика приобрела собственный язык и метод. До Галилея отдельно существовали механика, которая тогда ограничивалась лишь теорией простейших механизмов и была близка к статике, и наука о движении, состоявшая главным образом из комментариев к «Физике» Аристотеля и представлявшая собой раздел философии. Начав описывать движение точными количественными законами, Галилей сделал первый шаг к созданию современной физики на основе объединения этих двух наук.

Наиболее важным для построения количественной теории движения, а следовательно, и для всего дальнейшего развития физики был закон,





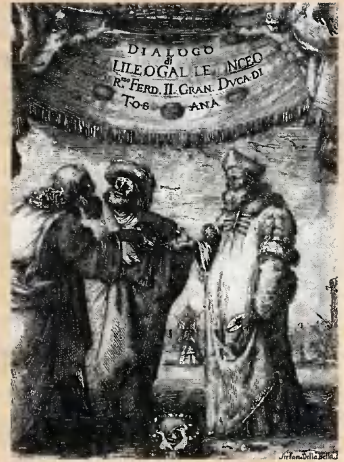
УЧЁНЫЙ-ЛИТЕРАТОР

Галилео Галилей изменил стиль научной литературы, приблизив её к художественной и сделав доступной большому количеству потенциальных читателей. Чтение его книг не требует ни чрезмерной эрудиции, ни особого усердия: большинство научных сочинений итальянского учёного читаются так же легко, как и художественные произведения того времени. Его «Диалог о двух главнейших системах мира — Птолемеевой и Коперниковой» признан одной из величайших вершин в истории мировой литературы.

Особенно наглядно это видно при сравнении стиля Галилея со стилем Кеплера, который считал, что научное исследование подобно дальнему плаванию по бескрайним морям и рассказ о нём должен напоминать дневник мореплавателя с подробными описаниями случайных отклонений от

правильного пути. Галилей же никогда не пытался воссоздать логику научно-го поиска и следовал только логике самого предмета, оставляя из доказательств лишь наиболее выразительные и краткие, поясняя основные утверждения красочными примерами.

Он пользовался различными литературными жанрами, но более других предпочитал диалог (в стиле Платона), письмо (копиями его писем зачитывалось научное сообщество того времени) и памфлет. Слог Галилея был изыскан и не перегружен заумными рассуждениями. Его основной аудиторией стали просвещённые дворяне, не очень искушённые в латыни — поэтому Галилей писал по-итальянски — и не очень терпеливые — поэтому Галилей старался выражаться коротко и энергично, не собирая вместе все известные аргументы в свою пользу, а, вопреки традиции, выбирая лишь один, зато самый сильный из них.



Стефано делла Белла. Аристотель, Птолемей и Коперник. Фронтиспис к «Диалогу...» Г. Галилея. Флоренция. 1632 г.

утверждавший, что свободно падающее тело проходит путь, пропорциональный квадрату времени. Этот закон был установлен Галилеем экспериментально, в опытах с наклонной плоскостью. Скатывающийся по прорезанному в ней желобку металлический шарик со стуком ударялся о невысокие порожки, расположенные таким образом, чтобы расстояния между ними шарик проходил за равные промежутки времени.

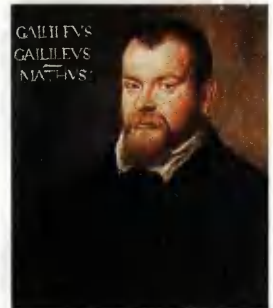
Наклонная плоскость использовалась Галилеем и в другой серии экспериментов, приведших его к не менее важному открытию — параболической траектории свободно падающего тела. Изменяя высоту, с которой шарик начинал движение, учёный мог менять скорость шарика, когда он начинал свободное падение, оторвавшись от наклонной плоскости.

С помощью мысленного эксперимента Галилей доказал, что тяжёлое пушечное ядро будет падать с такой же скоростью, что и отлитая из такого же материала маленькая пуля.

Представим, что пуля привязана к ядру. Если она падает медленнее, чем ядро, она будет его тормозить, и ядро с привязанной пулей должно падать медленнее, чем оно падало бы само по себе. Но в то же время ядро с привязанной к нему пулей оказывается более тяжёлым телом, чем одно ядро, и, стало быть, должно падать быстрее. Получившееся противоречие доказывает ложность исходной посылки, что тяжёлые тела движутся быстрее, чем лёгкие. Следовательно, все тела должны падать одинаково быстро.

Галилею также было ясно, что все тела, находящиеся на вращающейся Земле, участвуют в её движении, подобно тому как пуля, привязанная или не привязанная к ядру, участвует в одном с ним движении. Камень, падающий с вершины мачты, будет участвовать в движении корабля после отрыва от неё в такой же степени, в какой участвовал в нём, находясь на её вершине. Значит, камень, брошенный с вершины башни, которая стоит на земле неподвижно,

Строго говоря, у Галилея не было принципа относительности для прямолинейного движения разных систем отсчёта. Речь шла у него об относительности горизонтального движения, которое складывается в равномерное движение по окружности вокруг земного шара (или иных планет).



Галилео Галилей. Портрет работы Доменико Робасты. 1605—1607 гг.



упадёт к подножию независимо от того, движется планета или покоится. В конечном счёте эксперименты, как реальные, так и воображаемые, позволили Галилею отвести все выдвигавшиеся ранее физические возражения против движения Земли.

В XVII в., на заре Нового времени, революция в астрономии завершилась созданием новой естественно-

научной картины мира и новой физики — ей отныне принадлежало будущее. Это событие радикальным образом изменило жизнь сначала Западной Европы, а затем и всего мира. Благодаря экспериментам и теоретическим рассуждениям рациональный подход к познанию одержал верх над оккультным, или мистическим. Изжив себя, Возрождение подвело черту, за которой началась новая эпоха человеческого развития.

ГАЛИЛЕО ГАЛИЛЕЙ

Из предков Галилея первым в историю вошёл Томмазо Боннакоти, в 1343 г. ставший одним из членов совета Флорентийской республики. Второго своего сына он назвал Галилео; впоследствии знаменитый врач, он дал имя всему роду. Финансовые дела Винченцо Галилея, отца Галилео Галилея, были расстроены, и ему приходилось подрабатывать торговлей сукном, чтобы сводить концы с концами. В Пизе, университетском городе Великого герцогства Тосканского, он женился на Джулии Амманати, имевшей неплохое приданое. 15 февраля 1564 г., спустя два года после женитьбы, родился их первенец — Галилео. В начале 70-х гг. семья вернулась во Флоренцию, и Винченцо все-

цело отдался любимому делу — занятиям музыкой.

Здесь 11-летний Галилео начал проходить курс наук в школе при монастыре Валломброза. Монастырская жизнь пришлась мальчику по вкусу, и он даже собирался вступить в орден, что, видимо, не понравилось Винченцо. Он поторопился забрать сына домой, сославшись на серьёзное ухудшение его зрения. В 1581 г. Галилео Галилей возвратился в Пизу, на этот раз в качестве студента медицинского факультета.

Однако Галилею не суждено было стать медиком. В Пизе жизнь свела юношу с человеком, открывшим ему нечто совершенно новое и несравненно более интересное — геометрию. Остилио Риччи обучал геометрии дворянских пажей, не вдаваясь в теоретические глубины науки, а рассказывая о том, чем она может быть полезна на практике.

Не будучи пажом, Галилей не имел права присутствовать на этих занятиях и часами простаивал под дверью, слушая Риччи. Спустя некоторое время учитель, растроганный такой жадной познания, пригласил юношу участвовать в занятиях. Галилей забыл о медицинских книгах и взялся за «Начала» древнегреческого математика Евклида.





В 1585 г. молодой человек был вынужден вернуться во Флоренцию, так и не получив степени. Торговля сукном шла хуже и хуже, денег на продолжение учёбы не хватало, а старый Винченцо всё больше погружался в сочинение музыки и подготовку теоретических трактатов об античной и современной музыке. И всё-таки Галилео не стал заниматься коммерцией — он продолжал готовиться к университетской карьере. К этому времени относится его первое знакомство с творчеством Архимеда. В 1586 г. он сочинил небольшой трактат по гидромеханике «Маленькие весы», в котором рассуждал, каким образом Архимед мог измерить удельный вес короны сиракузского тирана Гиерона. Ещё одно сочинение, продолжившее архимедовскую традицию, было посвящено центру тяжести твёрдых тел. Несколько раз в течение этих лет Галилей выступал перед членами Флорентийской академии. В конце концов в 1589 г. он получил весьма почётное, хотя и низкооплачиваемое место профессора математики в своей alma mater — Пизанском университете. (Если бы он послушался отца и стал профессором медицины, то имел бы здесь вдесять раз большее жалованье!)

И в этом назначении, и в следующем (в 1592 г. Галилей начал преподавать в одном из самых знаменитых университетов Европы — Падуанском) важную роль сыграло покровительство маркиза Гуидобальдо дель Монте (1545—1607), механика и геометра, проводившего инспекцию военных укреплений Тосканы. К нему, как к большому знатоку творчества Архимеда, молодой учёный обратился в 1588 г. с письмом, в котором рассказывал о своих идеях относительно центра тяжести твёрдых тел и спрашивал его мнение. Дель Монте по достоинству оценил изыскания Галилея и отправил ему копию своей книги — комментированное изложение сочинения Архимеда о равновесии

тела на наклонной плоскости. Заявлявшаяся переписка длилась до самой смерти маркиза.

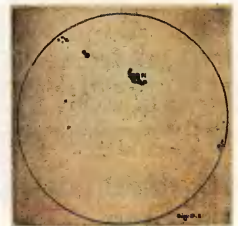
Годы, проведённые в Пизе и Падуе, были посвящены преимущественно механике. Тогда же были сделаны почти все принципиально важные открытия Галилея, такие, как изохронность колебаний маятника; независимость скорости падения тела от его веса; пропорциональность пути, пройденного свободно падающим телом, квадрату времени; а также параболическая форма траектории тела, брошенного под углом к горизонту. Тогда же учёный вступил в открытую дискуссию с перипатетиками (последователями философии Аристотеля) по поводу теории движения. Он утверждал возможность движения в пустоте, доказывал, что тело, брошенное вертикально вверх, проходит через состояние покоя, прежде чем начать падать. Про его публичные опыты ходили легенды, вошедшие в позднейшие жизнеописания, но не подтверждённые документально. Например, один из учеников Галилея рассказывал, что его наставник при большом стечении народа бросал с «Падающей башни» в Пизе ядро и пулю, доказывая равенство их скоростей при падении.

Однако Галилей не был отшельником, поглощённым только научными размышлениями. В Падуе он жил вместе с Мариной Гамба, которая родила ему двух дочерей и сына. У Галилея появилось здесь много друзей, он часто встречался с ними и долго спорил на разные темы. После смерти отца в 1590 г. Галилео оказался старшим в семье, ему надо было думать о приданом для сестёр и материально поддерживать младших братьев. Поэтому в его доме постоянно жили студенты, которые оплачивали пансион и дополнительные занятия, а кроме того, помогали в домашней мастерской, где Галилей трудился над созданием им же изобретённых приспособлений.



Марка в честь
Г. Галилея.
Ватикан. 1994 г.

Г. Галилей. Зарисовка
Солнца с пятнами.





Новый этап в его жизни начался с изготовления телескопа в августе 1609 г. Ни до ни после Галилео Галилей не интересовался оптикой; узнав, что при помощи стеклянных линз возможно добиться значительного приближения предметов, он положился лишь на здравый смысл и свою интуицию инженера.

Учёному удалось сделать линзы, которые по качеству существенно превосходили все линзы его предшественников: Галилей достиг большей сферичности и лучше шлифовал поверхности. А главное — он знал, куда надо смотреть.

ИДЕЯ И ВЕРА

(Хроника в документах и письмах)

Если философия — это то, что содержится в книгах Аристотеля, то Ваша милость была бы, мне кажется, величайшим философом в мире, потому что тогда она вся в Ваших руках и Вы готовы всему дать своё место. Я же верю, что книгу философии составляет то, что постоянно открыто нашим глазам, но, так как она написана буквами, отличными от нашего алфавита, её не могут прочесть все: буквами такой книги служат треугольники, четырёхугольники, круги, шары, конусы, пирамиды и другие математические фигуры.

(Г. Галилей. Письмо Ф. Личети.)

Поскольку речь идёт о явлениях природы, которые непосредственно воспринимаются нашими чувствами или о которых мы умозаключаем при помощи неопровержимых доказательств, нас несколько не должны повергать в сомнение тексты Писания, слова которых имеют видимость иного смысла, ибо ни одно изречение Писания не имеет такой принудительной силы, какую имеет любое явление природы.

(Г. Галилей. Письмо Б. Кастелли. 1613 г.)

Если ещё и можно сомневаться, что Папа... всегда обладает абсолютной властью допускать или запрещать какое-либо учение, то ведь не во власти сотворённого существа делать его истинным или ложным.

(Г. Галилей. Из трактата «Письмо Великой герцогине Кристине». 1615 г.)

Генеральному комиссару

Святой службы Его Святейшества

Заключение о мнении математика Галилея.

Слушали: Солнце есть центр мира и совершенно недвижимо в отношении перемещения.

Постановили: Данное положение глупо и нелепо в философии и подлинно еретично, поскольку явно противоречит высказываниям Священного Писания во многих его местах как сообразно с буквальным значением слов, так и сообразно с общим толкованием и суждением святых отцов и учёных богословов.

Слушали: Земля не есть центр мира и не неподвижна, а по природе своей движется целиком, а также суточным движением.

Постановили: Это положение подлежит тому же осуждению в философии, относительно же богословской истины оно по меньшей мере является заблуждением в вере.

(Подписи 11 богословов. 24 февраля 1616 г.)

До сведения Святой Конгрегации дошло, что ложное и целиком противное Священному Писанию учение о движении Земли и неподвижности Солнца, которому учит Николай Коперник в книге «О вращении небесных сфер», уже широко распространяется и многими принимается. Дабы такого рода мнение не распространилось мало-помалу далее на пагубу католической истине, Конгрегация определила: названная книга Николая Коперника «О вращении сфер» должна быть временно задержана впредь до её исправления. Все книги, учащие равным образом тому же, запрещаются...

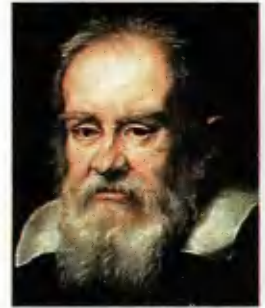
(Декрет Его Святейшества Папы Павла V.
5 марта 1616 г.)



Галилею изобретение телескопа дало возможность впервые аргументированно и публично выступить в защиту космологической теории Николая Коперника, против физики Аристотеля. Свои взгляды он изложил в двух книгах — «Звёздный вестник, открывающий великие и в высшей степени удивительные зрелища...» (1610 г.) и «История и демонстрация солнечных пятен» (1613 г.). Принципиальное положение физики Аристотеля, которое им здесь отвергается, — разделение подлунного и надлунного миров. Первый из них подвержен изменениям, второй — неизменен и

вечен, а потому может быть описан математически. По Галилею, математические законы природы должны быть едины и одинаковы повсюду во Вселенной.

Однако Галилей совсем не собирался полностью порывать с учением Аристотеля, которое, по его мнению, содержало в себе систему и метод. Новые астрономические открытия противоречат системе Аристотеля, но лишь потому, что у греческого философа не было телескопа, иначе, следуя собственному методу, он внёс бы поправки в свою систему. Галилей, открыв с помощью телескопа новые



Г. Галилей. Портрет работы Юстуса Сюстермана. Около 1640 г.

Оставь колебания, Галилей, и выступай вперёд. Если я не ошибаюсь, среди видных математиков Европы не много таких, кто захочет отделиться от нас. Такова сила правды. Если Италия кажется тебе мало подходящей для опубликования твоей книги и ты можешь встретить там трудности, то, вероятно, Германия предоставит нам такую свободу.

(И. Кеплер.)

Я сам видел муху, показанную мне синьором Галилеем в микроскоп. Я был поражён и сказал синьору Галилею, что он новый творец, так как показывает вещи, о которых не знали, что они созданы.

(А. Фабер. Письмо Ф. Чези. 1624 г.)

Ознакомившись со всем ходом дела и выслушав показания, Святейший определил допросить Галилея под угро-



зой пытки и, если устоит, то после предварительного отречения, как сильно подозрительного в ереси, в пленарном собрании Конгрегации Святой инквизиции приговорить к заключению по усмотрению Святой Конгрегации. Ему предписано не рассуждать более письменно или устно каким-либо образом о движении Земли, и о неподвижности Солнца, и о противном под страхом наказания как неисправимого. Книгу же, сочинённую им под заглавием «Диалог Галилея», запретить.

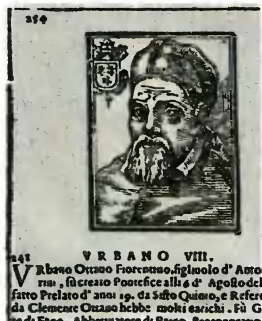
(Постановление Конгрегации Святой инквизиции. 1633 г.)

Я более не упорствую в этом мнении Коперника после чего, как мне сообщено приказание, дабы я от него отрёкся. К тому же я здесь в Ваших руках и делайте со мной всё по Вашему усмотрению.

(Г. Галилей.)

Когда я на днях осведомлялся в Лейдене и Амстердаме, нет ли там «Системы мира» Галилея, мне подтвердили, что её напечатали, но сказали, что все экземпляры были тогда же сожжены в Риме, а сам Галилей как-то наказан. Это меня поразило настолько, что я почти решился сжечь все мои бумаги или по крайней мере никому их не показывать... Не могу себе представить, чтобы его осудили за что-либо иное, чем за желание доказать движение Земли. Такое учение было осуждено некоторыми кардиналами, и я слышал, что его нельзя излагать публично даже в Риме, но я признаю, что если оно ложно, то ложны все основы моей философии, ибо из них оно явно следует.

(Р. Декарт. Письмо М. Мерсенну. 1633 г.)



Папа Римский
Урбан VIII.
Гравюра. XVII в.

«Бесчисленное множество людей занимается ныне наукой, и счастлив тот, кто, движимый необычным внутренним светом, способен выбраться из тёмных лабиринтов, по которым он мог бы до скончания века блуждать вместе с толпой, всё более и более удаляясь от выхода».

Г. Галилей

Доминиканский орден основан в 1215 г. испанским монахом Домиником. Это нищенствующий орден, члены которого дают обет бедности. В 1232 г. Папа Римский передал в ведение ордена инквизицию.

небесные явления, привёл положения Аристотеля в соответствие с этими открытиями. Галилей утверждал, что является более последовательным аристотелианцем, чем все современные ему перипатетики, когда отстаивал вывод о единстве мира и универсальности законов природы.

Галилей решил сполна использовать открытие четырёх спутников Юпитера и назвал их Медичейскими светилами в честь правящего Тосканой дома Медичи. Этот его жест после определённых усилий и хлопот флорентийских друзей был оценён. Галилей получил титул Первого математика и философа Великого герцога Тосканского, а также был назначен пожизненным профессором Пизанского университета без обязанности читать лекции. Фактически он оставался всё время во Флоренции, а в Пизу мог даже и не ездить. Титул и новая должность обеспечили ему постоянное солидное жалование.

Он сразу же оставил Марину Гамба, с которой прожил 11 лет, и вместе с матерью и двумя дочерьми в сентябре 1610 г. вернулся во Флоренцию. Многие падуанские друзья обиделись на Галилея и прекратили поддерживать с ним отношения. Однако учёного это не смутило. Среди его корреспондентов появились короли и папы, и он явно рассчитывал постепенно перебраться к какому-нибудь ещё более престижному двору, например Папы Римского. Бу-

дучи верующим католиком и одновременно убеждённым коперниканцем, Галилей тяжело переживал неодобрительное отношение Церкви к гелиоцентрической концепции. Он надеялся при личном общении убедить церковных иерархов в том, что учение Коперника не противоречит христианской доктрине.

Но его мечты не сбылись. В 1616 г. обеспокоенная ростом популярности теории Коперника Священная коллегия Римской инквизиции поставила вопрос о соответствии гелиоцентризма Священному Писанию перед специально созданной комиссией, ответившей на него отрицательно. Книгу Коперника внесли в «Индекс запрещённых книг» до исправления, а Галилей вместе с некоторыми другими сторонниками этой теории был приглашён в Рим, где ему сделали предупреждение, хотя и сняли с него все обвинения. От честолюбивых планов пришлось на время отказаться, и он вновь погрузился в работу над новой наукой о движении, начатую ещё в конце XVI в. в Пизе.

В 1623 г. папский престол занял кардинал Маффео Барберини (Папа Урбан VIII; 1623—1644 гг.), который считался покровителем гуманистов и стремился избавить папскую курию от становившегося всё более назойливым влияния соперничавших орденов — иезуитского и доминиканского. Многие друзья и коллеги Галилея заняли при Урбане VIII высокие посты, а сам Галилей весьма им почитался. Учёный решил, что наступил подходящий момент для выхода в свет его основного труда — «Диалога о двух главнейших системах мира — Птолемеевой и Коперниковой».

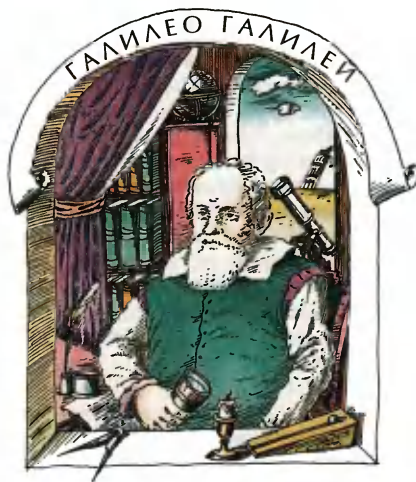
В 1632 г. издание было осуществлено, но вместо ожидавшейся славы принесло беду. «Диалог» неожиданно вызвал крайнее неудовольствие Папы. За некоторое время до того кардинал Роберто Беллармино по поручению генерального инквизитора Рима лично запретил Галилею





защищать учение Коперника. Книга Галилея была самовольным и грубым нарушением этого запрета. Ему пришлось ехать в Рим, чтобы предстать перед судом инквизиции. История этого процесса полна загадок, и до сих пор они неразгаданы, несмотря на большое количество посвящённых учёному книг и статей. В 1979 г. Папа Римский Иоанн Павел II заявил, что Церковь должна признать свою вину в страданиях великого учёного, бывшего много прозорливее своих судей. Созданная по его по инициативе комиссия Папской академии наук была призвана поставить точку в этом деле. Однако, завершив свою работу в 1992 г., она так и не ответила на большинство вопросов, сформулированных Папой. Призван вину безымянных богословов, она заявила, что «произошло недоразумение».

Десять лет после процесса (вплоть до своей смерти 8 января 1642 г.) Галилео Галилей провёл под домашним арестом в собственном имении — на вилле Арчетри. Его мучил ревматизм, к тому же он почти полностью ослеп, но это не сказалось на трудоспособности. Учёный продолжал много работать: в те годы было подготовлено



издание латинского перевода «Диалога», завершено и вышло в свет второе крупное его сочинение, имевшее не меньшее значение в истории естествознания, — «Беседы и математические доказательства, касающиеся двух новых наук, механики и местного движения» (1638 г.). В нём излагались принципы новой механики, над созданием которой Галилео Галилей работал более 50 лет.

ОТ ГАЛИЛЕЯ К НЬУТОНУ

Эпоха, начавшаяся после открытий Галилео Галилея и завершившаяся работами Исаака Ньютона, обозначила важный поворот в истории человечества, возможно самый важный с момента возникновения христианства. Научный взгляд на мир отныне проник в самую сердцевину культуры, конкурируя с религиозным мировоззрением. На какое-то время возникло ощущение, что наука делает ненужным христианство или даже опровергает его в философском плане.

В XVIII столетии материализм и атеизм особенно сильное распрост-

ранение получили у французских философов-просветителей. С их точки зрения, мир не был сотворён, а существовал вечно, подчиняясь неизменным законам природы. Постигнув эти законы, человек сможет по современному состоянию мира предсказать его будущее и узнать прошлое. Просветители считали, что общество также подчиняется объективным законам, узнав которые станет возможно распланировать будущее, подобно тому как рассчитывается движение планет в небе. Абсолютизация научного метода породит в дальнейшем



Собор Святого Петра, главный римский храм, начал строить Донато Браманте (1444—1514). В плане собор представлял греческий (равноконечный) крест, вписанный в квадрат. Центром здания являлся огромный купол с диаметром основания около 40 м. В возведении собора также участвовали Рафаэль Санти, Балдассаре Перуцци, Антонио да Сангалло Младший, Микеланджело Буонарроти.

якобинство во Франции и большевизм в России.

Дух новой эпохи наглядно проявился в истории об известном французском астрономе, математике и физике Пьере Симоне Лапласе (1749—1827). В одном из сочинений он изложил созданную им механистическую картину мира. Наполеон Бонапарт, прочитав книгу, спросил Лапласа, где же в его картине место для Бога, на что учёный ответил: «Я не нуждаюсь в этой гипотезе».

ХРИСТИАНСТВО И НАУЧНЫЙ МЕТОД

Принятие Западной Европой христианства и создание научного метода определили современный облик нашей цивилизации, однако до сих пор остаётся открытым вопрос, каким образом второе событие соотносилось с первым. Представители различных направлений в истории и философии придерживаются противоположных взглядов по данному вопросу. По мнению немецкого мыслителя-материалиста Карла Маркса (1818—1883), научное мировоззрение несовместимо с религиозным и со временем должно полностью его вытеснить. Научный взгляд возник благодаря развитию производительных сил, предопределивших появление капитализма как общественного строя, наилучшим образом отвечавшего тому способу производства и товарного обмена, который сложился к XVII в. Этому строю свойственны рационализм и независимость суждений, их следствием оказался научный метод, противоречащий религиозному заблуждению.

Немецкий социолог и историк Макс Вебер (1864—1920) придерживался иной точки зрения. Рационалистический и деятельный дух современного капитализма действительно порождает научный метод и научный взгляд на мир — здесь Вебер согласен с марксистами. Но сам по себе рационалистический дух является порождением протестантской этики, складывавшейся на протяжении XVI столетия. Этика протестантизма требовала быть честным перед своей совестью, а не только лояльным Церкви, заниматься приносящим пользу трудом. Протестантская вера предполагала активное самостоятельное мышление, для которого непрерываемым авторитетом было лишь Священное Писание, но не установок Церкви. По Веберу, научный метод прямо связан с новыми формами христианства, которые появились в Западной Европе в эпоху Реформации.

Отличное от двух предыдущих мнение высказал французский физик и историк науки Пьер Морис Мари Дюэм (1861—1916). Он считал, что научная революция началась не в XVI—XVII вв., а в XIV в. и что она плавно развивалась от работ французских теологов Жана Бурида и Никола Орема к трудам Галилео Галилея и Исаака Ньютона. Процесс этот был настолько спокойным, что слово «революция» может быть применено к нему лишь с большой натяжкой. Правильнее было бы говорить об эволюции католического мировоззрения, которое постепенно вбирало в себя достижения древнегреческой мысли, возвращавшиеся в Европу через арабскую цивилизацию и Византию. Прежде всего к ним относятся сочинения Аристотеля и его последователей — перипатетиков.

Научное мировоззрение стало определять и материальную сторону жизни, которая всё меньше зависела от кустарного производства и всё больше опиралась на промышленность. Промышленный переворот, начавшийся в XVIII столетии, возник вследствие очевидной сегодня, но революционной в те времена мысли — технические устройства подчиняются тем же законам, что и явления природы. Механика, созданная в XVII в. прежде всего с целью объяснить движение небесных тел, оказалась очень практичным делом. Мастера могли теперь создавать новые технические приспособления, опираясь на мнение учёных, а не на традиции и интуицию, как было раньше. Наглядным примером нового отношения к науке служит история реставрации купола собора Святого Петра в Риме в 1742—1744 гг. Когда он начал разрушаться, для руководства работами пригласили не опытных строителей, а трёх математиков — Руджера Иосипа Бёшковича, Франсуа Жакё и Тома Лесёра. Они предложили свой рецепт спасения купола, сильно отличавшийся от принятой архитектурной практики.

Научный взгляд на мир и инженерные новшества способствовали также зарождению новой культуры. Например, основы современной музыки были заложены в XVII в. Заключались они, с одной стороны, в развитии теории музыкальной гаммы, давшей обоснование темперированного строя, а с другой — в появлении чисто технических условий для создания более совершенных музыкальных инструментов. Нигде и никогда не существовало таких музыкальных инструментов, которые появились в Европе Нового времени, потому что нигде и никогда не было соответствующих технологий производства механизмов (например, молоточков у фортепиано или клапанов и подвода воздуха у органа), изготовления струн или лаков. Новая



музыка, основанная на новой теории, не могла быть исполнена на инструментах, изготовленных менее научным способом.

ФОРМИРОВАНИЕ НАУЧНЫХ ИНСТИТУТОВ

Возраставшее значение естествоиспытателя постепенно осмысливалось обществом, поэтому физикой стало возможно заниматься профессионально. До XVII в. получением нового знания занимались представители духовенства, работавшие в университетах, придворные математики и философы. Свои изыскания они вели довольно изолированно друг от друга, основываясь исключительно на мнении древних. В XVII столетии начинают формироваться научные сообщества людей, объединённых общими интересами изучения природы, которые регулярно обменивались мнениями по поводу новых научных результатов. У таких сообществ могли быть различные организационные формы, и наиболее важной среди них была академия.

В 1459 г. во Флоренции известный итальянский философ и гуманист Марсилио Фичино (1433—1499) создал первую академию по образцу афинской академии Платона. Она так и называлась — Платоновская академия и пользовалась особым по-

кровительством со стороны правителя города Лоренцо Медичи, по прозвищу Великолепный.

После смерти Фичино и изгнания Медичи из Флоренции академия прекратила своё существование, но не надолго. Уже в середине XVI в. по проекту Джорджо Вазари (1511—1574), итальянского живописца, архитектора и историка искусства, создана Флорентийская академия, имевшая статус государственной и официально финансировавшаяся из казны Великого герцогства Тосканского. Среди членов этой академии был, вероятно, и Галилей — по крайней мере именно здесь состоялся его научный дебют, когда он выступил с лекциями о топографии Дантова ада. Эти академии, как и многие последующие, были далеки от задач исследования природы, их членов интересовали исключительно гуманистические штудии, т. е. классическая литература, история, философия.

Об особом интересе к делу исследования природы заявила лишь основанная в 1603 г. князем Федерико Чези (1585—1630) Римская академия деи Линчеи (Академия рысьеглазых). Сначала она насчитывала всего четыре члена, включая самого основателя академии — князя Чези. Настоящий расцвет и слава ждали академию после вступления в неё Галилео Галилея. Это произошло в апреле 1611 г., когда Галилей приехал в Рим, чтобы возвестить о своих выдающихся открытиях в астрономии и убедить Ватикан в справедливости системы Коперника.

Чези считал, что нужно исследовать не отдельные явления природы, а её устройство в целом. Он понимал, что ему одному своей задачи не выполнить, и мечтал издать энциклопедию, созданную коллективом единомышленников и посвящённую системе мироздания. Члены академии Чези не только общались лично, они первыми широко использовали практику научной переписки.

Беттера.
Натюрморт. XVII в.



Лоренцо Медичи.



Рембрант. Портрет учёного. 1631 г.

Национальная академия деи Линчеи — одна из старейших в Европе. Она была закрыта в 1630—1795, 1840—1847 и 1939—1944 гг. Рысь (*ит. linceo*) служила символом зоркости, поэтому была изображена на гербе академии.



Собор Святого Петра. Рим.



Так, Галилей, бывавший в Риме лишь от случая к случаю, не мог присутствовать на собраниях в доме Чези и о делах академии узнавал преимуще-

ственно из писем. Со временем в большинстве академий появилось и было закреплено в уставе разделение членов на действительных, которые присутствуют на регулярных собраниях, и членов-корреспондентов, участвующих в работе академии посредством переписки.

Академия деи Линчеи носила подчеркнуто светский характер. Некоторые историки даже склонны видеть в её деятельности определённый вызов Римской коллегии иезуитов — ведущему церковному научному центру. Тем не менее нынешний Ватикан считает Академию деи Линчеи своим учреждением, и во всех официальных документах о Папской академии наук сказано, что она основана князем Чези в 1604 г.



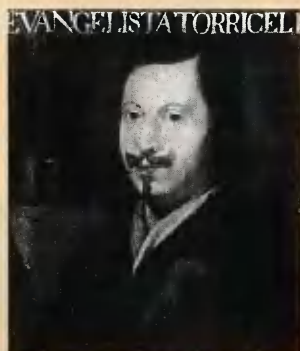
АКАДЕМИЯ ОПЫТОВ

В наибольшей степени экспериментальный подход был выражен в программе флорентийской Академии дель Чименто (Академии опытов). Её возникновение также тесно связано с именем Галилея, хотя и произошло 15 лет спустя после его смерти — в 1657 г. У истоков академии стояли два последних ученика Галилея — Эвангелиста Торричелли (1608—1647) и Винченцо Вивiani (1622—1703).

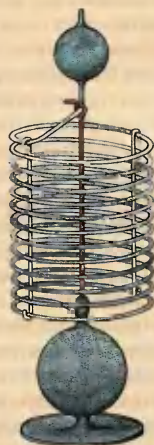
Флорентийские академики работали сообща и опубликовали, не выделяя чьих-либо особых заслуг, «Труды об экспериментах над природой, проделанных в Академии опытов». Эта публикация состоялась уже после закрытия академии в 1667 г., просуществовавшей всего десять лет. В «Трудах...» ясно видно принципиальное стремление академиков не теоретизировать о природе, а добывать знания о конкретных явлениях при помощи разнообразных экспериментов. Некоторые из них, проведённые другими физиками раньше, просто повторялись с особой тщательностью, другие были придуманы с необыкновенной фантазией. Так, флорентийцы первыми начали использовать настоящий термометр, у которого из трубки и шара удалён воздух для того, чтобы избежать влияния атмосферного давления. Они же предложили одну из первых методик определения влажности воздуха и даже предприняли попытку измерить скорость света, по понятным причинам оказавшуюся безуспешной.

Как и Флорентийская академия, Академия дель Чименто находилась фактически на содержании государ-

ства, и академики получали жалованье за проведение научных исследований. В известной мере это напоминало Александрийский музейон, однако он в гораздо большей степени являлся религиозным учреждением, и работавших там было бы правильное сравнить с учёными-монахами, которые трудились при монастырях или иезуитских коллегиях.



Эвангелиста Торричелли.



Флорентийский термометр. XVII в.



МАРЕН МЕРСЕНН И ЕГО КОРРЕСПОНДЕНТЫ

Человеком-академией Европы XVII в., который координировал и согласовывал деятельность различных учёных с помощью переписки, был Марен Мерсенн (1588—1648), французский монах. Среди его корреспондентов — Декарт, Галилей, Роберваль, Декарт, Паскаль, Бекман и многие другие учёные. Научная корреспонденция Мерсенна, изданная во Франции, занимает 17 томов, хотя до сих пор не все его письма найдены, опубликованы и прокомментированы.

Письма Мерсенна сыграли важную роль при решении проблемы свободного падения. В своё время Альберт Саксонский указал на то, что скорость падающего тела может быть пропорциональна либо времени, либо пройденному пути. В 1604 г. в одном из писем Галилей высказал предположение, что сможет вывести все законы равноускоренного движения из пропорциональности скорости пройденному пути. Только в 1638 г. в «Беседах и математических доказательствах...» он показал, что движение со скоростью, пропорциональной пройденному пути, невозможно (в этом случае прохождение любого отрезка требует бесконечного времени). Обнаружение Галилеем истинного закона (скорость свободно падающего тела увеличивается пропорционально времени) ознаменовало момент рождения классической механики.

В 1618 г., переехав в нидерландский город Бреда, Рене Декарт встретил местного математика и механика Исаака Бекмана (1570—1637), обратившего внимание талантливого юноши на задачу о свободном падении тела, с которой не мог справиться сам. В течение многих лет они, переписываясь друг с другом, регулярно сообщали о находках и сомнениях Мерсенну, обращавшемуся в свою очередь с призывом найти решение задачи к другим учёным Европы. Именно Мерсенн первым сообщил Декарту о доказательстве, приведённом Галилеем в «Беседах...», и именно в письме Мерсенну Декарт раскритиковал Галилея, отвергнув его правильные выводы.

В переписке с лучшими физиками и математиками Европы Мерсенн обсуждал проблемы природы звука и измерения его скорости, линии наискорейшего спуска и обращения циклоиды. Оказалось, две последние задачи тесно связаны друг с другом, потому что их решение давалось одной и той же линией. Первая задача была сформулирована так: по какой кривой должно двигаться свободно падающее тело, для того чтобы попасть из одной точки в другую за кратчайшее время? Довольно быстро установили, что форма этой кривой совпадает с так называемой цепной линией — формой свободно подвешенной в двух точках цепи.

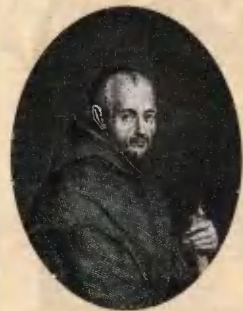
Ко второй задаче пришёл нидерландский учёный Христиан Гюйгенс (1629—1695), пытаясь улучшить конструкцию изобретённых им часов. Независимо от Галилея, не успевшего реализовать свой замысел, он решил использовать для получения равномерного хода часов плоский маятник — небольшой груз, подвешенный на практически невесомой нити. Однако вскоре Гюйгенс обнаружил, что *изохронизм* (от греч. «изос» — «равный», «одинаковый» и «хронос» — «время») такого маятника неточен. Период его колебаний постоянен лишь для малых амплитуд, при увеличении амплитуды колебаний период также заметно увеличивается. Учёный заметил, что колебания *изохрон-*



ны, если груз маятника движется не по окружности, а по циклоиде. Для этого он ограничил движение нити металлическими «щёчками», фактически изменявшими точку подвеса и длину маятника. Осталось только найти форму «щёчек», обеспечивающую движение груза по циклоиде.

Наиболее полное решение всех связанных с циклоидой проблем представил Блез Паскаль. В 1658 г. он сформулировал и доказал шесть теорем и предложил, скрываясь под псевдонимом, математикам Европы доказать их за денежное вознаграждение. Лавры первенства остались за Паскалем, но Гюйгенсу удалось решить четыре из шести приведённых задач, в частности о том, что «щёчки», обеспечивающие грузу движение по циклоиде, также должны иметь форму этой кривой. Блез Паскаль впервые услышал о проблеме циклоиды именно от Марена Мерсенна.

На протяжении десятилетий Мерсенн находился в центре научной жизни Европы, соединяя между собой самых разных людей, нередко находившихся в неприязненных или даже враждебных отношениях. По словам известного английского физика и историка науки Джона Десмонда Бёрнала (1901—1971), Мерсенн был «главным почтамтом для всех учёных Европы, начиная с Галилея и кончая Гоббсом». Сообщить что-либо новое ему значило сообщить это всему миру.



Марен
Мерсенн.



Эмблема Академии деи Линчеи.



Король Англии Карл II.



Жан Батист Кольбер.

К середине XVII в. в Италии настали не лучшие времена для науки: после суда над Галилеем талантливые учёные стремились покинуть её пределы. Тон в науке начали задавать другие страны Европы. Во Франции Жан Батист Кольбёр (1619—1683), известный финансист и политический деятель при Людовике XIV, понял, какую практическую выгоду сулит научный прогресс. В 1666 г. он на собственные средства собрал кружок учёных, громко названный Парижской королевской академией естественных наук. В 1699 г. был принят её первый устав, а финансирование исследований стало осуществляться из королевской казны.

В Великобритании с 1645 г. существовала неформальная группа учёных Лондона и Оксфорда, назвавшая себя «Невидимый колледж». Среди наиболее знаменитых членов этого кружка были химик и физик Роберт Бойль (1627—1691), математик Джон Валлис (1616—1703), учёный-универсал Роберт Гук (1635—1703).

Самой яркой фигурой среди них являлся, пожалуй, Роберт Гук. Однако расцвет его деятельности совпал с восходом звезды молодого Ньютона, затмившего всех вокруг себя. Гука связывали с ним сложные и противоречивые отношения, отразившиеся на творческой и личной судьбе обоих. Роберту Бойлю — ещё одной значительной личности среди основателей — повезло больше: его творческий взлёт пришёлся на более ранний период, а работы были полностью независимыми и даже предвосхитили некоторые будущие идеи Ньютона. Самое интересное его изобретение связано не с трудами Ньютона, а скорее с идеями итальянских и французских экспериментаторов: Роберт Бойль усовершенствовал воздушный насос.

В 1660 г. кружок был преобращён в знаменитое Лондонское королевское общество. Взошедший тогда на престол Карл II Стюарт (1660—

1685 гг.) объявил себя поборником точных наук и покровителем нового общества. Его покровительство, однако, оказалось чисто морального свойства, так как никаких денег обществу не выделяли. Но оно немало способствовало росту престижа физических исследований.

Таким образом, во второй половине XVII в. неформальные научные сообщества постепенно уступали место организованным. Затраты на науку всё более осознаются как инвестиции, а не меценатство. Наука начинает обретать материальную самостоятельность.

Совсем иначе возникла первая Российская академия наук. Её появлению не предшествовало никакое неформальное объединение учёных. Решением императора Петра I в Петербург было приглашено немало лучших учёных Европы. После этого учреждена Императорская Петербургская Академия наук в соответствии с заимствованными из Европы организационными образцами.

КАК НАЙТИ ИСТИНУ

Бурное и неожиданное развитие естествознания заново поставило вопрос о том, что такое истина, каковы





её критерии и источники. Новая наука стремилась осознать самоё себя и сформулировать свой метод. Наиболее полно это отразилось в философских сочинениях англичанина Фрэнсиса Бэкона (1561—1626) и француза Рене Декарта (1596—1650).

И Бэкон, и Декарт исходили из того, что истина очевидна. Строго говоря, того же взгляда придерживался и Галилео Галилей, утверждавший, что «сто Аристотелей и тысяча Демосфенов будут вынуждены умолкнуть перед лицом одного-единственного, самого заурядного ума, которому повезло обнаружить истину». Вопрос, следовательно, заключался в том, как найти истину, после чего она сама может подтвердить и обосновать себя. Здесь Бэкон и Декарт сходились, но расходились в том, как её искать. Метод Бэкона предписывал двигаться небольшими шагами от конкретных наблюдений и экспериментов к более общим, избегая в то же время чрезмерных обобщений. Ими, по его мнению, злоупотребляли философы-схоласты, которые «быстрым полётом переносились от чувственного и единичного к самым общим положениям и из таких высших положений, как из непреложных истин, выводили средние (физические. — *Прим. ред.*) положения». Метод перехода от частного к общему получил название *индукции* (от лат. *inductio* — «наведение»). Этот путь, — считал Бэкон, — ещё не был никем испробован». А Декарт полагал, что



Фрэнсис Бэкон.
Гравюра.

проще всего вывести самые общие принципы, от которых затем можно двигаться к частным с помощью рассуждений. Его метод — это *дедукция* (от лат. *deductio* — «выведение»), переход от общего к частному. В результате современной наукой был принят метод, сочетающий в себе и тот и другой; он называется *индуктивно-дедуктивным* и заключается в последовательном движении от частного к общему и обратно.

По Фрэнсису Бэкону, эксперимент — исходный пункт истины, единственное средство, позволяющее её отыскать: «Наблюдение, бесспорно, наилучшее из доказательств, пока оно не отступает от прямых результатов опыта... Наблюдение, которое попадаетеся нам навстречу, — случайность; наблюдение, которое



Рене Декарт.





РЕНЕ ДЕКАРТ

Знаменитый французский философ, физик и математик, основоположник аналитической геометрии Рене Декарт родился 31 марта 1596 г. в небольшом городке Лаэ (ныне Декарт) в Турени, в семье члена бретонского парламента Иоахима Декарта. Мать Рене умерла от туберкулёза, когда мальчику не исполнилось и года. Декарт вспоминал: «...от матери я унаследовал сухой кашель и бледный цвет лица, которые я сохранил до двадцати лет, вследствие чего врачи, видевшие меня до этого возраста, приговаривали меня к ранней смерти».

Когда Рене исполнилось восемь лет, отец, называвший его «маленьким философом» за любовь к размышлениям, решил дать сыну достойное образование и отправил в одно из самых престижных учебных заведений Франции и Европы вообще — иезуитскую коллегию, расположенную в городке Ла-Флеш в провинции Анжу.

Её воспитанники изучали риторику, математику (которую Рене особенно любил), богословие, схоластическую философию, латинский и греческий языки. Занимались также фехтованием, физическими упражнениями и танцами. Французскому почти не уделялось внимания, и много лет спустя Декарт извинялся за орфографические ошибки перед своим главным корреспондентом — Мареном Мерсенном.

В августе 1612 г. Декарт покинул Ла-Флеш. Молодой человек находился на распутье — карьера учёного тогда не привлекала его. По настоянию отца он готовился стать офицером и упражнялся в верховой езде и фехтовании, об искусстве которого в дальнейшем написал трактат.

В 1617 г. в городе Бредá Декарт вступил добровольцем в голландскую армию, однако вскоре понял, что карьера военного не для него. Болезненный, невысокого роста и с большой головой, он явно не был прирождённым военным. О самой службе он говорил, что «большинство людей привлекается к ней двумя главными причинами — праздношью и распушенностью». Ин-

тересно, что Декарт ухитрился всё время службы провести в тылу. Мундир был для него лишь пропуском, позволявшим беспрепятственно и относительно безопасно путешествовать по обойтой пламенем Тридцатилетней войны Европе.

В первые месяцы службы Рене познакомился с одарённым голландским математиком, физиком и медиком Исааком Бекманом (1588—1637), беседы с которым возродили в нём интерес к науке. Однажды, гуляя по улицам Бреды, Декарт увидел на стене афишу на голландском языке и попросил стоявшего рядом человека (им был Бекман) перевести её текст на латынь. Бекман с улыбкой сообщил молодому офицеру, что в афише всем желающим предлагается решить трудную математическую задачу и, если юноша возьмётся сделать это, он переведёт ему условие. Декарт принял вызов и уже на следующий день сообщил Бекману решение. Они подружились. Два незаурядных учёных с удовольствием проводили время в компании друг друга, решая различные математические и физические задачи. Декарт говорил Бекману: «Я засыпал, а вы меня пробуждали». Их дружба продолжалась несколько лет и прервалась после того, как Бекман неосторожно назвал гордого француза своим учеником.

В июле 1619 г. Декарт переехал в Германию, где вступил в ряды Католической лиги, чтобы воевать с чешскими протестантами. Зимой 1619—1620 гг. он провёл в небольшом городе Нейбурге на берегу Дуная. Здесь, в маленькой комнатке, которая отапливалась небольшой печкой, учёный пережил, возможно, самые значительные моменты своей жизни. В дневнике Декарт записал: «10 ноября я начал понимать основания чудесного открытия». Скорее всего учёный имел в виду открытие им основ аналитической геометрии — науки, которая связала геометрию и алгебру. Декарту казалось, что он видит реальную возможность утверждения всех наук на основании математики, так любимой им за бескомпромиссную точность. Вероятно, тогда же он создал ос-

новные принципы своей философской системы.

В 1621 г. Декарт вышел в отставку, в феврале 1623 г. приехал в Париж, где встретил школьного друга Мерсена. Отдавая всё время занятиям научной, Декарт не сделал ни военной, ни чиновной карьеры. Желая успокоить недовольных родственников и в то же время продолжить путешествия по Европе, он решил сказать, что устроится в Альпийскую армию.

Интересно, что, прибыв в Италию, Декарт не посетил Галилея, слава о котором гремела тогда по всей Европе. Возможно, самолюбивый французский математик, чувствуя превосходство Галилея в точных науках, просто решил с ним не знакомиться. Несколько лет спустя Декарт писал Мерсенну: «Галилея я никогда не видел и не мог поэтому что-либо заимствовать у него. В его сочинениях я не нахожу ничего, что внушало бы мне зависть, и почти ничего такого, что я готов бы признать своим». Перелистав знаменитую работу Галилея «Диалог о двух главнейших системах мира...», он заметил: «Галилей довольно хорошо рассуждает о движении, там и сам я заметил несколько своих мыслей». Здесь проявился тяжёлый характер Декарта, его крайне ревностное отношение к собственной славе великого философа и математика. Он не признавал никаких авторитетов, книги читал мало и бегло. Найдя какую-нибудь новую задачу, учёный знакомился с условием, а затем сам пытался



Станок для шлифовки линз Р. Декарта.



найти решение, дабы никто не мог обвинить его в заимствовании.

Следующие три года учёный провёл в Париже, где встретил, возможно, лучших математиков страны, в том числе Жерара Дезарга, Гарди, де Бона, позднее ставшего комментатором его «Геометрии». Важнейшим событием в жизни Декарта оказался научный диспут, проходивший у папского представителя Гвиди ди Баньо и собравший всю научную и светскую элиту города. Выступал некто Шанду — врач, алхимик и авантюрист, впоследствии казнённый за изготовление фальшивых монет. Он предложил аудитории свою «новую философию», критикуя схоластику Аристотеля по примеру Фрэнсиса Бэкона и Пьера Гассенди. В ответной речи Декарт разгромил построения Шанду, показав, что любая философская система должна покоиться на строго доказанных основах. Философии Шанду и схолистиков не строятся на таких основах, и в этом их главный недостаток.

Выступление Декарта произвело большое впечатление на слушателей — их поразили его полемический талант и эрудиция. Кардинал де Брюль, покровитель учёного, выразил ему своё восхищение и убедил заняться «преобразованием философии». Рене решил отправиться в Голландию, где более мягкий климат позволял сохранить его и без того слабое здоровье, а необходимое уединение позволило погрузиться в работу. В Голландии, самой спокойной и свободной тогда стране Европы, Декарт прожил 20 лет, полных плодотворного труда. Стремясь к уединению, учёный 24 раза менял место жительства. Только его друг Мерсенн знал, где в данный момент живёт Рене.

В 1634 г. Декарт познакомился с девушкой по имени Елена Янс. Некоторое время они жили вместе. Официально отношений с ней Декарт не оформил и знакомить со своими друзьями тоже не считал нужным. В 1635 г. Елена родила ему девочку, которую назвали Франсина. Учёный очень любил дочь, но она рано умерла. Декарт говорил впоследствии, что

большого горя ему в жизни испытывать не доводилось.

Разработанная Декартом новая философия — картезианство (от латинизированной формы его имени Cartesius) — стала очень популярна в Голландии, особенно среди молодёжи. Он отверг традиционные формы передачи знания — пример, обычай, авторитет предшественников. В эпоху крушения старой геоцентрической картины мира Декарт подверг сомнению всё, кроме одного, — что мыслящий человек, безусловно, существует. Отталкиваясь от этой единственной, заведомо достоверной начальной точки познания, он пытался построить картину мироздания.

Логiku познания Декарт выстроил от простейшего и очевидного к сложному и неочевидному. Поэтому и мир он уподобил сложному механизму, состоящему из более простых деталей. Из всех имевшихся у Аристотеля видов движения Декарт оставил только механическое, сведя к нему все остальные. Основу его космологических воззрений составляет теория вихрей, согласно которой всё пространство заполнено корпускулами. Эти корпускулы вовлечены в вихревое движение, охватывающее всю Вселенную. В центре каждого вихря находится Солнце, а вихрь ответствен за движение Земли вокруг Солнца. Впрочем, Земля также оказывается в центре вихря, который движет Луну.

Картезианство было одной из самых мощных физических теорий XVII в. Она одна была способна конкурировать с теорией Ньютона. В отличие от Ньютона Декарт отрицал возможность существования пустоты, считал материю непрерывной, неделимой и заполняющей всё мировое пространство.

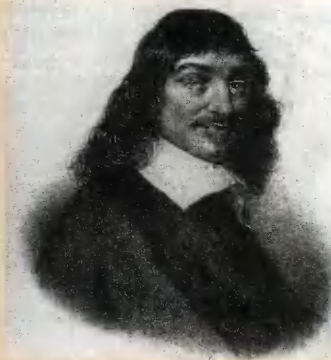
В XVIII в. один из наиболее ярких представителей картезианства, сербохорватский учёный-иезуит Руджер Йосип Бошкович (1711—1787), следуя Декарту, построил свою теорию материи. В соответствии с ней каждая частица представлялась как центр и сила: различные взаимодействующие центры притягивались или отталкивались в зависимости от действующей между ними

силы. По сути, это была одна из первых полевых теорий вещества.

С критикой учения Декарта выступили голландские церковники — хотя они и были протестантами, однако придерживались философии, предложенной Аристотелем. Против Декарта начался судебный процесс, после которого он решил покинуть страну.

В 1649 г. учёный по приглашению молодой королевы Христины, которая хотела брать у него уроки, поехал в Швецию. Декарту, привыкшему проводить утро в постели, пришлось приспособиваться к порядку, установленному его царственной ученицей. Ежедневно он вставал в пять часов утра и по морозу ехал во дворец. Здоровье его было сильно подорвано; началось воспаление лёгких, от которого 11 февраля 1650 г. Декарт умер.

Только через 17 лет его прах перевезли во Францию. Многие работы Рене Декарта, в том числе «Правила для руководства ума», были внесены Папой Римским в «Индекс запрещённых книг»; во Франции преподавание картезианства было запрещено Людовиком XIV. Почитателям учёного не удалось даже уберечь его гроб от таможенного досмотра. На похоронах величайшего мыслителя Франции, по словам его биографа, «единственными представителями правительства были сновавшие в толпе шпионы».



Рене Декарт.



более сложных, допуская существование даже среди тех, которые в естественном ходе вещей не присутствуют друг другу.

И последнее — делать всюду перечни, настолько полные, и обзоры, столь всеохватывающие, чтобы быть уверенным, что ничего не пропущено».

Метод Декарта отражает потрясение, которое испытали учёные в результате гелиоцентрической революции. Если античные мудрецы вместе со всем человечеством столь радикально ошибались на протяжении столетий, то отныне ни одно положение не могло считаться истинным, не пройдя испытание сомнением. Поэтому философия должна начинаться с сомнения во всём и затем находить точку опоры и путеводную нить, позволяющую выбраться из трясины скептицизма. Декарт находит такую точку опоры: можно сомневаться во всём, кроме собственного сомнения. Поэтому утверждение «Я сомневаюсь», или, более общо, «Я мыслю — следовательно, существую», является безусловно истинным исходным пунктом философии. Способность человека рассуждать, мыслить подтверждает существование Бога и внешнего мира. Для французского мыслителя Бог не только гарант познаваемости мира, но и источник, и причина движения. Поэтому неизменность Бога позволяет сделать вывод о сохранении движения в мире.

Экспериментальному методу Бэкона Декарт противопоставил метод логических рассуждений и попыток проникнуть в суть вещей, исходя из самоочевидных умозрительных посылок. Познаваемость мира опирается не на опыт, а на разумность его устройства. Не случайно Декарт раскритиковал книгу Галилея «Беседы и математические доказательства, касающиеся двух новых наук, механики и законов падения», главным недостатком которой считал то, что

в ней не вскрывается причина движений, а лишь описывается, как эти движения совершаются.

ИЕЗУИТЫ. НАУКА И РЕЛИГИЯ

В 1615 г., т. е. за год до запрещения инквизицией теории Коперника, в письме к Великой герцогине Тосканы Кристине Лотарингской Галилей утверждал: для того чтобы избавиться от новой идеи, недостаточно просто запретить книгу Коперника и произведения других авторов, придерживающихся таких же взглядов. Для этого нужно полностью запретить всю астрономическую науку, «даже больше того: нужно запретить людям смотреть на небо».

Доминиканский монах Томмазо Каччини, направивший в инквизицию первый донос на Галилея с обвинениями в ереси, поступил вполне последовательно, осудив в своих проповедях «мужей Галилеевских», смотревших на небо. По мнению Каччини, занятия астрономией противны Богу, ибо отвлекают мысли верующих от спасения души. Однако искоренить теорию Коперника стремились теперь совсем другим путём. Ценность познания природы никто уже не отрицал, но исследовать её нужно было правильно с идеологической точки зрения. Именно

Христиан Гюйгенс с иронией говорил: «Господин Декарт нашёл способ придавать своим догадкам и вымыслам видимость истины. С теми, кто читал его „Начала философии“, происходило нечто подобное тому, что бывает с читающими романы, которые нравятся и производят то же впечатление, что и правдивые истории».

В. Линденшмит.
Основание ордена
иезуитов.





мы ищем и находим сами, — опыт или эксперимент».

Интересы Бэкона были крайне разнообразны, а как личность он заслужил неоднозначные оценки современников — от восхищения до обвинений в мошенничестве и предательстве. Бэкон увлекался театром, и, согласно одной из версий, именно он скрывается под псевдонимом Уильям Шекспир. В 1615 г. Бэкон стал генеральным прокурором Великобритании, в 1617 г. — хранителем государственной печати, в 1618 г. — лордом-канцлером при короле Якове I. Однако уже в апреле 1621 г. палата лордов предъявила ему обвинение во взяточничестве, которое было признано судом. Бэкон лишился всех титулов и должностей. Суд приговорил его к тюремному заключению, срок которого король определил в два дня. В 1624 г. ему даровали помилование с возвращением всех титулов, но здоровье философа уже было подорвано, и вскоре он умер.

С точки зрения методологии и философии науки Фрэнсис Бэкон

проявил поразительную прозорливость и ясность ума. Однако в отдельных науках он разбирался плохо. В отличие от него Рене Декарт был превосходным учёным, что стало причиной гораздо большего влияния его взглядов на современную науку и большей известности. В час тности, он создал новый раздел математики, получивший название аналитической геометрии. В физике достижения Декарта также были весьма значительны. Он поставил проблему математизации, или, точнее, геометризации, физики, превращения её в аксиоматическую науку наподобие изложенной в «Началах» Евклида. Космологические представления Декарта долгое время соперничали с математической натурфилософией Ньютона, их разделяли такие выдающиеся учёные, как Христиан Гюйгенс и Готфрид Вильгельм Лейбниц.

Так же как и Бэкон, Декарт считал проблему метода наиболее насущной для человечества вообще: ведь мало кто на свете недоволен своим умом, каждый считает, что наделён им в надлежащей пропорции. Однако немногие умеют распоряжаться им правильно.

Метод Декарта опирается на четыре основных правила: «Первое — никогда не принимать за истинное ничего, что я не признал бы таковым со очевидностью, т. е. тщательно избегать поспешности и предубеждения и включать в свои суждения только то, что представляется моему уму столь ясно и отчётливо, что никоим образом не сможет дать повод к сомнению.

Второе — делить каждую из рассматриваемых мною трудностей на столько частей, сколько потребуется, чтобы лучше их разрешить.

Третье — располагать свои мысли в определённом порядке, начиная с предметов простейших и легкопознаваемых, и восходить мало-помалу, как по ступеням, до познания наи-





Биография физики

На латыни орден иезуитов называется «Societas Jesus» — «Общество Иисуса». Он был основан испанским дворянином Игнатием Лойолой в Париже в 1534 г.

Современный календарь называется григорианским (новый стиль), он был введен Папой Римским Григорием XIII в 1582 г. и заменил менее точный юлианский календарь (старый стиль), использовавшийся с 45 г. до н. э.

Этим занялись иезуиты, ставшие в 30-х гг. XVII в. основными оппонентами Галилея, затем Паскаля, а также Гассенди, Торричелли, Вивiani и многих других знаменитых физиков.

Иезуиты понимали, что в лице новой науки христианство получает мощного соперника, который со временем может серьезно подорвать авторитет Церкви. Не желая допустить этого, они решили сами овладеть научными знаниями и пропагандировать их, всеми средствами показывая, что в действительности никакого противоречия между наукой и верой нет. Усилия иезуитов не всегда приводили к успеху, но оказались полезны для развития системы образования. Члены ордена строили школы и совершенствовали учебные учреждения не только в Европе, но и в азиатских странах, Абиссинии (Эфиопии), Латинской Америке. В течение второй половины XVI столетия иезуиты тщательно разработали механизм получения знаний, приспособленных к потребностям времени. Его детальная структура и задачи были изложены в документе «Система, или Установление образования в Обществе Христа». Они создали целый комплекс иезуитских коллегий — учеб-

ных заведений, занимающих промежуточное положение между начальной школой и университетом и имеющих совершенно независимый от прочих церковных структур статус. Многие коллегии, как, например, Римская, оказали большое влияние на формирование интеллектуального «лица» столетия. Кафедру математики Римской коллегии долгое время возглавлял Кристофор Клавий (1537—1612) — один из авторов григорианской реформы календаря. А в коллегии города Ла-Флеш провинции Анжу познакомились Рене Декарт и Марен Мерсенн.

В своих коллегиях иезуиты строили преподавание естествознания по образцу средневековой схоластики, т. е. опирались на сочинения Аристотеля, особое внимание уделяя их согласованию с христианской теологией. В то же время иезуиты вводили элементы гуманистического образования — классическую филологию и историю Древнего мира, изучавшуюся по произведениям греческих и римских авторов. Студенты, занимавшиеся математикой, должны были осваивать самые современные методики эксперимента и задумываться о практическом значении естественных наук, поскольку, по мнению иезуитов, наука должна приносить пользу. Многие выпускники коллегий заняли впоследствии видные позиции в европейских университетах, и к середине XVII в. ордену удалось получить контроль над большинством из них.

Нередко иезуиты оказывали покровительство ученым, чьи убеждения сильно не совпадали с их взглядами. Например, когда эрцгерцог Фердинанд Габсбург (с 1619 г. император Священной Римской империи Фердинанд II) решил в 1598 г. очистить австрийские провинции от протестантской ереси, всем лютеранам Граца пришлось срочно покинуть город. Иезуиты, однако, смогли добиться, чтобы для Иоганна Кеплера было сделано исключение.





Многие открытия сделаны именно учёными-иезуитами. Например, явления дифракции и интерференции света открыл профессор математики из Болонской коллегии иезуитов патер Франческо Мария Гримальди (1618—1663). Другом и учителем Гримальди был Джованни Баттиста Риччоли (1598—1671). Вместе с Гримальди они проводили опыты по измерению скорости падения тяжёлых тел с башни дельи Азинелли в Болонье, подобные тем, которые, по словам последнего ученика Галилея Винченцо Вивiani, тот осуществил в Пизе. Риччоли убедился в справедливости галилеевского закона свободного падения, но это не помешало ему опубликовать в 1651 г. книгу «Новый Альмагест», где приведено 77 аргументов против учения Коперника.

Личный враг Галилея профессор университета в городе Ингольштадте (Бавария) Христоф Шейнер (1575—1650) был видным астрономом и талантливым математиком, вероятно первым, кто обратил внимание на пятна на Солнце и исследовал их движение. Он не смог смириться, что приоритет их открытия отдан Галилею, хотя тому и удалось впервые правильно объяснить это явление.

Новые физические теории иезуиты, как правило, рассматривали с консервативной точки зрения. И всё же догматизм был им чужд. Несмотря на явное противоречие аристотелевскому учению о неизменности надлунного мира, они согласились с теорией математика Римской коллегии Орацио Грасси, что кометы являются небесными телами, которые возникают и исчезают за пределами лунной сферы. Против этой теории выступил Галилео Галилей, ошибочно, но в соответствии с Аристотелем считавший кометы атмосферным явлением.

Однако идеологические причины не позволили иезуитам признать многие важнейшие открытия своего времени. Например, они последова-



тельно выступали против теории Коперника и препятствовали изъятию его книги из «Индекса запрещённых книг» (наряду с «Диалогом о двух главнейших системах мира — Птолемеевой и Коперниковой» Галилея) вплоть до 1835 г. Благодаря иезуитам имя Галилея выпало из материалов 2-го Ватиканского собора 1962—1965 гг., в той его части, где выражается «сожаление по поводу известных умонастроений, встречавшихся некогда в среде самих христиан из-за того, что автономия науки осознавалась недостаточно ясно, вследствие чего возникали споры и разногласия и многие люди приходили к мысли о

■ 2-й Ватиканский собор — Вселенский собор Католической церкви, проходивший в Ватикане. Его участники стремились найти способы преодоления кризиса Церкви, пути её обновления.





БЛЕЗ ПАСКАЛЬ

Даже в «век гениев», как называли XVII столетие, Блез Паскаль (1623—1662) выделялся как «король в царстве умов». Математики считают его одним из величайших математиков всех времён, физики — одним из величайших физиков, «французским Архимедом», философы называли его «французским Сократом», литераторы — «французским Данте», а религиозные мыслители — «святым». Паскаль также родоначальник компьютерной эры, потому что в 17 лет первым пришёл к идее счётной машины и сам сконструировал её. Он изобрёл барометр, высотомер, гидравлический пресс.

И это при том, что из 39 лет жизни, отпущенных Паскалю судьбой, по словам биографов, едва наберётся полтора-два года, когда он был физически здоров и мог продуктивно работать.

Паскаль родился 19 июня 1623 г. в городе Клермон-Ферран, в состоятельной дворянской семье. Его мать Антуанетта умерла, когда мальчику не было трёх лет, и Блез вместе с двумя сёстрами остался на попечении отца, полностью посвятившего себя воспитанию детей. В 1631 г. семья переехала в Париж. Маленький Блез не учился в коллеже. Хрупкий и странный ребёнок, болезненно впечатлительный, равнодушный к обычным детским играм, он требовал к себе особенно бережного отношения.

Отец Блеза Этьен Паскаль решил заниматься с сыном сам. Он старался не перегружать мальчика, составленный для Блеза план обучения предусматривал знакомство с математикой не ранее 15-летнего возраста. Однако чрезвычайная любознательность и одарённость Паскаля-младшего сместили все планы отца. Пробравшись в запретный для него книжный шкаф и обнаружив там книги по геометрии, Блез самостоятельно «открыл» для себя и усвоил всю геометрию Евклида, сделав даже собственные уточнения и дополнения к доказательству теорем.

В доме Этьена Паскаля любили собираться его друзья-учёные: математи-

ки Роберваль и Каркави, аббат Мерсенн, поддерживавший связи практически со всеми известными учёными Франции. Впоследствии этот небольшой приятельский кружок превратился в Парижскую королевскую академию естественных наук.

Блез с 13 лет участвовал в заседаниях кружка, а затем начал приносить на научные собрания собственные сочинения. Уже в 16 лет он доказал свою «великую Паскалеву теорему» (о шестиугольниках, вписанных в конические сечения) и вывел из неё около 400 следствий, которые легли в основу новой науки — проективной геометрии.

В 1640 г. Этьен Паскаль был назначен интендантом города Руан. Ему часто приходилось проводить громоздкие математические вычисления, и Блез решил создать для отца механическое устройство, позволяющее быстро выполнять арифметические действия. Он потратил на его разработку пять лет, рассмотрев 50 вариантов механизма. Конструкция не получила широкого распространения. Она оказалась слишком сложной и дорогой, к тому же скорость вычислений оставалась желать лучшего. Напряжённая работа над счётной машиной подорвала и без того слабое здоровье учёного. Позже он писал: «Начиная с 18 лет не помню ни одного дня, когда мог бы сказать, что был вполне здоров».

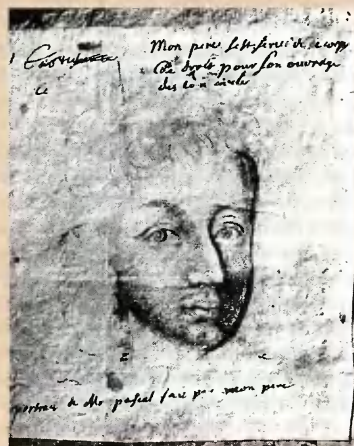
В Руане произошло ещё одно важное событие в жизни Паскаля. Он познакомился с двумя братьями-врачами, последователями учения известного проповедника Янсения (1585—1638). На некоторое время Блез забросил науку и целиком посвятил своё время изучению работ Янсения. В семье Паскалей всегда царил дух почтительного отношения к догматам и обрядам религии, но они не могли удовлетворить пылкий ум Блеза. В янсенизме его привлекла логичность нравственного учения в противоположность официальному католицизму, во главу угла ставившему преклонение перед авторитетом Церкви. Янсений вносил разум в сферу религиозного опыта, и потому с его учением не могла примириться

Римско-католическая церковь, которая позднее (в 1710 г.) с помощью иезуитов добилась уничтожения главной общины янсенистов — аббатства Пор-Рояль.

«Первое обращение» Паскаля в веру не изменило пока привычного течения жизни: в его вере было больше согласия со стороны разума, чем зова сердца. Сердце по-прежнему влекло к науке, на этот раз к физике.

В 1646 г. от коменданта Руанской крепости Пьера Пети Паскаль узнал об опытах итальянского естествоиспытателя Эванджелисты Торричелли, доказавшего существование пустоты и атмосферного давления. Вместе они повторили эксперимент Торричелли, но не с ртутью, а с водой и вином. Эксперименты подтвердили выводы Торричелли, а ещё через два года Блез задумал свой знаменитый опыт на горе.

Торричелли предполагал, что ртуть не вся вытекает в чашу через открытое отверстие, поскольку удерживается весом воздуха, давящего на поверхность ртути в чаше, но обосновать это и доказать существование атмосферного давления он не смог. Паскаль решил, что раз ртуть поднимается вследствие давления на неё столба воздуха, то, уменьшив его высоту, можно уменьшить и его вес, а следовательно, и осла-



Блез Паскаль. Рисунок Дома.



бить атмосферное давление. Для этого необходимо было повторить опыт на вершине какой-нибудь горы. Он написал мужу своей старшей сестры Флорену Перье и попросил его проверить это предположение, поднявшись на гору Пюи-де-Дом. Как и предсказывал Паскаль, на вершине уровень ртути упал. Гипотеза атмосферного давления получила блестящее подтверждение.

Оставался ещё один важный вопрос: каким образом давление воздуха передаётся во все стороны, когда, казалось бы, он должен давить только вниз? Ответ на него содержался в законе, о котором интуитивно догадывался Торричелли и который был сформулирован Паскалем и получил его имя: «Жидкость полностью передаёт давление, и давление жидкости распространяется равномерно во все стороны».

С многовековой «боязнью пустоты» было покончено, что позволило потом Ньютону совершенно не бояться идеи пустого пространства, которая лежит в основе его построенной уже на чисто умозрительных принципах механики.

Однажды Паскаль с друзьями катался в карете. Неожиданно лошади сорвались с моста в реку, а карета с учёным и его товарищами благодаря счастливой случайности задержалась на краю. Случившееся произвело на Блеза огромное впечатление. Своё спасение он расценил как знак свыше и решил остаток жизни посвятить служению Богу. Этому способствовала также смерть отца в 1651 г. «Второе обращение» Паскаля в веру было гораздо серьёзнее первого. Оно перевернуло всю его жизнь. Вскоре учёный покинул Париж, чтобы жить в аббатстве Пор-Рояль, стать пропагандистом и защищать янсенизм от нападок иезуитов и Рима. 23 января 1656 г. он опубликовал памфлет «Письма к провинциалу», направленный против иезуитов и вызвавший огромный резонанс во Франции. Затем Паскаль написал знаменитые «Мысли», своё самое значительное философское сочинение. Католическая церковь запретила «Мысли» и предала анафеме их автора. Научный мир, со своей стороны, с большим

сожалением отметил, что потерял в лице Паскаля великого учёного, забросившего науку ради религии.

Однако разум и вера уживались в душе Паскаля. В конце 1654 г. он практически одновременно испытал и религиозное, и научное озарение. Он заложил основы новых математических наук — теории вероятностей и математического анализа.

Науку о вероятности Паскаль стал создавать (и подключил для этого ещё Пьера Ферма) вроде бы ради пустяка — изучая азартные игры. Великосветские друзья упростили его определить наиболее выигрышный шанс при бросании игральных костей. Попутно Паскаль разработал и требовавшуюся здесь комбинаторику, подготовив всё необходимое для Ньютона, благодаря чему тот открыл формулу своего знаменитого бинома. Паскаль не скрывал, что математика сама для него лишь игра, — великолепная игра ума, в которой он всегда брал только крупные выигрыши.

Странда бессонницей «одной весенней ночью» 1658 г. учёный с полной ясностью осознал сущность процесса интегрирования бесконечно малых. Для завершения создания интегрального исчисления осталось лишь перевести геометрические рассуждения Паскаля на формальный вычислительный язык, чтобы получить основную формулу интегрального исчисления, названную позже формулой Ньютона — Лейбница. Лишь этого, последнего, шага Паскаль в ту ночь не сделал (а больше уже к теме не возвращался). Готфрид Вильгельм Лейбниц добился успеха после долгих поисков только в 1673 г. — сразу после того, как Христиан Гюйгенс указал ему на работу Паскаля. Она прямо подводила к окончательному результату.

На первых порах Паскаль даже не хотел записывать свои исследования, так что Лейбниц мог никогда их не увидеть. Они вышли в свет по настоянию одного из друзей Паскаля, подобно тому как друзья уговорили Ньютона издать его «Математические начала».

Последние годы Блез вёл крайне аскетический образ жизни. Все сво-

бодные средства он отдавал на благотворительные цели. Изыскивая деньги для одного из своих благотворительных проектов, он придумал устроить в Париже кареты для бедных — омнибусы, ставшие предшественниками общественного транспорта.

Тем временем его здоровье продолжало стремительно ухудшаться, и 19 августа 1662 г. Блез Паскаль умер от тяжёлой болезни кишечника.

Паскаль часто шёл против своего времени. В век рационализма, верившего в безграничные возможности человеческого разума, он вдруг заговорил о его ограниченности, подчеркнув, что «мы постигаем истину не только разумом, но и сердцем». «Французский Сократ» мог сказать: «Философия не стоит и часа труда» или: «Смеяться над философией — значит истинно философствовать». Паскаль любил, как он сам выражался, «срывать ум с петель». Но смеялся он не над философской мыслью как таковой, а над «системами», претендовавшими на объяснение всего в мире (и даже на доказательство бытия Бога (что пытался, например, сделать Декарт)).

«Главное достоинство человеческой мысли, — говорил Паскаль, — в том, что она может постигнуть существование вещей, ей в принципе недоступных, — таких, где разум должен уступить место вере». «Человек — всего лишь „мыслящий тростник“, — писал Паскаль. Эти мысли о границах познавательной способности разума в XVIII в. развил Иммануил Кант. В целом же вклад Паскаля в науку и человеческую мысль был оценён лишь в XX столетии.



Вычислительная машина Б. Паскаля.



Игнатий Лойола.

том, что вера и наука противоречат друг другу».

Второй теорией, с которой иезуиты воевали столь же ревностно, как и с теорией Коперника, и тоже на идеологических основаниях, был атомизм.

Античный атомизм в XVII столетии получил новое значение: он превратился в учение о строении вещества. Очень тесно с атомами связывались представления о пустоте, которые также были опасны с идеологической точки зрения. Пустота противоречила аристотелевской физике, и к тому же передача взаимодействий через пустоту могла осуществляться лишь демоническими силами. Первый импульс к возрождению античного атомизма дали гуманисты, которых привлекала его этическая часть: учения о том, что свобода воли и стремление к счастью являются основой морали. Однако учёных, интересовавшихся изучением природы, больше привлекала объяснительная сила этой теории.

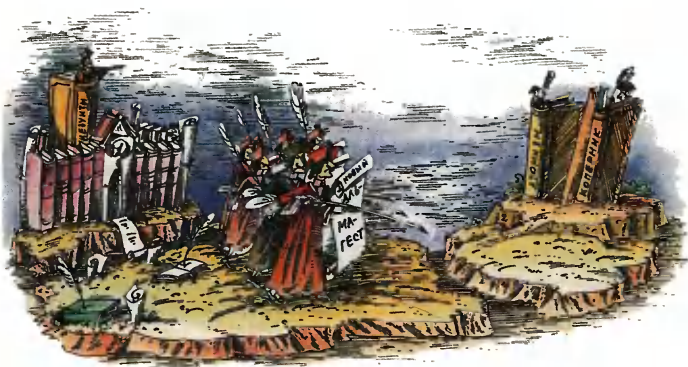
В своём первом научном трактате «О движении», написанном около 1590 г., Галилей осторожно ввёл атомистические воззрения, чтобы объяснить, почему во Вселенной тяжёлые тела стремятся к центру, а лёгкие — к периферии. Тогда он ещё не был знаком с теорией Коперника или по крайней мере не был её сто-

ронником и вместе со всеми полагал Землю центром Вселенной. Чем ближе к центру, писал он, тем меньше становится пространства, и поэтому понятно, почему более плотным телам там легче расположиться. Ведь в них такое же количество атомов расположено в меньшем пространстве.

В конце 70-х гг. XX столетия в архивах Ватикана был обнаружен анонимный донос на Галилея, автор которого информировал церковные власти о защите учёным атомистических воззрений в другом, более позднем сочинении — «Пробирных дел мастер». Там же указывалось на то, что атомистическое учение является еретическим, поскольку находится в явном противоречии с толкованием Библии, принятым Тридентским собором. По мнению некоторых историков, если бы делу был дан ход, Галилей оказался бы в ещё большей опасности, чем в годы осуждения теории Коперника. Кстати, вопреки распространённому мнению, совсем не защита теории Коперника стала основной причиной осуждения Джордано Бруно. Не меньшую роль в этой истории сыграли его атомистические воззрения.

В 1624 г. в Париже трое химиков — Этьен де Клав, Жан Бито и Антуан Вийон — попытались организовать диспут, чтобы защищать идеи атомизма от любого, кто придерживался противоположных взглядов. Диспут, однако, не состоялся, его запретили церковные власти, а всем троим было предписано в течение 24 часов покинуть Париж.

Это событие так повлияло на учёного из французского города Эксан-Прованс Пьера Гассенди (1592—1655), что он прекратил работу над книгой «Вразрез с общепринятым мнением идущие рассуждения против аристотеликов» и сложил рукопись в углу, «оставив о ней всякую заботу и предоставив ей самой бороться с молью и паутиной».





Ещё большее замешательство при публикации своих корпускулярных и гелиоцентрических взглядов испытал и Рене Декарт. В 1633 г. был практически готов его трактат «Мир, или Трактат о свете». Как писал Декарт, уже собираясь передать своё произведение в руки издателя, он вдруг узнал, что лица, которых учёный уважал и чей авторитет считал не меньше, чем авторитет собственного разума по отношению к своим мыслям, «не одобрили одного положения из области физики, опубликованного ранее другим автором». (Он имел в виду Галилея и его подвергнутое осуждению учение о движении Земли.) Декарт решил воздержаться от публикации трактата, который вышел лишь в 1664 г., после смерти автора.

С большей свободой мог высказываться принадлежавший к Англиканской церкви Фрэнсис Бэкон — для него решения католического Тридентского собора не были обязательны. Бэкон считал, что Демокрит «глубже проник в природу, чем прочие», потому что «рассекать» лучше, чем «абстрагировать». Иначе говоря, мыслить первичную материю состоящей из атомов лучше, чем представлять её бесформенным Хаосом.

Однако если, по мнению большинства учёных, вопрос об атомарной структуре материи относился к области философии, то существование пустоты, как казалось тогда, воз-

можно проверить экспериментально. Первые такие эксперименты запланировали и провели ученики Галилея Эванджелиста Торричелли и Винченцо Вивiani в 1644 г. Для своих опытов они использовали стеклянные трубки различной формы, запаянные с одного конца и заполненные ртутью. Когда трубку переворачивали запаянным концом вверх, ртуть частично вытекала в резервуар и над ней образовывалась пустота, названная *торричеллиевой*. Было предложено множество экспериментов для доказательства того, что над ртутью действительно ничего нет. Например, помещали туда колокольчик, звук которого не был слышен, или бабочку, которая не могла летать в трубке.

Однако результаты этих опытов не убеждали иезуитов, и их возражения не лишены оснований. Хотя атомистические теории XVII столетия сыграли огромную роль в становлении физики, многие аргументы против них были повторены в XX в., когда стало ясно, что картина мира, использованная атомистами, является по меньшей мере неполной. Вакуум современной науки — сложнейшая и загадочная физическая структура, совершенно непохожая на пустоту атомистов. Атом оказался совсем не таким неделимым, как предполагали, а на вопрос: «Из каких первоэлементов сделан мир?» — до сих пор не может ответить ни один человек.



Марка, выпущенная Ватиканом в честь развития науки.



Руанские опыты Б. Паскаля по измерению давления воздуха с помощью водяного барометра.

ИСААК НЬЮТОН

Самому важному сочинению своей жизни Исаак Ньютон дал заглавие «Математические начала натуральной философии». В употреблении такого обобщающего названия совсем не было преувеличения: речь шла именно о натуральной философии, а не о механике, как может по-

казаться современному читателю. Более того, латинское слово *mechanica*, иногда встречающееся у Ньютона, автор русского перевода Алексей Николаевич Крылов передавал выражением «учение о машинах». Он стремился подчеркнуть и то, что современники Ньютона понимали



значение этого слова иначе, и то, что содержание книги было шире просто механики. Здесь английский учёный изложил первую научную теорию, дающую принципиальную возможность объяснить и с произвольной точностью количественно рассчитать практически любое явление природы.

Это сочинение Ньютона превратило физику в уникальную область человеческих знаний, методы которой обладают почти универсальной приложимостью. Нельзя представить какой-нибудь закон химии, применимый за её пределами; столь же трудно представить закон биологии, полезный для какой-нибудь другой науки. К грандиозной конструкции Ньютоновых «Начал», казалось, оставалось добавить совсем немного, чтобы выведенные там законы могли использоваться и для описания внутриклеточных процессов, и для движения галактик.

Конечно, кризис физики начала XX в. и последовавшее за ним возникновение квантовой теории и теории относительности существенно изменили облик теоретической физики, и ей пришлось отказаться от многих классических представлений, принятых Ньютоном.

В частности, нельзя было больше считать, что скорости тел и их координаты могут быть одновременно измерены с произвольной точностью или же что физические процессы протекают одинаково как в отсутствие, так и при наличии наблюдателя. Однако в самом общем виде суть методологии не изменилась: любое явление можно представить упрощённой моделью, в которой сталкивающиеся молекулы или разлетающиеся галактики, аминокислоты или пептидные основания считаются матери-

альными точками или их совокупностью, а их взаимодействие описывается тем или иным законом. Для модели пишется уравнение, затем оно каким-либо способом решается, а получившееся решение вновь расшифровывается для реальных объектов задачи — молекул, галактик, аминокислот и т. д. Ничего подобного не существовало в предшествующей физике, заимствовавшей свои принципиальные черты из философии Аристотеля.

По словам самого Ньютона, успех ему сопутствовал лишь потому, что он «стоял на плечах гигантов». Но то, что именно ему довелось сыграть ключевую роль в истории, указывает на него как на человека уникальных способностей и уникальной судьбы.

МОЛОДЫЕ ГОДЫ

Исаак Ньютон родился 25 декабря 1642 г. По новому стилю, который англичане не торопились вводить у себя, полагая его причудой католиков, это произошло 4 января 1643 г. (Правда, англичане сочли бы его всё равно 1642-м, так как началом года считали тогда 25 марта.) Отец Ньютона, тоже Исаак Ньютон, владеец небольшого поместья Вулсторп в графстве Линкольншир, умер за три месяца до рождения сына. Роды оказались преждевременными, ребёнок родился маленьким и хилым. Как впоследствии шутил сам Ньютон, младенцем его можно было засунуть в пивную кружку. Сомневались, что мальчик выживет, но он уцелел и прожил длинную жизнь, более не больше обычного. Хотя это была довольно странная жизнь: Ньютон никогда не покидал пределов Англии и даже ни разу не выезжал далее 200 км от Кембриджа. Прожитые им годы отмечены многочисленными социальными катаклизмами в стране: Английской буржуазной революцией, казнь в 1649 г. короля Карла I,

Исаак Ньютон.
Портрет работы
Г. Кнеллера.





протекторатом (военной диктатурой) Оливера Кромвеля, установленным в 1653 г., реставрацией в 1660 г. династии Стюартов, колоссальным лондонским пожаром 1666 г., «Славной революцией» 1688—1689 гг., денежной реформой. Однако все эти тревожные события мало затронули его жизнь, она всегда оставалась одинаково размеренной, подчинённой строгому распорядку. Болезненно обидчивый и щепетильный, Ньютон любил уединение и свои занятия, чрезвычайно дорожил временем. Он не был женат, скорее всего никогда всерьёз не влюблялся, почти не имел друзей.

Родители Ньютона были фермерами. Ту же судьбу мать, Ханна Эйскоу, с отчимом, Барн абасом Смитом, готовили и ему. Правда, фермерство приносило им хорошую прибыль: годовой доход его матери после смерти второго мужа составлял более 700 фунтов стерлингов, чему могли бы позавидовать многие аристократы. В самом начале карьеры Ньютон, пренебрегший семейной традицией и не захотевший работать на земле, получал всего несколько фунтов в год; и даже став люкасовским профессором, он получал не более 100 фунтов в год.

К счастью для человечества, Ньютона всё-таки отправили учиться в сельскую начальную школу и затем в среднюю школу. Ещё ребёнком Ньютон обнаружил выдающиеся способности и великолепную память. Во взрослой жизни ему пригодились и многие технические навыки, приобретённые в детстве. Исаак очень любил мастерить: по дошедшим до нас рассказам, он изготовил модель мельницы, колесо которой приводила в движение мышь, а кроме того, делал различные часы, фонари и воздушных змеев, загоравшихся в воздухе (ими он пугал соседей).

Когда же Ньютону исполнилось 17 лет, его мать решила, что учиться хватит и пора браться за дело — за



Дом в имении Вулсторп, где родился И. Ньютон.

плут и сенокосилку. Отчаянию Исаака не было границ, в негодовании он даже грозил матери сжечь имение. Однако его дядя, Уильям Эйскоу, убедил мать, что юноше надо поступать в университет. И летом 1661 г. Ньютон стал студентом Тринити-колледжа (*англ.* Trinity — «Святая Троица») Кембриджского университета.

Студенты этого учебного заведения подразделялись на очень богатых — членов общины, просто богатых — пенсионеров (их было большинство) и бедных, которые не могли содержать себя сами и нуждались в стипендии. Положение стипендиатов было довольно униженным: им приходилось отрабатывать свои стипендии, прислуживая старшим и лучше обеспеченным студентам. То, что Ньютон учился в колледже на стипендию, можно объяснить лишь скупостью его матери, с неохотой поддавшейся на уговоры брата.

Тем не менее уже в 1664 г. Ньютону удивительным образом удалось добиться изменения своего положения в колледже и стать «учёным» (*англ.* scholar), что позволило ему продолжить научную карьеру после окончания университета. Год спустя он получил степень бакалавра, что также необычно рано для его положения и возраста. Теперь Ньютон стал самостоятельным учёным и мог

И. Ньютон в детстве. Гравюра.





Кембридж. Ворота
Тринити-колледжа.

заниматься тем, чем ему хотелось; своей свободой он пользовался в полной мере, проводя эксперименты и штудиря научные труды.

Интересно, что именно изучал Ньютон. Например, Евклида читать ему не захотелось: он назвал его «Начала» «срундой» и предпочёл им «Геометрию» Декарта. Внимательно и с удивлением он прочитал Галилеев «Диалог о двух главнейших системах мира — Птолемеевой и Коперниковой» в английском переводе, а другое крупное произведение итальянского учёного — «Беседы и математические доказательства, касающиеся двух новых наук, механики и законов падения» — осталось ему, по-видимому, неизвестным. Ньютона очень заинтересовали работы Иоганна Кеплера по оптике, а также атомистическая философия Эпикура и Пьера Гассенди.

Ньютона привлекали также алхимия и теология. Получив возможность самостоятельно заниматься научной деятельностью, он приобрёл необходимое для лаборатории оборудование и почти не выходил из своей комнаты, практически всё время отдавая алхимическим опытам.



ВУЛСТОРПСКИЙ ЗАТВОРНИК

Однако вскоре Ньютону пришлось прервать свои занятия: в июне 1665 г. во время разгара эпидемии чумы университеты закрыли. Более полутора лет он вынужден был провести в имении матери, которая, очевидно, уже оставила надежды сделать из сына фермера и не донимала его предложениями заняться хозяйством. Ньютон был предоставлен самому себе и, как он признавался в своих записках, во время уединения в Вулсторпе «думал о математике и философии больше, чем когда-либо прежде».

Именно к этому времени относятся многие наиболее значительные из его открытий. В математике учёный пришёл к идее разложения функций в ряды и смог получить ряды произвольных степеней бинома (см. статью «Бином Ньютона» в томе «Математика» «Энциклопедии для детей»), им были заложены основы математического анализа, найдены способы вычисления производных (он назвал их прямым методом флюксий) и неопределённых интегралов (обратный метод флюксий). Тогда же у него созрел замысел оптических экспериментов с призмами, и он вплотную подошёл к открытию закона всемирного тяготения.

Однако пока это были не окончательные формулировки, а лишь самые общие идеи, которые требовалось додумать и уточнить. Стремясь к совершенству, Ньютон многократно возвращался к одним и тем же проблемам, медлил с публикацией своих открытий. И, к сожалению, многое из сделанного им опубликовали раньше него другие учёные. Ньютон тяжело переживал, когда в 1668 г. вышла в свет книга немецкого математика, астронома и инженера Николауса Меркатора «Логарифмотехника», в которой впервые был изложен метод разложения фун-



ЯБЛОКО НЬЮТОНА

Нужен был гений Ньютона, чтобы удивиться тому, что яблоко упало на землю...

К. Д. Ушинский

История о том, что однажды, гуляя в саду, Ньютон увидел, как с ветки упало яблоко, и это подтолкнуло его к открытию закона всемирного тяготения, стала уже легендой. Неудивительно, что многие историки науки и учёные пытались установить, соответствует ли она истине. Ведь без закона всемирного тяготения не было бы знаменитой книги Ньютона «Начала». Вот что рассказывает в «Воспоминаниях о жизни Исаака Ньютона» его друг Уильям Стекли, посетивший Ньютона 15 апреля 1725 г. в Лондоне: «Так как стояла жара, мы пили послеобеденный чай в саду, в тени раскидистых яблонь. Были только мы вдвоём. Между прочим он (Ньютон. — *Прим. ред.*) сказал мне,

что в такой же точно обстановке ему впервые пришла в голову мысль о тяготении. Она была вызвана падением яблока, когда он сидел, погрузившись в думы...».

Мемуары Стекли вышли в свет лишь в 1936 г., однако в 1728 г., через год после смерти великого учёного, Вольтер в книге, посвящённой изложению идей Ньютона, приводит аналогичную историю. При этом он ссылается на свидетельство Катарины Бартон, племянницы и компаньонки Ньютона, прожившей рядом с ним 30 лет. Её муж, Джон Кондуит, работавший ассистентом у Ньютона, писал в своих мемуарах, опираясь на рассказ самого учёного: «В 1666 году Ньютон был вынужден на некоторое время вернуться из Кембриджа в своё поместье Вулсторп, так как в Лондоне была эпидемия чумы. Когда он однажды отдыхал в саду, ему, при виде падающего яблока, пришла в голову мысль, что сила тяжести не ограничена поверхностью

Земли, а простирается гораздо дальше. Почему бы и не до Луны?!». Лишь через 20 лет (в 1687 г.) были опубликованы «Математические начала натуральной философии», где Ньютон доказал, что Луна удерживается на своей орбите той же силой тяготения, под действием которой падают тела на поверхность Земли.

В журнале «Современная физика» (*англ.* «Contemporary Physics») за 1998 г. англичанин Кизинг, преподаватель Йоркского университета, увлекающийся историей и философией науки, опубликовал статью «История Ньютоновой яблони». Кизинг придерживается мнения, что легендарная яблоня была единственной в садике Ньютона, и приводит рассказы и рисунки с её изображениями. Легендарное дерево пережило Ньютона почти на сто лет и погибло в 1820 г. во время сильной грозы. Кресло, сделанное из него, хранится в Англии, в частной коллекции.

кий в ряды. Тем не менее своей книги по математике он так никогда и не издал — большое количество полученных им результатов оставались неизвестными на протяжении трёх веков, пока в середине XX в. их не напечатили в многотомнике «Математические рукописи Ньютона».

Точно также Ньютон ждал 20 лет, прежде чем решился написать о своих исследованиях по теории тяготения. Их главным итогом стали открытие закона обратных квадратов и построение на его основе небесной механики.

Когда занятия в университете возобновились, Ньютон вернулся туда уже не талантливым студентом, а зрелым учёным с вполне сложившейся методологией и своеобразным научным почерком. В 1669 г. он получил должность профессора и люкасовскую кафедру математики, которую занимал более 30 лет.

ЛЮКАСОВСКИЙ ПРОФЕССОР

В течение трёх веков существования Кембриджского университета — с момента основания и до времён Ньютона — в нём не было кафедры математики. И лишь в 1663 г. такую кафедру создали на средства некоего Генри Люкаса, имя которого сохранилось в истории только благодаря этому факту. Преподававший до того времени греческий язык Исаак Барроу (1630—1677) занял её первым. Он с самого начала высоко оценил математические способности Ньютона, а когда в 1667 г. в руки Барроу попала рукопись молодого учёного «Об анализе», профессор стал говорить о нём как о человеке «гениальных способностей».

В 1669 г. Барроу должен был оставить кафедру, так как получил приглашение к королевскому двору. Он порекомендовал Ньютона в качестве



своего преемника. Однако Ньютон, видимо, не был хорошим преподавателем: студенты его лекции почти не посещали. По воспоминаниям одного из современников, «немногие приходили его послушать, а ещё меньше понимали его; так что часто в отсутствие слушателей ему приходилось читать стенам».

Карьеру Ньютона едва не погубили его теологические занятия. Углубившись в изучение священных текстов, он понял, что не может согласиться с общепринятым толкованием догмата о Святой Троице. Божественным мог быть только Святой Дух, но никак не Христос — хотя и посланный Богом на Землю, однако всё же вполне обыкновенный человек. Такие взгляды объединялись в доктрину, известную в те времена как арианская ересь. Будучи арианином и человеком необычайно щепетильным — в особенности в вопросах

веры, — Ньютон не считал для себя возможным принять сан, что для профессоров Тринити-колледжа было обязательным.

На помощь пришёл счастливый случай: указ короля отменил необходимость рукоположения именно для люкасовских профессоров. Так что Ньютон мог продолжать преподавание, не являясь священником.

СВЕТ ИЛИ ЦВЕТ?

Будучи профессором математики, Ньютон большую часть своих занятий посвящал оптике. Свет и его свойства были в центре внимания естествоиспытателей в течение многих веков. А в XVII в. к этому интересу добавилось ещё одно немаловажное обстоятельство. Искусство печати, зародившееся в середине XV в., долгое время оставалось в основном чёрно-

ТЕЛЕСКОП И ОШИБКА

Ньютон стал членом Королевского общества в 1672 г. и даже произвёл там своего рода сенсацию, продемонстрировав свой новый телескоп. До него для астрономических наблюдений применялись две системы телескопов — галилеевская и кеплеровская. В телескопе Галилея объективом служила выпуклая линза, а окуляром — вогнутая, в телескопе Кеплера линзы объектива и окуляра были выпуклыми. И в той, и в другой системе увеличение достигалось за счёт преломления света, отсюда название «телескоп-рефрактор» (от лат. *refractus* — «преломлённый»).

В телескопах-рефлекторах (от лат. *reflecto* — «отражать») роль объектива выполняет зеркало. В первом рефлекторе Ньютона (1668 г.) было одно вогнутое зеркало; второе небольшое плоское зеркало направляло изображение вбок, где наблюдатель рассматривал его в окуляр. Поводом к изобретению Ньютоном телескопа-

рефлектора послужила одна своеобразная теоретическая ошибка. Все известные тогда линзы обладали свойством хроматической аберрации: из-за того, что для света разной окраски коэффициент преломления оказывался различным, изображение размывалось, становясь красным на внешней по отношению к оптической оси стороне и синим — на внутренней.

Ньютон считал, что зависимость коэффициента преломления от окраски света не связана с материалом, из которого сделана линза; по его мнению, это означало, что аберрацию нельзя устранить с помощью комбинации различных стёкол. Телескоп-рефлектор был лишён хроматической аберрации.

Впоследствии выяснилось, что Ньютон ошибся. Коэффициент преломления по-разному зависит от длины волны, следовательно, можно изготовить телескоп-рефрактор, свободный от этого дефекта, если склеить линзы из специально подобранных сортов стекла. Тем не менее даже в

наши дни важнейшие астрономические наблюдения проводятся с помощью рефлекторов большого размера по причинам, не связанным с хроматической аберрацией.



Телескоп-рефлектор И. Ньютона.



белым, хотя уже первое издание Библии 1450 г., осуществлённое немецким изобретателем книгопечатания Иоганном Гутенбергом, содержит некоторые заглавные буквы, выполненные в два цвета. На протяжении всего XVI столетия многие мастера-печатники пытались получить различные цвета, смешивая разные краски. Выяснилось, что основные потребности цветной печати покрываются, если использовать всего четыре краски: три цветные и чёрную. Известный английский физик и химик Роберт Бойль (1627—1691) знал, что для печати достаточно четырёх цветных красок, и был уверен: их число можно уменьшить до трёх (впоследствии это оказалось неверным).

Бойль ещё не смог прийти к выводу, полученному Ньютоном в годы вулсторпского уединения, что белый свет — это смесь всех цветов радуги и призма не окрашивает свет, а лишь разлагает его на составные части. Однако он вплотную приблизился к такому выводу, утверждая, например, что окраска поверхности возникает как следствие её собственных свойств, а не свойств света. Так, чёрное тело просто поглощает весь падающий на него свет. Это Бойль доказывал тем, что рука в чёрной перчатке нагревается на солнце гораздо сильнее, чем рука в белой.

Ньютон много размышлял об опытах Бойля. Он смог сконструировать оптическое экспериментальное устройство, состоящее из двух призм и диафрагм различной формы. С помощью этого устройства учёный показал, что если из разложенного призмой спектра вырезать луч определённого цвета и направить на другую призму, то она никак не изменит его.

Основываясь на результатах этого и подобных опытов, Ньютон сделал попытку построить свою теорию цвета и света, оспаривая мнение Декарта, утверждавшего, что свет — «давление». (Сам Ньютон считал, что



Доклад И. Ньютона в Лондонском королевском обществе.

свет — «тело».) Если бы свет был давлением, говорил он, то люди видели бы ночью так же хорошо, как днём, а возможно, даже лучше. Правда, объяснение, которое Ньютон дал такому утверждению, весьма туманно. Свои соображения он изложил в мемуаре «Новая теория света и цветов» и представил его 6 февраля 1672 г. Лондонскому королевскому обществу. Многие его члены не согласились с выводами учёного, и прежде всего с тем, который касался «телесных» свойств света. Роберт Гук и Христиан Гюйгенс показали, что эксперименты Ньютона могут быть в равной степени объяснены иначе, хотя и приняли его главный тезис: белый свет не является простым, а представляет собой смесь лучей всех цветов радуги в равных долях.

Полемизируя с ними, Ньютон строил свою защиту на том, что в мемуаре не было окончательного утверждения: «Свет — тело», а содержалось лишь предположение: «Свет, наверное, тело». Он изобретательно продемонстрировал трудности волновой теории; среди них, по его мнению, сложнее всего было объяснить прямолинейное распространение света. Ньютон даже предложил компромиссный вариант, объединивший



Реконструкция облика Роберта Гука по описаниям современников (портреты не сохранились).



волновые свойства света с корпускулярными, показав, как хорошо можно объяснить происхождение цветов тонких плёнок, исходя из волновых свойств. И всё же эта дискуссия надолго испортила отношения учёного с другими членами Королевского общества, прежде всего с Робертом Гуком (1635—1703), одним из его основателей.

Прохладная реакция со стороны членов Королевского общества тяжело переживалась Ньютоном. Хотя оптикой он продолжал заниматься до конца жизни, его большое сочинение, посвящённое данной теме, вышло лишь спустя более 30 лет, в 1704 г., после смерти Гука.

«МАТЕМАТИЧЕСКИЕ НАЧАЛА» ВСЕМИРНОЙ ИЗВЕСТНОСТИ

Переворот в космологии, начатый Николаем Коперником и развивавшийся в течение всего XVI столетия, окончательно подорвал изложенные в физике Аристотеля основы, позволявшие объяснить движение в Космосе. Даже независимо от правильности или неправильности утверждений Коперника Земля больше не могла служить единым центром космических вращений. Открытые Галилеем Медичейские светила — спутники Юпитера — вращались вокруг него, спутники Сатурна ещё не были обнаружены, но за спутники принимали его кольца, высказывались предположения, что у Марса тоже есть свои спутники. Законы Кеплера хорошо описывали эти вращения, но их связь с динамикой оставалась неизвестной.

Идея всемирного тяготения была уже выдвинута учеником Галилея, итальянским врачом и естествоиспытателем Джованни Альфонсо Борелли (1608—1679). Ньютон добавил к ней лишь две существенные детали: во-первых, не только тяжёлые

тела притягивают лёгкие, но и лёгкие притягивают тяжёлые; во-вторых, тяжесть тел — это и есть их притяжение к Земле. Кроме того, ещё в период вулсторпского уединения учёный вывел закон обратного квадрата, основываясь на идее равновесия силы тяготения и центробежной силы, а также полагая справедливым третий закон Кеплера. Рассуждение Ньютона таково: центростремительная сила прямо пропорциональна квадрату угловой скорости и радиусу

$$F \sim \omega^2 R = \frac{4\pi^2 R}{T^2},$$

а так как по третьему закону Кеплера

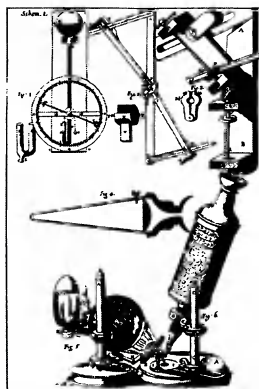
$$T^2 \sim R^3,$$

то сила оказывается обратно пропорциональной квадрату радиуса.

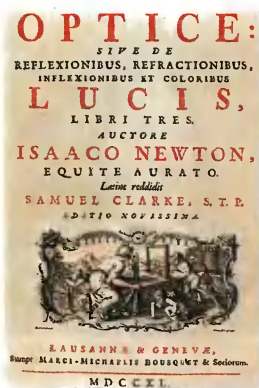
Таким образом, Луна всё время падает на Землю, но никак не может на неё упасть из-за того, что её удерживает центробежная сила, или, иначе говоря, увлекаемая собственной инерцией, она постоянно пролетает мимо. Вихри Декарта оказались ненужными для объяснения движения по орбите.

Между тем Ньютон понимал, что подобные объяснения требуют тщательной проверки и вычислений. И прежде чем он пришёл от этих довольно общих идей к точной и полной теории, должны были произойти два важных события, подтолкнувшие учёного к её разработке и изложению в книге. Первым из них стало неожиданное письмо Роберта Гука, отношения с которым у Ньютона со времён дискуссии по поводу природы света оставались натянутыми, почти враждебными.

Это письмо было написано Гуком 9 декабря 1679 г. Сославшись на то, что его избрали секретарём Лондонского королевского общества, Гук предложил Ньютону возобновить переписку, прерванную из-за вышеупомянутой дискуссии. Перечислив наиболее интересные, с его точки



Микроскоп Р. Гука. Иллюстрация из книги «Микрография». 1665 г.



И. Ньютон. Книга «Оптика». Титульный лист. Лозанна. 1740 г.



зрения, проблемы физики, Гук пригласил Ньютона высказаться по их поводу. Практически все они так или иначе связаны с космологией или астрономией: здесь и прочерчивание береговых линий Франции, основанное на предложенном Галилеем методе определения долготы места с помощью спутников Юпитера, и измерение звёздного параллакса, вызванного вращением Земли вокруг Солнца, и другие, уже чисто механические способы проверки теории Коперника.

В завязавшей переписке обе стороны держались в высшей степени учтиво и друг к другу обращались с подчеркнутой вежливостью. Но всё же в этих письмах чувствуется яд неискренности. Ньютон заявляет, что уже давно не интересуется проблемами физики и математики, и сразу же обнаруживает глубокую осведомлённость в новейших исследованиях и открытиях, в том числе самого Гука. Гук утверждает, что ни одно из соображений Ньютона не будет предано гласности без его, Ньютона, распоряжения, но, найдя в рассуждениях учёного ошибку, немедленно рассказывает о ней на заседании Королевского общества. Однако, как ни была неприятна переписка её участникам, она оказалась для обоих полезна, направив мысли Ньютона по несколько иному руслу и дав Гуку ответы на вопросы, которые он не мог разрешить сам.

В одном из писем Ньютону Гук сформулировал, как, по его представлениям, должна выглядеть новая теория, утверждая, что сможет построить её самостоятельно: «Я изложу систему мира, отличающуюся во многих отношениях от всех до сих пор известных и соответствующую во всём обычным правилам механического движения. Они основываются на трёх предположениях.

Первое, что все небесные тела, каковы бы они ни были, обладают притяжением, или гравитационной

способностью, направленной к собственным центрам, в результате чего они притягивают не только части самих себя и не дают им от себя отлететь, что мы наблюдаем на Земле, но они также притягивают все остальные небесные тела, находящиеся в сфере их действия.

Второе предположение заключается в том, что все тела, каковы бы они ни были, будучи приведены в прямолинейное и простое [т. е. равномерное] движение, будут продолжать двигаться по прямой до тех пор, пока они не будут с помощью других действующих сил отклонены и приведены в движение по кругу, эллипсу или некоторой другой более сложной кривой линии.

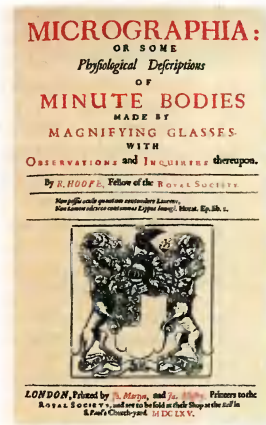
Третье предположение гласит: эти притягивающие силы таковы, что они действуют тем сильнее, чем ближе притягиваемое находится к своему центру. Что же касается степени влияния, то я ещё не определил её из опытов. Но само это предположение, если придерживаться его должным образом, существенно поможет астрономам в сведении всех небесных движений к определённой праву; я сомневаюсь, чтобы это когда-либо было сделано без его помощи».

Ньютон, очевидно, уже сам приблизился к тем же принципам и даже знал, по какому закону изменяется эта «степень влияния». Поэтому гениальные догадки Гука не могли не задеть его самолюбие.

Вторым важным обстоятельством оказалось знакомство и сближение Ньютона с молодым Эдмундом Галлеем (1656—1742), будущим королевским астрономом (директором Гринвичской обсерватории). В январе 1684 г. Галлей побывал на заседании Королевского общества, где архитектор, математик и астроном Кристофер Рен предложил ценный приз — книгу стоимостью в 2 фунта — тому, кто сможет вывести все законы Кеплера из предположения, что

Согласно Декарту, мир заполнен тончайшей невидимой материей. Прозрачные потоки этой материи, лишённые возможности двигаться беспрепятственно, т. е. прямолинейно, образуют в пространстве системы малых и больших вихрей. Вихри, подхватывая более крупные, видимые частицы обычного вещества, формируют круговороты небесных тел. Они летят их, вращают и несут по орбитам.

Р. Гук. Книга
«Микрография».
Титульный лист.
Лондон. 1665 г.





Уильям Блейк.
Ньютон.
Аллегорический
рисунк. 1795 г.



«степень влияния» тяжёлых тел друг на друга убывает обратно пропорционально квадрату расстояния. Гук заявил, что решит задачу за два месяца, однако не смог этого сделать и за больший срок.

В августе того же года Галлей посетил в Кембридже Ньютона и, не-

сомненно, с провокационной целью поинтересовался, не знает ли тот, как будет двигаться тело, притягиваемое к другому телу по закону обратных квадратов.

— По эллипсу, — не задумываясь сказал Ньютон.

— Откуда вы знаете? — удивился Галлей.

— Я рассчитал, — как ни в чём не бывало ответил его собеседник.

Галлей пожелал ознакомиться с расчётами Ньютона и уже в ноябре получил небольшой трактат на девяти страницах «О движении тел по орбите». В нём доказывалось как это положение, так и обратное: если тело движется по эллиптической орбите, значит, на него действует сила притяжения, обратного пропорциональная квадрату расстояния. Содержались здесь и доказательства двух других законов Кеплера.

Галлей понял, что перед ним гениальная работа. Он вновь поспешил в Кембридж, чтобы убедить Ньютона послать её в Королевское общество, но учёный отказался, сославшись на необходимость сделать некоторые добавления и уточнения. С декабря 1684 г. Ньютон как одержимый работал над этими «добавлениями», в результате чего трактат вырос в объёме почти в 100 раз. 5 июля 1687 г. книга была напечатана на деньги Галлея.

«Математические начала натуральной философии» были с восторгом приняты всем научным сообществом. На Ньютона посыпались многочисленные почести: в 1689 г. его избрали в английский парламент, в 1699-м — в Парижскую королевскую академию естественных наук. Наконец, в 1703 г. он стал президентом Лондонского королевского общества, а в 1705-м королева Анна Стюарт посвятила его в рыцари.

Чтобы найти решения сложных математических задач, к которым приводили проблемы механики, Ньютону пришлось пользоваться

ЗАДАЧА НАТУРАЛЬНОЙ ФИЛОСОФИИ

...Главная обязанность натуральной философии — делать заключения из явлений, не измышляя гипотез, и выводить причины из действий до тех пор, пока мы не придём к самой первой причине, конечно не механической, и не только раскрывать механизм мира, но главным образом разрешать следующие и подобные вопросы. Что находится в местах, почти лишённых материи, и почему Солнце и планеты тяготеют друг к другу, хотя между ними нет плотной материи? Почему природа не делает ничего понапрасну и откуда происходят весь порядок и красота, которые мы видим в мире? Для какой цели существуют кометы и почему все планеты движутся в одном и том же направлении по концентрическим орбитам, в то время как кометы движутся по всевозможным направлениям по очень эксцентрическим орбитам, и что мешает падению неподвижных звёзд одна на другую? Каким образом тела животных устроены с таким искусством и для какой цели служат их различные части? Был ли глаз построен без понимания оптики, а ухо без знания акустики? Каким образом движение тел следует воле и откуда инстинкт у животных?.. И если эти вещи столь правильно устроены, не становится ли ясным из явлений, что есть бестелесное существо, живое, разумное, всемогущее, которое в бесконечном пространстве, как бы в своём чувствилище, видит все вещи вблизи, прозревает их насквозь и понимает их вполне благодаря их непосредственной близости к нему?.. И хотя всякий верный шаг на пути этой философии не приводит нас непосредственно к познанию первой причины, однако он приближает нас к ней и поэтому должен высоко цениться.

(По книге И. Ньютона «Оптика».)



всем арсеналом изобретённых им математических средств, пока ещё неизвестных его современникам (ведь он не публиковал своих математических работ). Но, уже зная решения, учёный сумел прийти к ним, используя гораздо более понятный его современникам язык геометрии.

Сегодня очевидно, что, если бы «Математические начала натуральной философии» не были написаны, история человечества стала бы другой. Тем не менее современники ценили Ньютона не только за его научные достижения.

СОЦИАЛЬНЫЙ РЕФОРМАТОР

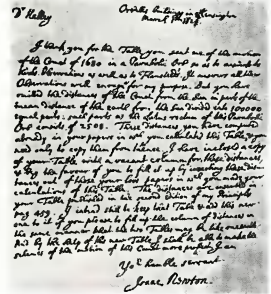
Король Англии Яков II Стюарт (1685—1688 гг.) старался вернуть страну к дореволюционному состоянию, в частности пытался восстановить католичество, однако его планы вызвали противодействие англиканского большинства населения. В ходе переворота 1688—1689 гг. король был низложен, а на престоле воцарилась его дочь Мария II Стюарт с мужем Вильгельмом III Оранским. Этот переворот за мирный и бескровный характер стали называть «Славной революцией». Она закрепила привилегии купечества и банкиров, заинтересованных в экономическом росте страны. Для такого роста была жизненно необходима денежная реформа.

В 1696 г. Ньютон покинул Кембридж и переехал в Лондон. Он получил новое назначение — сначала смотрителя, а затем и директора (в 1699 г.) Монетного двора. Познания учёного в металлургии понадобились, чтобы провести перечеканку монет. При чеканке, использовавшейся ранее, края монеты, не имевшей боковой огранки, оказывались довольно бесформенными. Их было удобно обрезать, затирая потом грязью. Такая операция давно известна в Англии и других странах, её называли порчей монеты, и за это всегда карали очень строго. Когда большая часть монет оказывалась порченной, государственная финансовая система страдала, потому что деньги переставали выполнять свою главную роль расчётного средства. Приходилось перечеканивать монеты, изымая старые и используя металл, из которого они были сделаны, как сырьё.

Подобные денежные реформы разоряли население. Вместо старых порченных денег оно получало новые, но обмен производился по весу, т. е. по номиналу люди получали значительно меньшее количество денег. Ведь новая полновесная монета имела ту же стоимость, что и старая порченная. Объём наличности в стране уменьшался, а долги и проценты оставались теми же, цены на внутренних рынках падали, но на внешних — не менялись. Экономическая жизнь замирала.

Перспектива именно такой реформы стояла перед Англией в тот момент, когда Ньютон переехал в Лондон. Первое, чего ему удалось добиться, пользуясь своим положением и авторитетом, — это проведения обмена денег не по весу, а по номиналу. В результате ранее платёжеспособные хозяева не потеряли своего состояния. Второе достижение Ньютона заключалось в том, что под его руководством производительность Монетного двора выросла

◀
Комета Галлея.
20 марта 1986 г.



Письмо И. Ньютона
Э. Галлею.



Вольтер.
Книга «Элементы
физики Ньютона».
Титульный лист.
Амстердам.
1738 г.

◀ Англиканство — протестантская религия, ставшая государственной в Великобритании. Оно отделилось от католицизма в XVI в. из-за разногласий между английским королём Генрихом VIII и Папой Римским.

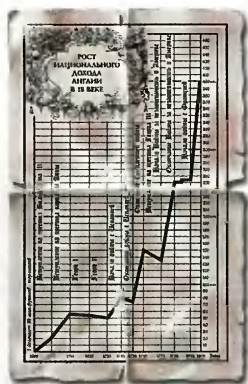


График роста национального дохода Великобритании в XVIII в.

Надгробие на могиле И. Ньютона.

в восемь раз безо всяких технических новшеств. Учёный просто реорганизовал производственный процесс, который до него был поставлен из рук вон плохо. Рабочие на своих местах пьянствовали и дрались, крали серебро, перепродавали чеканы фальшивомонетчикам.

Чтобы этого не происходило, Ньютон ввёл жёсткую систему контроля и наказаний. При Монетном дворе были созданы своя тюрьма и система сыска. Задолго до Скотленд-Ярда в Англии появились тайные агенты, отслеживающие тех, чья деятельность подрывала финансовую систему государства, прежде всего фальшивомонетчиков.

Самым сложным являлся вопрос финансирования реформы. Ведь при обмене по номиналу инфляцию, вызванную порчей монеты, необходимо было как-то покрыть. Всё серебро, которое срезали с монет, нужно было чем-то возместить. Идея, предложенная Ньютоном, хорошо известна и часто использовалась в XX в., но в XVII столетии она стала поистине революционной. Недостаток средств покрыли внешние заимствования, т. е. деньги брались в долг у зарубежных соседей, главным образом у Нидерландов. Довольно высокие проценты затем выплачивались за счёт новых заимствований.

К середине XVIII в. государственный долг Англии вырос до беспрецедентных в истории размеров, однако финансовой катастрофы он

не вызвал. И в этом также есть определённая заслуга Ньютона, который сумел провести через парламент законы, содержавшие принципиально новые и важные идеи. Правительство охотно раздавало кредиты своим гражданам, причём эти кредиты были настолько дешёвы, что открыть собственное дело, получив их, мог практически любой гражданин. Это привело, разумеется, к жестокой конкурентной борьбе, в результате которой многие новоиспечённые предприниматели разорились и не могли вернуть своих долгов государству. И всё-таки данная политика себя оправдала: рост совокупного национального продукта покрыл эти издержки, и довольно скоро налоговые отчисления в казну сравнялись с французскими, несмотря на то что численность населения в Англии почти в 2,5 раза была меньше.

В отличие от многих своих современников и потомков, породивших социальные революции с непредсказуемыми и необратимыми последствиями, Ньютон пошёл по пути, который в XX в. будет обозначен австрийским философом Карлом Раймундом Поппером как «социальная инженерия», — по пути решительных и иногда даже жёстких соци-

ЭПИТАФИЯ НА НАДГРОБИИ НЬЮТОНА

Здесь покоится сэр Исаак Ньютон, который с почти божественной силой разума первый объяснил с помощью своего математического метода движения и форму планет, пути комет и приливы океанов. Он был тем, кто исследовал различия световых лучей и проистекающие из них различные свойства цветов, о которых прежде никто и не подозревал. Прилежный, хитроумный и верный истолкователь природы, древности и Св. Писания, он утверждал своей философией величие всемогущего Творца, а нравом насаждая требуемую Евангелием простоту. Да возрадуются смертные, что среди них жило такое украшение рода человеческого.





альных реформ с предсказуемыми и положительными последствиями. Успех Ньютона и в натурфилософии, и в экономике имеет общую основу: тонкое понимание внутренних «механизмов» явлений, связей причин и следствий, сил и движений, инвестиций и производительности.

Значение Ньютона в истории физики необычайно велико. Его имя завершает двухвековой период научной революции. Главное сочинение жи-

ни Ньютона создало почву для новой научной практики, получившей со временем название классической науки. Физика перестала быть занятием чудаков и монахов. Её могущество становилось очевидным всем и каждому; люди начали понимать, что физике надо учить детей, а занимающимся ею стоит платить — наука стала профессией.

Теория Ньютона послужила основой первого научного мировоззрения Нового времени — механической картины мира.

«МАТЕМАТИЧЕСКИЕ НАЧАЛА НАТУРАЛЬНОЙ ФИЛОСОФИИ»

«Математические начала натуральной философии» сэра Исаака Ньютона — одна из наиболее значительных книг в мировой сокровищнице человеческого знания. Некоторые учёные считают её второй по значению после Библии. Жозеф Луи Лагранж, например, называет «Математические начала» «величайшим из произведений человеческого ума»; Вольтер, отбросив обычные для него сарказм и иронию, осыпает их автора лестными эпитетами: «...самым великим был Исаак Ньютон... ибо если истинное величие состоит в том, чтобы, получив в дар от неба мощный талант, использовать его для самообразования и просвещения других, то человек, подобный господину Ньютону, едва ли встречающийся однажды на протяжении десяти веков, действительно велик, тогда как все... политики и завоеватели, без которых не обошлось ни одно столетие, обычно суть не что иное, как именитые злодеи. Мы чтим тех, кто владеет умами силою своей правды, но не тех, кто путём насилия создаёт рабов; тех, кто познал Вселенную, а не тех, кто её обезобразил».

ЭДМУНД ГАЛЛЕЙ И «НАЧАЛА»

Первая из трёх книг «Математических начал» была завершена 28 апреля 1686 г., и в тот же день Ньютон выступил с докладом о ней на заседании Лондонского королевского общества. Его труд вместе с сочинением некоего господина Уиллоуби «История рыб» одобрили и постановили издать за счёт Королевского общества. К сожалению, эти намерения, во всяком



ВИЛЬГЕЛЬМ ЗАВОЕВАТЕЛЬ • ТАМЕРЛАН • КАРЛ ВЕЛИКИЙ • ЧИНГИСХАН



Эдмунд Галлей.



Джон Флемстид,
директор Гринвичской
обсерватории.



Кристофер Рен.

случае в отношении «Математических начал», не были осуществлены из-за нехватки средств, и, если бы не финансовая поддержка со стороны секретаря Королевского общества Эдмунда Галлея (1656—1742), публикацию великого сочинения пришлось бы отложить.

Роль Эдмунда Галлея не исчерпывалась одной лишь материальной помощью. Ещё в 1684 г. по его настоянию в Лондоне произошло «совещание четырёх особ». В нём приняли участие постоянный научный оппонент Ньютона физик Роберт Гук (1635—1703), архитектор (строитель собора Святого Павла в Лондоне), математик и астроном Кристофер Рен (1632—1723) и сам Эдмунд Галлей. На этом совещании учёные мужи обсуждали траекторию тела (планеты), которое движется под действием силы притяжения со стороны центрального тела (Солнца), обратной квадрату расстояния. Роберт Гук заявил, что располагает решением данной задачи, но, к большому разочарованию Эдмунда Галлея, так его и не представил.

Когда же Галлей навелся на Исаака Ньютону, восторгу его не было границ. Ньютон обладал полным решением задачи и мог вполне доказательно утверждать, что планета движется по эллиптической орбите, в одном из фокусов которой находится Солнце. По просьбе Галлея Ньютон посвятил этой теме сначала небольшое сочинение «О движении тел по орбите», а затем первую книгу «Математических начал». Вскоре он завершил вторую и третью книги, и в 1687 г. его труд целиком вышел из печати. Воздавая должное заслугам Галлея, Ньютон написал в предисловии к первому изданию «Математических начал»: «При издании этого сочинения оказал содействие остроумнейший и во всех областях науки учёнейший муж Эдмунд Галлей, который не только правил типографские корректуры и озаботился изготовлением

рисунков, но даже по его лишь настояниям я приступил и к самому изданию. Получив от меня доказательства вида орбит небесных тел, он непрестанно настаивал, чтобы я сообщил их Королевскому обществу, которое затем своим благосклонным вниманием и заботливостью заставило меня подумать о выпуске их в свет».

КАК УСТРОЕНЫ НЬЮТОНОВСКИЕ «НАЧАЛА»

«Математические начала» — основополагающий труд новой науки, которая опирается на наблюдение, эксперимент и математический расчёт и этим радикально отличается от старой схоластической науки, видевшей вершину доказательности в ссылке на авторитет. При создании «Математических начал» Ньютон, в частности, использовал наблюдательные данные первого директора Гринвичской обсерватории Джона Флемстида. Искусство Ньютона-экспериментатора легло в основу современного подхода к экспериментированию: предложенные им способы вопрошания природы, усовершенствованные и дополненные, применяются и поныне. Что же касается математического расчёта, то на страницах «Начал» Ньютон предстаёт как искусный геометр, хотя при написании своего великого труда он владел созданным им же (и независимо от него Готфридом Вильгельмом Лейбницем) математическим анализом.

Заглавие ньютоновской книги указывает не только на использование математических расчётов, но и на ещё одно весьма важное обстоятельство: излагая основы «натуральной философии» (физики), Ньютон придерживается канонов математической строгости, установленных «Началами» Евклида.

Несмотря на то что физика — наука индуктивная, т. е. в поисках за-



кономерности физик совершает восхождение от частного к общему, в «Математических началах» «натуральная философия» излагается дедуктивно — от общего к частному.

Как и подобает математическому сочинению, «Начала» Ньютона открываются определениями (одно из них, по мнению автора, нуждается в пояснении, и он даёт его в специальном «Поучении») и аксиомами, или законами, движения. Это — те самые знаменитые законы движения Ньютона, без которых теперь не обходится ни один школьный учебник физики.

Если первые два закона в той или иной форме можно найти у предшественников Ньютона, то третий ранее не встречается ни у одного из авторов. Три поразительно простых по своей формулировке закона Ньютона охватывают необычайно широкий круг явлений, происходящих не только на Земле, но и во всей Вселенной! Вместе с открытым им же законом всемирного тяготения они применимы к любым телам, где бы те ни находились. Поскольку с античных времён мир делился на две области — подлунную и надлунную, в каждой из которых действовали свои законы, универсальные законы Ньютона не сразу были оценены по достоинству. Однако, когда научное сообщество осознало достигнутое Ньютоном единство картины мира (в другом своём сочинении, «Оптике», учёный говорит об этом так: «Природа весьма согласна и подобна в себе самой»), оно стало одной из важнейших основ современного мировоззрения.

Мир, который строится на трёх простых законах, оказался похож на часовой механизм с очень точно подогнанными шестерёнками: каждое последующее состояние в таком мире обязательно определялось предыдущим. Если бы текущее положение и скорости всех частиц во Вселенной были известны какому-нибудь

сверхъестественному существу, оно смогло бы не только предсказывать любые события в будущем, но и восстанавливать детали прошлого. Если же человек не может этого сделать, то лишь потому, что не в состоянии охватить положения и скорости всех

Ньютон читает Галлею свою рукопись.



НЬЮТОН О «МАТЕМАТИЧЕСКИХ НАЧАЛАХ»

...Сочинение это нами предлагается как математические основания физики. Вся трудность физики, как будет видно, состоит в том, чтобы по явлениям движения распознать силы природы, а затем по этим силам объяснить остальные явления. Для этой цели предназначены общие предложения, изложенные в книгах первой и второй. В третьей же книге мы даём пример... приложения, объясняя систему мира, ибо здесь из небесных явлений при помощи предложений, доказанных в предыдущих книгах, математически выводятся силы тяготения тел к Солнцу и отдельным планетам. Затем по этим силам, также при помощи математических предложений, выводятся движения планет, комет, Луны и моря. Было бы желательно вывести из начал механики и остальные явления природы, рассуждая подобным же образом, ибо многое заставляет меня предполагать, что все эти явления обуславливаются некоторыми силами, с которыми частицы тел, вследствие причин, покада неизвестных, или стремятся друг к другу и сцепляются в правильные фигуры, или же взаимно отталкиваются и удаляются друг от друга. Так как эти силы неизвестны, то до сих пор попытки философов объяснить явления природы и оставались бесплодными. Я надеюсь, однако, что или этому способу рассуждения, или другому, более правильному, изложенные здесь основания доставят некоторое освещение.

(И. Ньютон. «Математические начала натуральной философии».)



частиц. Иначе говоря, мешает неполнота информации. Так думали физики до появления квантовой механики и нелинейной динамики: первая привела к замене траекторий облаками вероятности, а благодаря второй удалось обнаружить, что многие системы ведут себя непредсказуемо из-за внутренней неустойчивости. Но для больших (макроскопических) тел, движущихся со скоростями мно-

го меньше скорости света, ньютоновская механика даёт превосходную точность. В повседневной жизни мы все «ньютонианцы».

Цель своего сочинения Ньютон полагает в «нахождении истинных движений тел по причинам, их производящим, по их проявлениям и по разностям кажущихся движений и, наоборот, нахождение по истинным или кажущимся движениям их причин и проявлений». Книга первая «Математических начал» «О движении тел» состоит из 14 отделов и подробно знакомит читателя с найденным Ньютоном решением задачи о движении тела под действием центральной силы и аналогичными задачами. Книга вторая под тем же названием «О движении тел» посвящена циклу задач о движении тел в сопротивляющейся среде и состоит из девяти отделов.

Третья, заключительная, книга «Математических начал» «О системе мира» посвящена приложениям ньютоновской механики к движениям небесных тел. Она открывается знаменитыми «Правилами умозаключений в физике». Завершает третью книгу «Общее поучение», где Исаак Ньютон излагает свою точку зрения на строение Солнечной системы и природу тяготения: «Шесть главных планет обращается вокруг Солнца приблизительно по кругам, концентрическим с Солнцем, по тому же направлению и приблизительно в той же самой плоскости. Десять лун обращаются вокруг Земли, Юпитера и Сатурна по концентрическим кругам, по одному направлению и приблизительно в плоскости орбит самих планет...

Такое изящнейшее соединение Солнца, планет и комет не могло произойти иначе как по намерению и по власти могущественного и премудрого существа. Если и неподвижные звёзды представляют центры подобных же систем, то все они, будучи построены по одинаковому намерению, подчинены и власти

ТРИ ЗАКОНА

Закон I. Всякое тело продолжает удерживаться в своём состоянии покоя или равномерного и прямолинейного движения, пока и поскольку оно не понуждается приложенными силами изменить это состояние.

Закон II. Изменение количества движения пропорционально приложенной движущей силе и происходит по направлению той прямой, по которой эта сила действует.

Закон III. Действию всегда есть равное и противоположное противодействие, иначе — взаимодействия двух тел друг на друга между собою равны и направлены в противоположные стороны.

(И. Ньютон. «Математические начала натуральной философии».)



ПРАВИЛА УМОЗАКЛЮЧЕНИЙ В ФИЗИКЕ

Правило I. Не следует принимать в природе иных причин сверх тех, которые истинны и достаточны для объяснения явлений.

По этому поводу философы утверждают, что природа ничего не делает напрасно, а было бы напрасным совершать многим то, что может быть сделано меньшим. Природа проста и не роскошествует излишними причинами вещей.

Правило II. Поэтому, поскольку возможно, должно приписывать те же причины того же рода проявлениям природы.

Так, например, дыханию людей и животных, падению камней в Европе и в Африке, свету кухонного очага и Солнца, отражению света на Земле и на планетах.

Правило III. Такие свойства тел, которые не могут быть ни усилены, ни ослабляемы и которые оказыва-

ются присущими всем телам, над которыми возможно производить испытания, должны быть почтаемы за свойства всех тел вообще.

Свойства тел постигаются не иначе, как испытаниями; следовательно, за общие свойства надо принимать те,



которые постоянно при опытах обнаруживаются и которые, как не подлежащие уменьшению, устранены быть не могут. Понятно, что в противность ряду опытов не следует измышлять на авось каких-либо бредней, не следует также уклоняться от сходственности в природе, ибо природа всегда и проста, и всегда сама с собой согласна...

Правило IV. В опытной физике предложения, выведенные из совершающихся явлений с помощью индукции, несмотря на возможность противных им предложений, должны быть почтаемы за верные или в точности, или приближённо, пока не обнаружатся такие явления, которыми они ещё более уточнятся или же окажутся подтверждёнными исключением.

Так должно поступать, чтобы доводы индукции не уничтожались предположениями.

(Из книги И. Ньютона.
«Математические начала
натуральной философии».)

Единого: в особенности приняв в соображение, что свет неподвижных звёзд той же природы, как и свет Солнца, и все системы испускают свет друг на друга, а чтобы системы неподвижных звёзд от своего тяготения не падали друг на друга, Он их расположил на таких огромных одна от другой расстояниях.

Сей управляет всем не как душа мира, а как властитель Вселенной, и по господству своему должен именоваться Господь Бог Вседержитель».

ТЯГОТЕНИЕ И ЭФИР

Ньютон считал необходимым подчеркнуть, что природа тяготения остаётся для него неизвестной: он знает, как действует тяготение, но не знает почему. «До сих пор, — писал Ньютон, — я изъяснил небесные явления и приливы наших морей на основании силы тяготения, но я

не указывал причины самого тяготения. Эта сила происходит от некоторой причины, которая проникает до центра Солнца и планет без уменьшения своей способности и которая действует не пропорционально величине поверхности частиц, на

Панорама Гринвичской
обсерватории.





▲ Афелий — наиболее удалённая от Солнца точка орбиты обращающегося вокруг него небесного тела.

которые она действует (как это обыкновенно имеет место для механических причин), но пропорционально количеству твёрдого вещества, причём её действие распространяется повсюду на огромные расстояния, убывая пропорционально квадратам расстояний. Тяготение к Солнцу состоит из тяготения к отдельным частицам его, при удалении от Солнца убывает в точности пропорционально квадратам расстояний даже до орбиты Сатурна, что следует из покоя афелиев планет, и даже до крайних афелиев комет, если только эти афелии находятся в покое. Причину же этих свойств силы тяготения я до сих пор не мог вывести из явлений, гипотез же я не измышляю. Всё же, что не выводится из явлений, должно называться гипотезою, гипотезам же, метафизическим, физическим, ме-

ханическим, скрытым свойствам, не место в экспериментальной философии.

В такой философии предложения выводятся из явлений и обобщаются с помощью индукции. Так были изучены непроницаемость, подвижность и напор тел, законы движения и тяготение. Довольно того, что тяготение на самом деле существует и действует согласно изложенным нами законам, и вполне достаточно для объяснения всех движений небесных тел и моря».

Завершает третью книгу рассуждение Ньютона об эфире — гипотетической тонкой материи, заполняющей пространство: «Теперь следовало бы кое-что добавить о некоем тончайшем эфире, проникающем все сплошные тела и в них содержащемся, коего силою и дей-

РОДЖЕР КОТС О МЕТОДЕ НЬЮТОНА

Пытавшихся излагать физику можно вообще отнести к трём категориям. Прежде всего выделяются приписывавшие разному рода предметам специальные скрытые качества, от которых неизвестно, каким образом и должно было происходить, по их мнению, взаимодействие отдельных тел. В этом заключалась сущность схоластических учений, берущих своё начало от Аристотеля и перипатетиков. Они утверждали, что отдельные действия тел происходят вследствие особенностей самой их природы, в чём же эти особенности состоят, тому они не учили, следовательно, в сущности, они ничему не учили. Таким образом, всё сводилось к наименованию отдельных предметов, а не к самой сущности дела, и можно сказать, что ими создан философский язык, а не самая философия.

Другие (имеются в виду последователи Декарта. — *Прим. ред.*), отбросив напрасное нагромождение слов, надеялись с большою пользою затратить свой труд. Они утверждали, что всё вещество во Вселенной однородно и что всё различие видов, замечаемое в телах, происходит в некоторых простейших и доступных пониманию свойствах частиц, составляющих тела. Восходя, таким образом, от более простого к более сложному, они были бы правы, если бы они на самом деле приписали этим первичным частицам лишь те самые свойства, которыми их одарила природа, а не какие-либо иные. Но на деле они предоставляют себе право допускать какие им вздумается неведомые виды и величины частиц, неопределённые их

расположения и движения, а также измышлять различные неощутимые жидкости, свободно проникающие через поры тел и обладающие всемогущею тонкостью и скрытыми движениями.

Таким образом, они предаются фантазиям, пренебрегая истинною сущностью вещей, которая, конечно, не может быть изыскана обманчивыми предположениями, когда её едва удаётся исследовать при помощи точнейших наблюдений. Заимствующие основания своих рассуждений из гипотез, даже если бы всё дальнейшее было ими развито точнейшим образом на основании законов механики, создали бы весьма изящную и красивую басню, но всё же лишь басню.

Остаётся третья категория — это те, кто является последователями экспериментальной философии (т. е. экспериментального метода при исследовании явлений природы). Они также стремятся вывести причины всего сущего из возможно простых начал, но они ничего не принимают за начало, как только то, что подтверждается совершающимися явлениями. Они не измышляют гипотез и не вводят их в физику иначе, как в виде предположений, коих справедливость подлежит исследованию... Вот этот самый лучший способ исследования природы и принят преимущественно перед прочими нашим знаменитейшим автором (Ньютоном. — *Прим. ред.*)...

(Из предисловия издателя ко второму изданию книги
И. Ньютона «Математические начала
натуральной философии».)



РУССКИЕ ПЕРЕВОДЫ «НАЧАЛ»

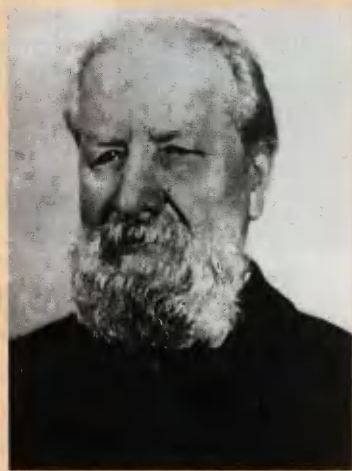
На русский язык «Математические начала» были впервые переведены знаменитым корабелом, академиком Алексеем Николаевичем Крыловым (1863—1945). В 1914 г., когда разразилась Первая мировая война, слушатели Николаевской Морской академии, где преподавал Крылов, отправлялись на действующий флот, и профессор оказался «не у дел». Вот как он сам описывает обстоятельства, сопутствовавшие переводу: «В 1914 г. приёмы в Морскую академию не было и лекций не читалось, я был свободен и решил употребить свободное время на перевод и издание „Начал“ Ньютона на русский язык, снабдив этот перевод комментарием, изложенным так, чтобы он был понятен слушателям Морской академии. Я работал аккуратно по три часа утром и по три часа вечером. Сперва я переводил текст почти буквально и к каждому выводу тотчас писал комментарий; за-

тем, после того как заканчивался от-дел, я выправлял перевод так, чтобы смысл сохранял полное соответствие латинскому подлиннику, и вместе с тем мною соблюдалась чистота и правильность русского языка; после этого я переписывал всё начисто, вставлял в своё место комментарий и подготовлял к набору... К концу 1916 г. весь перевод был окончен и отпечатан...».

«Математические начала» в переводе А. Н. Крылова были переизданы в 1936 г. (вошли в состав VII тома «Собраний трудов академика А. Н. Крылова»), а затем в 1989 г. издательством «Наука» в серии «Классики науки».

По свидетельству историка науки Т. П. Кравеца, «накануне войны 1914—1918 гг. известное одесское издательство „Матезис“ намеревалось выпустить перевод „Начал“, сделанный Чакаловым. По обстоятельствам войны и последовавшей разрухи издание не могло состояться. Но верстка перевода сохранилась; по отзывам виде-

вших его, он обладает большими достоинствами». Однако позднее отыскать перевод Чакалова не удалось.



Алексей Николаевич Крылов.

ствием частицы тел при весьма малых расстояниях взаимно притягиваются, а при соприкосновении сцепляются, наэлектризованные тела действуют на большие расстояния, как отталкивая, так и притягивая близкие малые тела, свет испускается, отражается, преломляется, уклоняется и нагревает тела, возбуждается всякое чувствование, заставляющее члены животных двигаться по желанию, передаваясь именно колебаниями этого эфира от внешних органов чувств мозгу и от мозга мускулам. Но это не может быть изложено вкратце, к тому же нет и достаточного запаса опытов, коими законы действия этого эфира были бы точно определены и показаны».

...

При жизни Исаака Ньютона «Математические начала натуральной философии» выдержали три издания: 1687, 1713 и 1725 гг. В 1727 г. этот

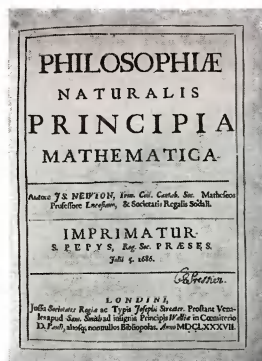
НЕОЖИДАННАЯ НАХОДКА

В Россию экземпляры «Математических начал» попали ещё в конце XVII — начале XVIII в. Они находились в библиотеках М. В. Ломоносова, Л. Эйлера и других русских академиков. Однако, по официальным данным, в больших книжных собраниях России не значилось ни одного экземпляра первого издания «Математических начал». Первый известный экземпляр этого издания был подарен Академии наук СССР Лондонским королевским обществом в 1943 г.; в то время находившаяся в эвакуации в Казани Академия торжественно отметила 300-летие со дня рождения Исаака Ньютона.

Каково же было удивление историка науки В. С. Кирсанова, когда он случайно обнаружил неизвестный ранее экземпляр первого издания в фондах библиотеки Московского государственного университета! В результате проведённого расследования выяснилось, что этот экземпляр попал в Россию в составе большой библиотеки, купленной в Англии во время Великого посольства 1697—1698 гг. лейб-медиком Петра I Робертом Эрскином.

Позднее книги вошли в состав библиотеки Петербургской академии наук. Однако по ошибке произведение Ньютона зашифровали как трактат по философии, а после пожара 1812 г. оно поступило в библиотеку Московского университета.

Более того, выяснилось, что обнаруженный Кирсановым экземпляр «Математических начал» был снабжён пометами Дэвида Грегори — друга Ньютона — и уже давно разыскивался историками науки.



«Математические начала натуральной философии». Лондон. 1687 г.

труд, написанный в оригинале на языке научного общения того времени — латыни, был переведён на английский язык.

Три столетия отделяют нас от того времени, когда жил и творил Ньютон. В его наследии, огромном и многообразном, «Математические начала» по праву занимают почётное место. Всё новые поколения учёных с благоговением читают страницы «Начал», на которых Ньютон заповедал человечеству метод естественно-на-

учного исследования, указал основные проблемы и нарисовал единую стройную картину мира.

Последующее развитие физики, создание теории относительности и квантовой механики лишь уточнили и расширили границы ньютоновской механики, но не отвергли её основного содержания. Выдержав испытание временем, она и поныне служит основой современной картины мира и всего сегодняшнего естествознания.

ДЖЕЙМС КЛАРК МАКСВЕЛЛ

Джеймс Кларк Максвелл родился в тот самый год, когда Майкл Фарадей открыл электромагнитную индукцию. Впоследствии он описал электромагнитные явления с помощью уравнений, носящих ныне его имя. Людвиг Больцман даже предпослал своим лекциям об этих уравнениях эпиграф из Иоганна Шиллера: «Уж не Бог ли начертал эти строки?». Максвелл оставил глубокий след во всех областях физической науки, к которым успел прикоснуться за свою непродолжительную жизнь: в теории упругости, статистической механике, кинетической теории газов и прежде всего теории электромагнитного поля — таков далеко не полный их перечень.

ем старой шотландской традиции. Будущему отцу великого физика, Джону Кларку, после смерти его дяди досталось имение Миддлби в Южной Шотландии. Владельцами этого имения до Кларков были Максвеллы, и Джон, получив его в наследство, по шотландскому обычаю присоединил к своей фамилии фамилию прежних владельцев. Таким образом, не будь этого имения, как позднее заметил один из биографов Максвелла, «нам пришлось бы писать о человеке по имени Джеймс Кларк и говорить об „уравнениях Кларка“ вместо знаменитых на весь мир „уравнениях Максвелла“».

В имении Миддлби Джеймс Максвелл провёл значительную часть своего детства. Сохранилось письмо его матери к одной из родственниц, написанное, когда мальчику не исполнилось и трёх лет: «Этот мужчина очень счастлив... у него много работы с дверями, замками, ключами и т. д., а слова „Покажи мне, как это делается“ постоянно сопутствуют ему. Он исследует тайные ходы для проволоки от звонков и путь, по которому вода течёт из пруда через плотину, вниз по канаве, в Воды Урра...».

По свидетельству близких, в детстве Джеймс то и дело задавал окру-

ДОЙТИ ДО ИСТОКОВ

В городе Эдинбурге (Шотландия) на стене дома № 14 по улице Индии и сегодня можно увидеть скромную мемориальную доску с надписью:

*«Джеймс Кларк Максвелл
Естествоиспытатель
Родился здесь 13 июня 1831 года».*

Кларк-Максвелл — фамилия двойная и обязана своим происхожде-

Вильям Дайс.
Портрет
Дж. Максвелла
с матерью.
Фрагмент.





жающим вопрос: «Как это происходит?», а если объяснение его не удовлетворяло, продолжал настойчиво добиваться ясности, спрашивая: «Но в чём же суть этого?».

ПЕРВЫЕ ШАГИ В НАУКЕ

Когда Максвеллу исполнилось десять лет, отец отправил его учиться в Эдинбургскую академию, где тот пробыл шесть лет — вплоть до поступления в университет. В академии Максвелл учился прилежно и ровно, не выказывая особых способностей, но и не вызывая нареканий со стороны преподавателей. Самым ярким событием для него в эти годы стало знакомство с одним из соучеников — Питером Гутри Тейтом, впоследствии написавшим двухтомный «Трактат по натуральной философии» (в соавторстве с Уильямом Томсоном). Дружеские отношения, зародившиеся во время учёбы в академии, а затем и научные интересы связывали их до конца жизни.

В возрасте 14 лет Максвелл написал первую научную работу, посвящённую геометрии овальных кривых. Её краткое изложение было опубликовано в «Трудах Эдинбургского королевского общества» за 1846 г. В полном объёме работу юного автора зачитал на одном из заседаний этого почтенного общества профессор Форбс: считалось, что подростку выступать перед учёными мужьями неприлично.

В 1847 г. Максвелл поступил в Эдинбургский университет, где стал углублённо изучать математику. По традиции наряду с основными дисциплинами, такими, как физика и химия, студенты университета в обязательном порядке осваивали «посторонние предметы», не относящиеся непосредственно к выбранной специализации. Наибольшей популярностью у будущих специалистов в области естествознания пользова-

лась философия. По свидетельству биографов Максвелла, «лекции по философии очень интересовали его... Хотя ему было всего шестнадцать лет, когда он начал слушать курс логики, он с большим трудолюбием работал над этим предметом... а из курса метафизики... вынес много устойчивых представлений. Его не знающая границ любознательность находила пищу в неистощимой эрудиции профессора...».

В это время ещё две научные работы одарённого студента были опубликованы в «Трудах Эдинбургского королевского общества». С содержанием одной (о кривых качения) ознакомил общество профессор Келланд, другую (об упругих свойствах твёрдых тел) впервые представил сам автор.

В 1850 г. Максвелл продолжил образование в колледже Святого Петра Кембриджского университета — знаменитом Питерхаусе, а оттуда перешёл в колледж Святой Троицы — Тринити-колледж. Требования к математической подготовке в Кембриджском университете были заметно выше, чем в Эдинбургском,



Тринити-колледж.
Кембридж. Англия.

Овальные кривые представляют собой обобщение эллипса, который можно определить как кривую, с постоянной суммой расстояний до двух точек (фокусов эллипса). Максвелл решил задачу о кривых, у которых постоянна сумма расстояния до одного из фокусов и утроенного расстояния до другого.



Джеймс Кларк
Максвелл.



и, возможно, этим объясняется, что Максвеллу удалось занять лишь второе место на состязаниях «Кембридж математикал трайпос» — публичном экзамене по математике на степень бакалавра. Слово «трайпос» («треножник») в названии состязаний сохранилось с тех времён, когда старший экзаменатор грозно восседал на стуле с тремя ножками. Имя занявшего первое место заносилось в анналы Кембриджского университета.

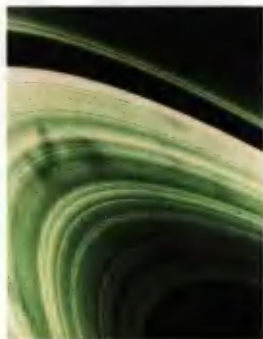
ПРОФЕССОР ФИЗИКИ

После окончания полного курса обучения Максвелл был избран членом Тринити-колледжа Кембриджского университета и стал «доном» (так здесь называли преподавателей), а в 1855 г. вошёл в состав Эдинбургского королевского общества. Студентов в колледже было мало, поэтому у преподавателей оставалось время для научных исследований, занятий спортом (например, для игры в крикет), чтения. В Кембридже работало немало выдающихся людей, и ежевечерние трапезы за «высоким» (преподавательским) столом, прекрасная кухня и отличный портвейн способствовали интересному общению. Тем не менее Максвелл вскоре покинул гостеприимный Кембридж и отправился в родную Шотландию: профессор Форбс известил его о том, что в Абердине, в Маришальском колледже, открылась вакансия профессора физики и у него имеются все шансы занять её. Максвелл принял предложение и в апреле 1856 г. (в 24 года!) вступил в новую должность. К сожалению, его отец не успел порадоваться за сына: он скончался за несколько дней до этого знаменательного события.

В Абердине молодой профессор прослужил недолго: в 1860 г. часть колледжей объединили в Абердинский университет, в результате чего некоторые кафедры упразднили.

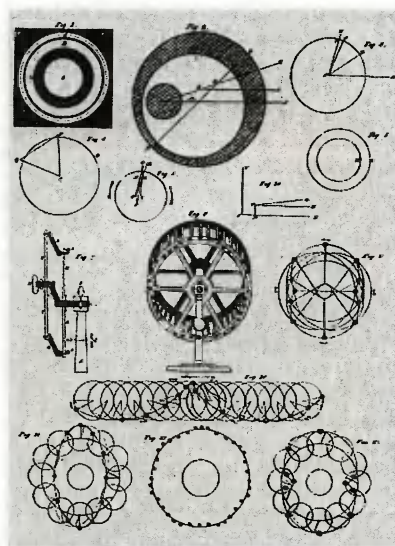
Среди попавших под сокращение профессоров оказался и Максвелл, судя по всему не очень огорчившийся потере места. Ещё в декабре 1857 г. он писал в письме своему будущему биографу Льюису Кемпбеллу о мотивах сторонников упразднения естественных кафедр: «Они хотят иметь профессорами удобных им людей, заинтересованных в преподавании того, что выгодно определённому узкому кругу. Их легче, нежели более образованных и более высокооплачиваемых преподавателей в крупном колледже, подчинить влиянию родителей и местной прессы».

В том же 1860 г. Максвелл принял приглашение Лондонского королевского колледжа и пять лет проработал там в звании профессора. Он не был блестящим лектором и не особенно любил читать лекции. Поэтому последовавший перерыв в преподавании был для него скорее желанным, чем досадным, и позволил с головой погрузиться в решение увлекательных проблем из разных областей теоретической физики.



Кольца Сатурна. Снимок сделан космическим аппаратом «Вояджер», США. 1981 г.

Рисунки Дж. Максвелла из эссе «О стабильности вращения колец Сатурна».





КОЛЬЦА САТУРНА И МНОГОЕ ДРУГОЕ

Ещё будучи студентом Тринити-колледжа, Максвелл занялся решением проблемы, уже давно интересовавшей многих исследователей и сохранившей свою притягательность до настоящего времени, — строением колец Сатурна. Итоги своих исследований Максвелл подвёл в монографии, изданной в 1859 г. Кембриджским университетом. В частности, ему удалось установить, что кольца Сатурна не могут быть ни жидкими, ни сплошными твёрдыми, а представляют собой «рой» твёрдых глыб, обращающихся вокруг тела планеты. В письме Л. Кемпбеллу от 28 августа 1857 г. он сообщал: «Я сно - ва обрушился на Сатурн... Я уже пробил несколько брешей в твёрдом кольце, а сейчас окунулся в жидкую среду, погрузившись в мир поистине удивительных символов и обозначений. Вскоре я углублюсь в туманность, напоминающую чем-то состояние воздуха, скажем, во время осады Севастополя (Максвелл имеет в виду Крымскую войну 1853—1856 гг. — *Прим. ред.*). Лес пушек, занимающих площадь прямоугольника со сторонами 100 и 30 000 миль, изрыгает ядра, которые никогда не останавливаются, а вращаются по кругу радиусом 170 000 миль...».

По значимости, разнообразию и количеству полученных в абердинский период результатов это были самые плодотворные годы в жизни Максвелла.

Он занимается проблемой цветового зрения и создаёт свою теорию восприятия цвета, которую знаменитый английский физик и математик сэр Джордж Габриель Стокс (1819—1903) в письме от 7 ноября 1857 г. оценил следующим образом: «Полученные Вами результаты — наиболее замечательное и серьёзное доказательство концепции трёх основных

цветовых ощущений — теории, которой, насколько мне известно, Вы и только Вы смогли дать точное количественное истолкование».

Приступил Максвелл и к своей главной работе — проблеме математического описания электромагнитного поля. Само понятие поля ввёл гениальный самоучка, которому мы обязаны многими открытиями, — Майкл Фарадей. Не владея математическим аппаратом, он не мог выразить в виде формул то, что отчётливо видел мысленным взором, — картину распределения в пространстве силовых линий. 13 ноября 1857 г. Фарадей писал молодому коллеге (Максвелл был на 40 лет моложе его): «Мне очень хотелось бы задать Вам один вопрос. Предположим, математик занимается исследованием физического явления и приходит, наконец, к каким-то определённым выводам. Нельзя ли их выразить в общедоступной форме не менее полно, ясно и конкретно, чем с помощью математических формул? Если можно, то для таких, как я, было бы великим благом получить их переведёнными с языка иероглифов, так чтобы мы могли оперировать ими в процессе эксперимента. Я думаю, что это можно сделать, так как идея Ваших выводов мне совершенно ясна, хотя я и не всегда могу проследить в деталях за ходом Ваших рассуждений».

Максвелл по праву считается одним из основоположников кинетической теории газов. В 1859 г. он представил Британской ассоциации поощрения наук статью, в которой, исходя из теоретических соображений, вывел функцию, описывающую распределение по скоростям молекул газа, — знаменитое ныне распределение Максвелла. Позднее (в 1866 г.) учёный дал второй вывод распределения, рассмотрев прямые и обратные столкновения молекул. Распределение Максвелла — выдающийся результат, позволяющий считать учёного наряду с Людвигом Больцманом

Английская сухопутная миля равна 1,609 км.



Дж. Максвелл с женой.
1875 г.



Демон Максвелла.

создателем статистической механики. Это один из примеров статистических законов, описывающих не индивидуальное поведение какой-то конкретной частицы, а поведение в среднем огромного количества («роя», или «ансамбля») частиц. С помощью мысленного эксперимента — бестелесного существа, способного сортировать молекулы газа по скоростям и получившего впоследствии название «демон Максвелла», учёный в 1867 г. показал, что второе начало термодинамики имеет статистическую природу. В настоящее время после появления понятия «информация», строго обоснованного американским инженером и математиком Клодом Элвудом Шенноном (родился в 1916 г.), «демон Максвелла» стал непременным персонажем книг по теории информации.

ЭЛЕКТРОДИНАМИКА

Сколь ни велики открытия Максвелла, сделанные в абердинский период, величайшим его достижением принято считать теорию элек-

тромагнитного поля, окончательно сформулированную в лондонский период (1860—1865 гг.).

Нам, стоящим, по выражению Исаака Ньютона, «на плечах гигантов», получившим электродинамику Максвелла на правах наследников в готовом виде, трудно представить, насколько новаторской была для современников его теория, изложенная в двухтомном «Трактате об электричестве и магнетизме» (1873 г.). Лауреат Нобелевской премии Макс фон Лауэ рассказывал в своей книге «История физики» об одном немецком профессоре физики, который, упорно, но тщетно пытаясь разобраться в «Трактате» Максвелла, довёл себя до нервного расстройства. Врач рекомендовал ему на время забыть о физике и полечиться на водах. Когда родные открыли чемодан профессора, чтобы проверить, всё ли он взял с собой в дорогу, то обнаружили поверженных вещей... «Трактат» Максвелла!

По своему значению «Трактат» стоит рядом с «Началами» Ньютона. Простые и изящные уравнения Максвелла описывают богатейший мир электромагнитных явлений. В своей теории учёный ввёл такие новые понятия, как «ток смещения» и «элек-

Джеймс Кларк Максвелл.





ГЕНРИ КАВЕНДИШ

Одна из наиболее эксцентрических фигур в истории науки — Генри Кавендиш (1731—1810). Он был богатым аристократом и состоял в родстве с герцогами Девонширскими. Современники отзывались о нём как о «самом мудром из богатей и самом богатом из мудрецов».

Его мать умерла после рождения второго сына. Генри было в то время около двух лет. В возрасте 18 лет он поступил в Кембриджский университет, но оставил его, не получив учёной степени. Через какое-то время юноша поселился в доме отца, лорда Чарлза, который был весьма образованным человеком и очень интересовался модной тогда темой электричества. Известный американский просветитель, государственный деятель, естествоиспытатель Бенджамин Франклин писал о сэре Чарлзе: «Хотелось бы, чтобы такой уважаемый учёный больше сообщал миру о множестве проводимых им с большой тщательностью экспериментов».

Сэр Генри унаследовал не только интересы отца, но и его сдержанное отношение к обнародованию собственных работ. Он вёл жизнь отшельника, с наслаждением предаваясь научным исследованиям. Совершённые Кавендишем открытия намного опередили науку того времени, но их большая часть оставалась неизвестной научному сообществу. Так произошло и в 1771 г., когда Кавендиш установил, что между электрическими зарядами дей-

ствует сила, прямо пропорциональная произведению зарядов и обратно пропорциональная квадрату расстояния между ними. То же открытие спустя 14 лет сделал французский инженер и физик Шарль Огюстен Кулон (1736—1806), и закон этот получил его имя. Ещё до Майкла Фарадея Кавендиш установил влияние среды на ёмкость конденсатора и измерил диэлектрическую постоянную некоторых веществ. В 1766 г. он получил водород и углекислый газ, выяснив, что водород примерно в 11 раз легче воздуха (в действительности в 14,3 раза). В 1781 г. он определил состав воздуха, а в 1784 г. — воды. В статье 1785 г. Кавендиш сообщает, что 1/120 часть воздуха не вступает ни с чем во взаимодействие. Таким



Кавендишская лаборатория в Кембридже.

образом, он наблюдал присутствие в воздухе инертного газа аргона, открытого сэром Уильямом Рамсеем лишь в конце XIX в.

В 1798 г. Кавендиш подтвердил закон всемирного тяготения Ньютона, измерив с помощью изобретённых им и преподобным Джоном Мичелом крутильных весов силу гравитационного притяжения двух шаров. Впервые в истории он вычислил гравитационную постоянную, массу и среднюю плотность Земли (следующий по точности результат был получен только в 1837 г.).

В 1871 г. потомки Кавендиша в память о своём великом предке решили построить в Кембридже (сэр Генри окончил Кембриджский университет) лабораторию, которая носила бы его имя. Эта лаборатория явилась первым самостоятельным английским исследовательским и учебным физическим институтом. Её директором стал Джеймс Кларк Максвелл, который в 1879 г. принял первое издание рукописей сэра Генри Кавендиша. Заложенные им традиции подхватили и развили его не менее знаменитые преемники — Джон Уильям Рэлей, Джозеф Джон Томсон, Эрнест Резерфорд, Уильям Лоуренс Брэгг и др. В стенах Кавендишской лаборатории выросла целая плеяда замечательных физиков, среди которых был и российский академик Пётр Леонидович Капица.

Генри Кавендиш.



тромагнитное поле», предсказал существование электромагнитных волн и их распространение со скоростью света, что позволило ему считать свет одним из видов электромагнитного излучения.

В 1910 г. английский математик Генри Бейтмен придал красоте уравнений Максвелла точный математический смысл — нашёл преобразова-

ния, сохраняющие вид уравнений Максвелла (эти преобразования составляют так называемую 15-параметрическую конформную группу). Часть этих преобразований (линейные) составляют группу Лоренца (открытую в 1904 г. Хендриком Антоном Лоренцем и названную в его честь. Эта группа Лоренца, как позднее показал немецкий физик Герман

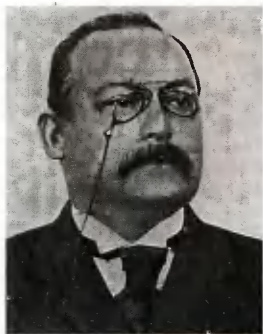


Минковский, есть набор всех возможных вращений четырёхмерного пространства-времени. Это означает, что в уравнениях Максвелла в скрытом виде содержится будущая теория относительности Эйнштейна.

В 1879 г. состояние здоровья Максвелла резко ухудшилось. Он знал, что болен той самой болезнью, от которой в таком же возрасте умерла его мать. Диагноз не оставлял надежды: рак. Его врач Пагет вспоминал: «Во время болезни, лицом к лицу со смертью, он оставался таким же, как прежде. Спокойствие духа никогда не покидало его. Через несколько дней после возвращения в Кембридж его страдания приняли очень острый

характер... Но он никогда не жаловался... Даже близость смерти не лишила его самообладания... За несколько дней до смерти он спросил меня, как долго ему осталось жить... Казалось, он беспокоился только о своей жене, здоровье которой за последние несколько лет пошатнулось... Его ум оставался ясным до конца... Никто из моих многочисленных пациентов не признавал так трезво свою обречённость и не встречал смерть более спокойно. 5 ноября [1879 г.] он тихо отошёл».

Тем, кому выпало счастье знать Максвелла, учёный запомнился не только своим блестящим интеллектом, но и высокими человеческими качествами. В науке и жизни он был истинным джентльменом.



Герман Эйнштейн.



Полина Эйнштейн.

АЛЬБЕРТ ЭЙНШТЕЙН

Альберт Эйнштейн родился в городе Ульме (Германия) 14 марта 1879 г. Было нечто символическое в том, что он появился на свет в год смерти Джеймса Кларка Максвелла, так же как Ньютон родился в год смерти Галилея.

Своего отца Эйнштейн вспоминал как «бесконечно дружелюбного, мягкого и мудрого человека». Однако мягкость отца имела обратную сторону: он легко позволял вовлечь себя в самые невероятные проекты, которые в итоге приносили неудачу. Мать, напротив, была волевой, сильной женщиной и, безусловно, «задавала тон в доме». Она не имела привычки открыто выражать свои чувства и стремилась выработать у сына более сильную волю, чем у отца.

Альберт рос неразговорчивым, задумчивым и мечтательным мальчиком. Не любил шумных игр с другими детьми, зато с пяти лет сосредоточенно слушал, как мать исполняет на рояле музыку Бетховена. Скоро он

сам научился играть на скрипке, ставшей спутницей всей его жизни. С детства Эйнштейн отдавал предпочтение Моцарту — своему самому любимому композитору, бывшему





для него символом радостного проникновения в гармонию Вселенной.

Кто мог разглядеть будущего реформатора естествознания в маленьком Альберте, который и говорить-то научился очень поздно?

«Не падай духом, Альберт! — часто подбадривал его любимый дядя Якоб, высокообразованный инженер, пытавшийся пробудить в мальчике математические способности. — Подумаешь: не из каждого же получается профессор!»

ЮНЫЙ ВОЛЬНОДУМЕЦ

В 9 лет Эйнштейна отдали в католическую подготовительную школу, а в 12 лет он поступил в гимназию Лутипольда в Мюнхене, куда вся семья переселилась в 1880 г. У него вызывала отвращение казарменная дисциплина школы, где требовалось, не вникая в смысл, зазубривать греческий, латынь и грамматику.

Свободомыслие в школах бисмарковской Германии было под запретом. Альберт быстро понял, что «молодёжь преднамеренно обманывают с помощью школьной машины, вдалбливающей догмы религии в голову ребёнка».

Однако действие оказалось равным противодействию. Именно тогда, в ответ на «машинное» воспитание, у него возник яростный взрыв свободомыслия.

Альберту попал в руки книга немецкого врача, естествоиспытателя и философа Людвиг Бюхнера «Сила и материя», запрещённая в гимназии. В ней говорилось не о Боге — Творце мира, — а о вечных и незыблемых законах природы, согласно которым происходит вечный механический круговорот Вселенной. «Впечатление было ошеломляющим», — вспоминал позднее Эйнштейн. Прочитал он и серию иллюстрированных популярных книг о разных науках Аарона Берн-

штейна. Для Альберта «эти книги стали настоящим откровением. Он глотал их с такой жадностью, с какой мальчики глотают обычно книжки об индейцах». В 12 лет юного Эйнштейна потрясла «священная книга по геометрии» — «Начала» Евклида, показав ему всю силу чистой мысли.

Следствием чтения «было... прямо-таки фантастическое свободомыслие, соединённое с выводами, что государство умышленно обманывает молодёжь; это был потрясающий вывод». Скрывать свои впечатления мальчик умел плохо, и оценки в гимназии у него стали неважные. Лишь по математике он всегда шёл первым, в ней Альберт ощущал гармонию; окончив уроки, он с увлечением играл сонаты Моцарта.

Однажды классный наставник сообщил юноше решение директора: «Вам просили передать, чтобы вы немедленно покинули гимназию». На вопрос Альберта: «В чём же я провинился?» — последовал ответ: «Одного вашего присутствия в классе достаточно, чтобы подорвать уважение к учителям».

Много позже Эйнштейн говорил уже не только о собственном детстве — он высказался об установившейся системе образования вообще: «Мне в детстве не давал покоя вопрос, почему Луна не падает на Землю, но взрослые, которым я надоедал с этим вопросом, не придавали ему никакого значения. Наша школа не развивает этой способности удивляться. Наоборот, она заглушает её своими приёмами механического заучивания... Поистине необыкновенно, что они не окончательно вытравивали у людей стремление исследовать природу!».

Исключённый из гимназии без аттестата о среднем образовании, Альберт вскоре покинул Мюнхен и пересел в итальянский город Милан, куда ещё раньше переселились его родители: оставить родину их принудили пошатнувшиеся финансовые



Альберт и его сестра Майя. 1885 г.

А. Эйнштейн в 17-летнем возрасте.





Профессор Перне, который вёл в цюрихском Политехникуме физический практикум, усомнился в способностях молодого Альберта Эйнштейна и предложил ему заняться вместо физики медициной, юриспруденцией или филологией.

дела. Здесь он сказал отцу, что намерен отказаться от германского подданства, а также покинуть еврейскую религиозную общину. Так на 16-м году жизни Эйнштейн определил свою судьбу, отрёкшись от веры и родины своих предков. Он станет космополитом и будет исповедовать созданную им самим космическую религию.

Герман Эйнштейн, отнюдь не религиозный фанатик, не препятствовал решению сына и лишь сказал, что разорён и не сможет его долго материально поддерживать. Отец дал ему совет: «Скорее приобретай специальность. Астрономы и скрипачи не так-то уж до зарезу нужны в наше время! Инженеры с хорошим дипломом и учителя нужнее...».

РЕФОРМАТОР ЕСТЕСТВОЗНАНИЯ

Осенью 1895 г. Альберт подал документы в знаменитый цюрихский Политехнический институт (Политехникум), славившийся качеством преподавания по всей Европе. Поступить сразу не удалось: с блеском сдав математику, он провалился по французскому и ботанике. Альберту пришлось закончить последний класс кантональной средней школы в Аарау, и в 1896 г. он был зачислен на педагогический факультет Политехникума, готовивший преподавателей математики и естественных наук. Долгожданный диплом, который он получил в 1900 г., а также документы гражданина Швейцарской Конфедерации давали право как минимум на должность учителя в гимназии. Альберта могли даже оставить при Политехникуме для подготовки к получению профессорского звания. Ему не удалось ни то, ни другое. Ни один из учёных мужей, хваливших способности юноши, не взял его к себе в ассистенты. Сам Эйнштейн, вспоминая молодость, говорил: «Я был

третируем моими профессорами, которые не любили меня из-за моей независимости и закрыли мне путь в науку...».

По окончании института на протяжении двух лет Альберт не мог найти постоянную работу. Даже двери школ оказались для него закрытыми. «Нужда была так остра, — писал впоследствии учёный, — что я не мог размышлять ни над одной абстрактной проблемой в течение целого года». Именно в это время от плохого питания у него началась болезнь желудка, от которой так и не удалось избавиться. Наконец, в 1902 г. счастье улыбнулось Альберту: благодаря институтскому другу Марселю Гроссману он получил место технического эксперта 3-го класса в Патентном бюро в Берне.

В 1905 г. 26-летний Эйнштейн, уже создатель теории брауновского движения, фотонной теории света и частной теории относительности, работал по-прежнему в должности эксперта, разбирая заявки на изобретения и составляя патентные формулы. Макс Планк, глава европейской теоретической физики, назвал его «величайшим физиком нашего времени» и порекомендовал Бернскому универ-



А. Эйнштейн — студент цюрихского Политехникума.

А. Эйнштейн на своём рабочем месте в Патентном бюро. Берн.





50-летие Альберта Эйнштейна.
Макс Планк вручает юбиляру почётный знак.

ситету на должность хотя бы приват-доцента. Эйнштейну отказали, и в этом не было ничего удивительного. Он представил в университет свою работу по теории относительности, но никто в ней ничего не понял (даже позднее французский физик Поль Ланжевэн шутил, что теорию относительности понимают только 12 человек в мире). Лишь в 1909 г. в Цюрихском университете появилось объявление о курсе лекций экстраординарного профессора теоретической физики Альберта Эйнштейна. Но экстраординарный — это не штатный профессор; почёта в Цюрихе было больше, а жалованья — меньше, чем в Берне. Создавать общую теорию относительности Эйнштейну приходилось в крохотной рабочей комнатке, служившей и спальней, и детской. В ней «была протянута верёвка, на которой сушились пелёнки и другое детское бельё», как вспоминал немецкий физик Макс фон Лауэ, побывавший тогда у Эйнштейна.

Наконец дело сдвинулось: в 1911 г. пришло неожиданное приглашение возглавить самостоятельную кафедру в немецком университете в Праге. В 1912 г. Эйнштейну предложили кафедру теоретической физики в цюрихском Политехникуме, том самом, в котором он сидел когда-то за студенческой партой. А в 1913 г. по инициативе Планка и Вальтера Нернста он получил место директора Инсти-

тута кайзера Вильгельма в Берлине и его избрали членом Прусской академии наук. Оставалось три года до завершения общей теории относительности. Кому ещё требовалось сделать столько, чтобы удостоиться звания академика?

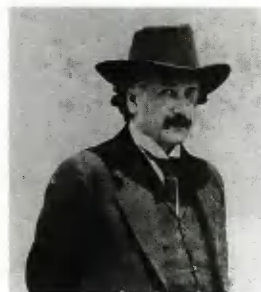
В 1919 г. к Эйнштейну, после того как наблюдения за солнечным затмением подтвердили его гравитационную теорию, пришла уже не европейская, а всемирная, неслыханная слава. В 1921 г. учёному присудили Нобелевскую премию, правда, не за теорию относительности (к которой, по-видимому, Нобелевский комитет продолжал относиться настороженно), а за теорию фотоэффекта, созданную ещё в 1905 г. С тех пор имя Эйнштейна было у всех на устах.

ИЗГНАННИК

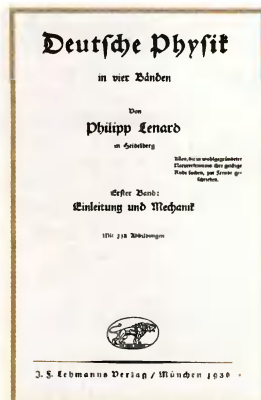
Уже в 1920 г. в Европе возникла организация, назвавшая себя «антиэйнштейновской лигой». В неё входили отнюдь не невежды: во главе стояли два нобелевских лауреата — немецкие физики Филипп Эдуард Антон Ленард и Йоханнес Штарк. С приближением «коричневой чумы» — фашизма — Ленард издал учебник «Германская физика», в котором «истинно германская физика» противопоставлялась всем «неарийским» теориям.

Космополит, пацифист и еврей Эйнштейн, обладавший мировой славой, был ненавистен нацистам. Прусская академия наук включилась в общую кампанию травли учёного. И тогда он послал уведомление, что слагает с себя обязанности академика, и в 1933 г. покинул Германию. За время отсутствия Эйнштейна его виллу разгромило гестапо.

Злой рок не оставил его и в Америке. К 1939 г. французский физик Ирен Жолио-Кюри и немецкий радиохимик Отто Ган независимо друг от друга обнаружили деление урана. Итальянец Энрико Ферми пришёл



А. Эйнштейн
в Берлине. 1916 г.



Ф. Ленард. Книга
«Германская физика».
Мюнхен — Берлин.
Титульный лист. 1936 г.



Марка Швеции,
выпущенная в честь
Йоханнеса Штарка,
нобелевского лауреата
по физике 1919 г.



Альберт Эйнштейн
и Роберт Оппенгеймер.

к идее цепной ядерной реакции посредством нейтронов. Так учёные открыли возможность создания ядерной бомбы и ужаснулись ей. 2 августа 1939 г. американские физики Лео Сцилард и Эдвард Теллер приехали к Эйнштейну с просьбой: нужно, чтобы он, самый великий и авторитетный физик, написал письмо американскому президенту Франклину Делано Рузвельту с предупреждением

об опасности для всего человечества. Что, если в Германии создадут столь разрушительное оружие? Эйнштейн подписал послание, не подозревая, что оно само окажется бомбой, которая взорвёт мир.

Через шесть лет США сбросили атомные бомбы на Хиросиму и Нагасаки. Эйнштейн считал, что в этом есть доля его вины. Он немедленно включился в борьбу против исполь-

СЕМЬЯ ЭЙНШТЕЙНА

В цюрихском Политехникуме Эйнштейн познакомился с Милевой Марич — единственной девушкой на курсе. В то время поступление девушки в одно из ведущих технических учебных заведений Европы было вызовом распространённым в обществе предрассудкам и требовало железной воли и решительности. Люди, знавшие Милеву в Цюрихе, описывают её как «милую, застенчивую, доброжелательную» особу, «непритязательную и скромную».

Привязанность Эйнштейна к маленькой хромой девушке, к тому же на четыре года старше, удивляла его знакомых. Молодой человек с его внешностью и умом без труда мог одерживать победы куда более впечатляющие с общепринятой точки зрения. Однако Эйнштейн увидел в Милеве соратницу, способную разделить его интересы.

В то время Альберт чувствовал себя одиночкой, окружённым «обывателями» (бюргерами). Только Милева, считал он, по-настоящему душевно близка ему, только с ней возможно действительно глубокое общение. Семья Эйнштейна восприняла Милеву враждебно. Средств к существованию у молодых людей не было.

Лишь после того как Альберт получил работу в Патентном бюро в Берне, они смогли пожениться. К этому времени у них уже была дочь, которую Эйнштейн, по-видимому, так никогда и не видел. Девочку пришлось отдать на воспитание. Эйнштейн находился

на государственной службе и из-за незаконнорождённого ребёнка мог потерять работу. Милева безумно любила мужа и, несмотря на то что не хотела расставаться с дочерью, согласилась на этот шаг. Со временем её стало всё больше мучить чувство вины. Отказ от дочери был травмой, от которой Милева так и не сумела оправиться. И потому столь долгожданный брак не принёс им счастья.

Некоторые биографы называют Милеву едва ли не соавтором теории относительности. Но подлинная её роль в создании этой теории — в другом. Эйнштейн однажды сказал, что мог бы жить и работать смотрителем маяка на маленьком острове, — так мало зависел он от людей. На самом деле учёный опирался на помощь сотрудников во все времена своей на-



А. Эйнштейн со своей второй женой Эльзой.



А. Эйнштейн и Милева Марич.

учной деятельности. Многие из них вспоминали, что ему нужно было «проговаривать» собственные идеи с кем-нибудь, кто был готов его охотно и внимательно слушать. Такой слушательницей и стала Милева, когда Эйнштейн бился над теорией относительности. Чтобы выступить против картины мира, которую разделяли в то время не только все физики, но и всё человечество, требовались смелость и решимость, и Эйнштейну придавала силы любовь Милевы и её безоглядная вера в его правоту.

В 1904 г. у Эйнштейна и Милевы родился сын Ганс Альберт, в 1910 г. — Эдуард. Эйнштейн был нежным и заботливым отцом, но его отношения с детьми складывались непросто. Ганс



зования атомной энергии в военных целях, но джинн уже был выпущен из бутылки. В СССР и США почти одновременно изобрели водородную бомбу. Тогда Эйнштейн выступил по Нью-Йоркскому телевидению: «Америке ведут к фашизму и войне». Так он оказался между молотом и наковальней — между большевизмом и маккартизмом. В Америке его обвинили в пособничестве коммунисти-

ческому режиму, и началась новая травля. А в Советской России его теорию преподносили как «буржуазную», «идеалистическую» и даже «сионистскую». (Великому физiku после основания Израиля предложили стать его президентом, Эйнштейн выразил признательность, но отказался.)

18 апреля 1955 г. Эйнштейна не стало. Десять человек шли за гробом, всего десять самых близких. После

Джозеф Реймонд Маккарти (1908–1957), председатель сенатской комиссии конгресса США по вопросам деятельности правительственных учреждений и её постоянной подкомиссии по расследованию антиамериканской деятельности, развернул кампанию преследования либерально и социалистически мыслящих деятелей и организаций (так называемый маккартизм).

Альберт бросил вызов отцу, ещё подростком объявив, что станет инженером. Эйнштейна, который был теоретиком до мозга костей, решение сына очень огорчило. Однако позже учёный начал гордиться его успехами. В конце жизни он написал Гансу Альберту: «Оставайся таким же, как был. Не утрачивай чувства юмора, будь добр к людям, но не обращай внимания на то, что они говорят и делают. Твой отец».

Судьба же младшего сына Эдуарда сложилась трагично. Многие современники полагали, что именно он унаследовал искру Божью от Эйнштейна. Среди сверстников он выделялся необыкновенным интеллектом и умением быстро и остроумно парировать любые реплики. Эдуард увлекался не математикой и физикой, а литературой и искусством, был одарённым музыкантом. Он мечтал доказать, что достоин быть сыном своего великого отца, пытался добиться успеха в психологии и психиатрии, восхищался трудами Зигмунда Фрейда. К несчастью, Эдуард был обречён стать не психоаналитиком, а пациентом психиатров. Во время учёбы у него началась сильнейшая депрессия. Отец пытался приобщить сына, мать показывала его лучшим специалистам в Швейцарии и Австрии, но это не помогло. Эдуарда поместили в психиатрическую клинику, где его лечили варварскими методами, в частности электрошоком. Эдуард снова и снова возвращался в клинику, где и закончил свою жизнь.

Отношения Милевы и Эйнштейна всё более ухудшались. Её преданность

обернулась собственническими чувствами. Когда-то сам Эйнштейн уверил Милеву в том, что они вдвоём противостоят остальному миру, сплошь населённому обывателями. Теперь, когда к нему пришла слава и общения с гением жаждали все, Милева воспринимала его интерес к другим людям как предательство.

В 1912 г. Эйнштейн начал переписываться со своей троюродной сестрой Эльзой. Он влюбился в неё и в феврале 1916 г. попросил жену о разводе. Это буквально подкосило Милеву, и она очень тяжело заболела, её жизнь была в опасности. После нескольких мучительных лет обоих лет Милева наконец согласилась на развод, мальчики остались жить с матерью. В 1919 г. Эйнштейн и Эльза поженились. Через два года, став нобелевским лауреатом, всю премию он передал Милеве и детям.

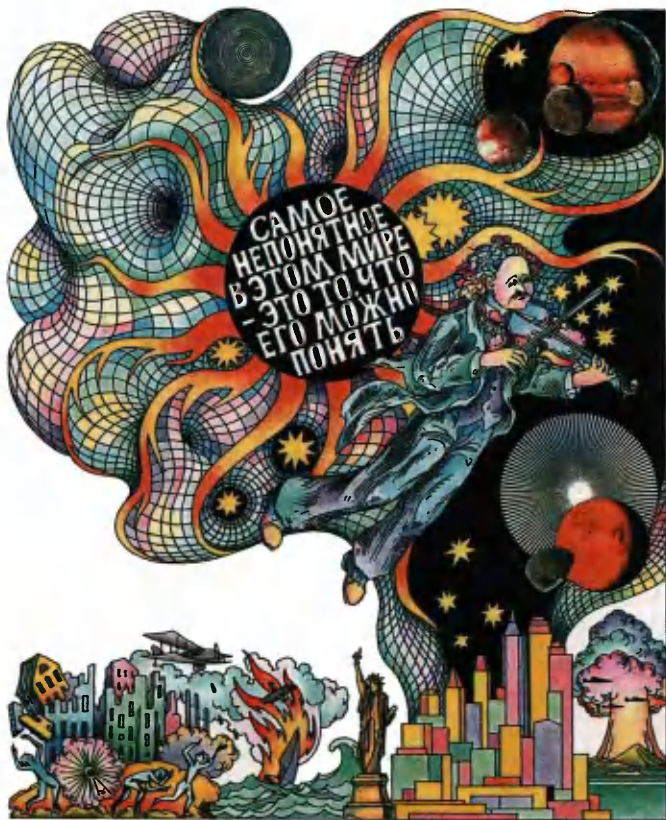
Эльза решительно защищала Эйнштейна от безумного натиска любопытствующей публики. Стоя в дверях,

она долго и подозрительно рассматривала каждого нового гостя в лорнет и резко спрашивала, какого рода дело его сюда привело. Один из постоянных посетителей сравнил её с Цербером — трёхглавым псом, охраняющим вход в подземное царство.

Жилось Эльзе нелегко. О ней зло-словили, говорили, что она недостаточно умна, чтобы быть спутницей Эйнштейна. Австро-американский философ и физик Филипп Франк писал по этому поводу: «Окружающие были склонны смотреть на неё чересчур критически и, словно чтобы компенсировать дань уважения, которую нехотя платили её мужу, обрушивали на неё те упреки, которые на самом деле желали бы высказать ему». Когда Эльза умирала от тяжёлого заболевания почек и сердца, Эйнштейн, по свидетельству его сотрудника, польского физика Леопольда Инфельда, окружил жену «величайшей заботой и сочувствием», но при этом «оставался спокойным и продолжал работать».



Милева с сыновьями.



Альберт Эйнштейн и Давид Бен-Гурион, основатель Государства Израиль.

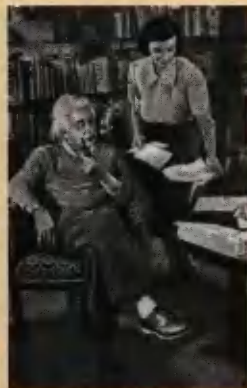
смерти наступила его новая, на этот раз бессмертная жизнь. Слава гениального физика Альберта Эйнштейна не убывает со временем ни в Германии, ни в США, ни в России.

История науки знает лишь несколько человек, которые в корне изменили взгляд людей на мироздание, отстаив своё право на инакомыслие. Такими были Пифагор, Аристотель, Архимед, Коперник, Галилей, Ньютон, Бор; только их можно поставить в один ряд с Эйнштейном.

50 ТЫСЯЧ МАРОК ЗА ГОЛОВУ

В 1943 г. американским антифашистам понадобилась рукопись работы Эйнштейна 1905 г. по теории относительности: был задуман благотворительный аукцион для сбора неправительственных средств в поддержку добровольцев. Эйнштейн тотчас согласился выставить на продажу оригинал своей статьи, но забыл, что уже использовал эти 30 страниц как черновик для другой работы. И он заново от руки написал — воссоздал — утраченный оригинал. Секретарь Эллен Дюкас диктовала старый текст, а он писал, иногда переспрашивая Эллен, верно ли она диктует: «Я мог бы сказать это куда проще!».

Рукопись была продана за 6 млн долларов, тем самым послужив делу разгрома нацистов, которые в 30-х гг. объявили теорию относительности «еврейскими штучками» и обещали 50 тыс. марок за голову учёного. Между прочим, когда Эйнштейн в изгнании узнал, во сколько оценили его голову гитлеровцы, то пошутил, что это слишком дорого. Но только он один имел право на такую шутку.



Альберт Эйнштейн и Эллен Дюкас, его секретарь. 40-е гг. XX в.



РЕВОЛЮЦИЯ ЭЙНШТЕЙНА

Когда младшему сыну Альберта Эйнштейна Эдуарду было девять лет, он однажды спросил отца: «Папа, почему, собственно, ты так знаменит?». Шёл 1919 год. Летом и осенью того года почтальон приносил к ним в дом мешки писем, связки открыток, пачки телеграмм. Краткость адреса иногда поражала: «Европа. Эйнштейну». Пожалуй, даже инопланетяне в ту пору не сомневались бы, что их «космограммы» дойдут по назначению, если в адресе будут стоять только два слова: «Земля. Эйнштейну»... Эдуард услышал совершенно неожиданный — детский — ответ улыбающегося отца: «Видишь ли, когда слепой жук ползёт по поверхности шара, он не замечает, что пройденный им путь изогнут, мне же посчастливилось заметить это».

Именно в 1919 г., 29 мая, две экспедиции английских астрономов в двух разных точках Земли — в деревне Собраль в Бразилии и на острове Принсипи у западного побережья Африки — тщательно изучили полное солнечное затмение, чтобы под-

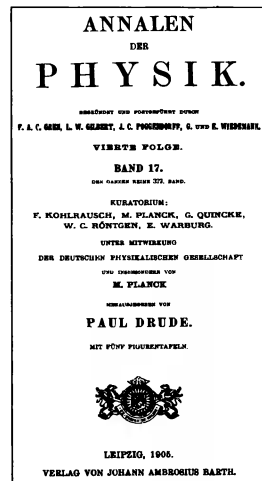
твердить или опровергнуть одно неправдоподобное предсказание Эйнштейна. Оно звучало так: световой луч звезды искривляет свой путь в поле тяготения Солнца. Указывалась и величина отклонения от прямого пути: $1,75''$ против ньютоновской $0,88''$. На первый взгляд немного, но именно поэтому фотоизмерения астрономов должны были отличаться высокой точностью. И когда ближе к осени всё подсчитали, научное сообщество поразила полученная величина отклонения луча: $1,64''$. Только Эйнштейн не удивился такому близкому совпадению теории и опыта, сказав, что по-другому и быть не могло. Однако осенью того же года он написал в письме своему старшему другу знаменитому немецкому физику Максусу Планку: «Судьба оказалась мне милость, позволив дожить до этого дня».

ВЕЛИКИЙ ГОД

Именно с 1919 г. прочно утвердилось доверие к теории относительности, а её создателя стали называть то новым Коперником, то новым Ньютоном. Однако фундамент новой физической картины мира был заложен Эйнштейном гораздо раньше — в 1905 г., когда ему исполнилось всего 26 лет. «Прости меня, Ньютон!» — написал учёный об этом позднее в коротком автобиографическом эссе.

Все биографы Эйнштейна и авторы сочинений о его научном творчестве — а к 1959 г., когда отмечалось 80-летие со дня рождения учёного, «эйнштейниана» насчитывала уже более 5 тыс. книг, брошюр и статей, — не устали выделять 1905 год как беспрецедентно плодотворный в истории физики и научной мысли вообще. В том году немецкий журнал «Анналы физики»

Журнал «Анналы физики», 1905 г., № 17. Титульный лист.



«Здесь жил Эйнштейн». Рисунок Херблока. 1953 г.



Марка и почтовый блок
Никарагуа. 1981 г.

В 1912 г. в представлении об избрании Альберта Эйнштейна в Прусскую академию наук Макс Планк, Вальтер Нернст, Генрих Рубенс и Отто Генрих Варбург писали: «В своих умоизобразительных построениях он иногда, возможно, заходит слишком далеко, как, например, в своей гипотезе световых квантов, однако это не следует чересчур строго вменять ему в вину, так как, не идя на риск, нельзя внести существенно нового вклада даже в точное естествознание».

Нобелевские лауреаты:
Дж. Франк, Ф. Келлог,
А. Эйнштейн,
И. Лангмюр.

(нем. «Annalen der Physik») опубликовал одну за другой пять проблемных работ никому не известного теоретика из Берна — эксперта 2-го класса в Патентном бюро Альберта Эйнштейна. Все эти работы, не сразу полностью оценённые, имели эпохальное значение. С них началась релятивистская революция и была продолжена революция квантовая. 1905 год в жизни Эйнштейна можно сравнить разве что с другим феноменом в истории мировой культуры — со знаменитой Болдинской осенью Пушкина.

Первой из пяти работ молодого автора была его докторская диссертация «Новое определение размеров молекул». Рецензенту в Цюрихском университете вначале показался несурово коротким текст, представленный диссертантом, — всего 21 страница! Но когда Эйнштейн добавил ещё одну фразу, диссертация была безоговорочно принята к защите.

Вторая работа ушла в «Анналы» ещё раньше — 17 марта, но напечатана была в июле. Её сложное название («Об одной эвристической точке зрения на возникновение и превращение света») могли заменить лишь три слова — «Квантовая теория света». Сам Эйнштейн в письме близкому другу назвал её «весьма революционной», однако далеко не все его коллеги в научном мире в первое время думали так же. Нобелевскому комитету понадобилось 17 лет для того, чтобы по достоинству оценить эту революционность: Эйн-

штейн получил Нобелевскую премию в 1921 г. за «заслуги в области теоретической физики, и в особенности за открытие закона фотоэлектрического эффекта». Принято считать, что нобелевским лауреатом он стал за создание теории относительности. И не было бы ни малейшей ошибки, если бы Эйнштейн получил премию ещё дважды: за частную теорию относительности и за общую. Но Нобелевский комитет решил иначе, и «квантовая премия» осталась для Эйнштейна единственной. Одна из очевидных несправедливостей в истории науки!

Главная черта революционности квантовой теории света заключалась в провозглашении его двойственной природы: свет представляет собой поток электромагнитных волн и одновременно оказывается потоком частиц — квантов электромагнитной энергии. Так Эйнштейн первым ввёл в картину природы парадоксальный образ волн-частиц, или «микрореконтантов», совершенно чуждых классической физике. Он признавался, что его чуть не свели с ума размышления о том, что такое квант. «В наши дни, — заметил он в одном из последних своих писем, — каждый студент думает, что ему это понятно. Но он ошибается».

Третья работа 1905 г. была послана в «Анналы» 11 мая и напечатана через два месяца. Она тоже называлась длинно и сложно («О движении взвешенных в покоящейся жидкости частиц, требуемом молекулярно-кинетической теорией теплоты»), а коротко могла быть озаглавлена так — «Теория брауновского движения». Это был редкостный, если не единственный случай в истории естествознания: создавая свою теорию, Эйнштейн не знал, что предсказывает и объясняет явление, уже давно наблюдаемое, но ещё не понятое физиками. Лишь позднее услышал он от своего энциклопедически образованного друга, итальянского инженера Микеландже-





ло Бессо, название явления, впервые описанного шотландцем Робертом Брауном в 1827 г., — беспорядочного зигзагообразного движения взвешенных в жидкости микроскопических частиц. А понадобилось Эйнштейну «придумать» брауновское движение для того, чтобы неопровержимо доказать факт теплового движения атомов и молекул любой среды и атомную теорию в целом.

Четвёртая работа пришла в редакцию «Анналов» 30 июня и увидела свет 26 сентября. Она называлась скромно — «К электродинамике движущихся тел» — и содержала 30 страниц теории относительности (частной, или специальной, как стали именовать её позднее). Карл Зелиг спросил Эйнштейна: «Можно ли точно назвать день рождения теории относительности?». И услышал в ответ, что от возникновения зачаточной идеи до окончания последней страницы знаменитой статьи прошло пять-шесть недель. Не часто великое так стремительно принимало законченную форму!

Сам Эйнштейн утверждал, что его теория родилась совершенно естественно в процессе развития физики и «к 1905 г. её открытие было подготовлено». Впоследствии он не раз с благодарностью вспоминал имена нидерландского физика Хендрика Антона Лоренца и французского математика и физика Жюль Анри Пуанкаре, указывая, однако, на то, что ускользнуло от их внимания и осмысления, равно как и от других его предшественников.

«Иногда я себя спрашиваю: как же получилось, что именно я создал теорию относительности? — говорил Эйнштейн немецкому физiku, нобелевскому лауреату Джеймсу Франку. — По-моему, причина этого кроется в следующем. Нормальный взрослый человек едва ли станет размышлять о проблемах пространства-времени. Он полагает, что разобрался в этом ещё в детстве. Я же,



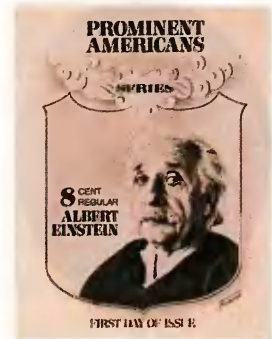
Жители Нью-Йорка приветствуют А. Эйнштейна.

напротив, развивался интеллектуально так медленно, что, только став взрослым, начал раздумывать о пространстве и времени. Понятно, что я вникал в эти проблемы глубже, чем люди, нормально развивавшиеся в детстве».

Ещё в 16 лет юный Альберт задался вопросом, можно ли догнать световой луч. Вероятно, здесь и кроется начало будущей теории относительности Эйнштейна. Догнать значило лететь вместе со световым лучом, всё время пребывая рядом с одним и тем же местом луча (например, рядом с горбом электромагнитной волны или с её впадиной). Однако при этом наблюдатель перестал бы видеть волну, она для него просто исчезла бы. Иными словами, для всего, что попыталось бы двигаться со скоростью света, свет перестал бы существовать, на самом деле никуда не исчезая.

Выход из парадокса таков: нужно признать, что движение со скоростью света только свету и доступно. Ни догнать, ни обогнать свет нельзя; скорость света — наибольшая из физически возможных. Это никак не укладывается в классическую механику, ибо сразу же возникает много странностей. Главная из них: предельная скорость может быть только одна, значит, любой наблюдатель,

А. Эйнштейн. Открытка из серии «Знаменитые американцы».





А. Эйнштейн.
Бюст работы
С. Т. Конёнкова.
1936—1937 гг.

Приор (*лат. prior* — «первый», «старший») — настоятель небольшого мужского католического монастыря.

Бenedикт Спиноза.
Гравюра. XVIII в.



измеряя скорость света, должен получить одинаковую величину — 300 000 км/с. Но если сам наблюдатель при этом движется, что делать с его скоростью? Приплюсовать к измеряемой в одних случаях и вычесть — в других? Нет, необычайность открытия состоит в том, что скорость света остаётся всегда неизменной, только для движущегося наблюдателя сами километры пространства и секунды времени становятся другими («длиннее» или «короче»), а скорость как отношение пройденного лучом пути ко времени прохождения не меняется.

Младшая сестра Эйнштейна Майя рассказывала, что в Цюрихском университете отвергли рукопись теории относительности, представленную молодым учёным как диссертационную, «усмотрев в его работе крайне неуважительное отношение к авторитетам». В действительности Эйнштейн проявил крайнее неуважение только к мнимому авторитету «здравого смысла» — к обыденной логике, так как истина для него была важнее всего.

Пятая работа 1905 г. оказалась самой короткой — всего три страницы в сентябрьском томе «Анналов физи-

ки». В её заглавии стоял вопрос: «Зависит ли инерция тела от содержания в нём энергии?». Вопрос был неожиданным для того времени, ответ — положительным: да, зависит. Именно здесь впервые появилась знаменитая формула $E = mc^2$, которая вывела физику из сферы естествознания на простор истории. Сочетание трёх величин — энергии, массы и скорости света — оказалось судьбоносным для человечества. Оно легло в основу атомной энергетики со всеми её благодатными и чудовищными возможностями. Сам Эйнштейн назвал эту формулу важнейшим следствием теории относительности.

ПРОРЫВ К ЯСНОСТИ

В одном старинном жизнеописании Леонардо да Винчи говорится: «Силы в нём было много, и соединялась она с лёгкостью». На самом деле Леонардо его творения давались не очень легко. Когда он писал свою фреску «Тайная вечеря» в монастыре Санта-Мария делье Грацие, придиричивый приор каждый день уличал его в праздности: «Не совестно ли тебе, Леонардо, часами стоять перед фреской и не дотрагиваться до кисти? Милан тебе деньги платит, а ты бездельничаешь...». Леонардо ответил так: «Возвышенные дарования достигают тем больших результатов, чем меньше работают, ища своим умом изобретений и создавая те совершенные идеи, которые затем воплощают руки...». Замечательно, что заказчик Лодовико Моро, герцог Сфорца, с этим согласился, и приору пришлось смириться.

Вот и Эйнштейн однажды сказал с присущим ему юмором: «Теперь я знаю, почему столько людей на свете охотно колют дрова... Сразу видишь результаты своей работы». А о результатах творчества, открывающихся не сразу, он написал в одной статье: «Только тот, кто сам это изведal,



ВЕРА И МЕТОД ЭЙНШТЕЙНА

Цель мысли — сама мысль,
так же как цель музыки —
сама музыка.

А. Эйнштейн

Уже будучи в преклонном возрасте, Эйнштейн вспоминал: «Хотя я и был сыном совсем нерелигиозных родителей, я пришёл вследствие традиционного воспитания к глубокой религиозности, которая, однако, уже в возрасте 12 лет резко оборвалась. Чтение научно-популярных книжек привело меня вскоре к убеждению, что в библейских рассказах многое не может быть верным... Такие переживания породили недоверие ко всякого рода авторитетам и скептическое отношение к верованиям и убеждениям, жившим в окружающей меня тогда социальной среде. Этот скептицизм никогда меня уже не оставлял».

Утратив религиозный рай молодости, внушённый традиционной верой, он нашёл другой рай — научной истины. «Дорога к этому раю была не так удобна и привлекательна, как дорога к религиозному раю, но она оказалась надёжной, и я никогда не жалел, что по ней пошёл».

«Самое непонятное в этом мире, — написал однажды Эйнштейн, — это то, что его можно понять». Все наши попытки понять мир, считал он, «основаны на уверенности, что бытие обладает совершенно гармоничной структурой. И ныне у нас меньше, чем когда-либо, оснований позволить себе отойти от веры в это замечательное обстоятельство».

Утратив веру в библейского Бога, он нашёл веру в гармонию Вселенной. Для древних греков мир представлял собой гармонию, покоящуюся на математических началах, — Космос. Эйнштейн стремился в XX в. обрести то, что было давно утеряно, — новый Космос, единое математическое описание всей Природы и всех взаимодействий.

Нидерландский философ Бенедикт Спиноза (1632—1677), оказавший наибольшее влияние на философское

мировоззрение Эйнштейна, учил, что только математический способ мышления ведёт к истине. В Природе нет ничего такого, что противоречило бы её законам, законы же постигаются с помощью математики, созданной умом, поэтому ум и душа человека — часть единой разумной субстанции, вне которой нет ни Природы, ни Бога. Бог — то же, что и всеобъемлющая Природа; познавая её, человек познаёт Бога и себя самого. Природа вечна и разумна, потому что она тождественна вечному и разумному Богу. Но Бог, в которого верил Спиноза, не был Богом Священного Писания.

В 1930 г. Эйнштейн сформулировал свою позицию так: «Я не верю в Бога, который награждает и карает...», уточнив: «Я верю в Бога Спинозы, проявляющего себя в упорядоченности мира, но не в Бога, занимающегося судьбами и делами людей». Это отождествление Бога и Природы, называемое пантеизмом, французский философ-просветитель Вольтер именовав «вежливой формой атеизма».

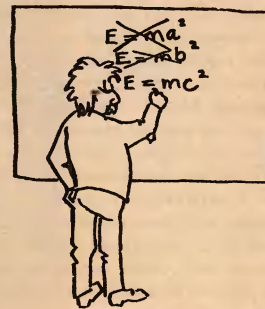
Однако Эйнштейн говорил о «мистическом трепете» и «подвижническом восторге», которые вызывает у него познание «безграничной разумности» устройства мира: «Эта глубокая эмоциональная уверенность в высшей логической стройности устройства Вселенной... есть моя идея Бога».

Такова была космическая религия Эйнштейна, в которой он исповедовался постоянно и открыто. В американский период жизни (с 1933 г.) учёный получал в ответ публичную брань и угрозы: «Почему позволяют какому-то иммигранту глумиться над верой в Бога?».

Эйнштейн говорил, что он создал общую теорию относительности прежде всего благодаря своей безграничной вере в глубочайшую внутреннюю красоту и разумность Вселенной. В 1918 г. в «планковской» речи он отметил: «К основным положениям физической теории ведёт не логический путь, а только интуиция, основанная на вчувствовании в опыт». «Вчувство-

вание в опыт» означает постижение Природы на основе «свободного творчества человеческого духа». Физическая теория создается «свободным творчеством» интуиции, а не монотонной логикой рассудка. В лекциях, прочитанных им в 1921 г. в Принстонском университете (США), он определил науку как «создание человеческого разума с его свободно изобретёнными идеями и понятиями». Понятия — это свободные изобретения разума; постулаты или законы теории — догадки, их нельзя логически вывести или получить путём индукции на основании опытных данных.

Это был уже иной метод познания, далёкий от ньютоновского «гипотез не измышляю». Вместо медленного индуктивного перехода от анализа экспериментальных данных к объясняющей их теории, Эйнштейн ставил во главу угла согласованность и гармонию наиболее общих принципов. Вера в свободное изобретение идей оказалось верой в мощь человеческого разума, которую Эйнштейн разделял со Спинозой. Создавая теорию гравитации, учёный исходил из опыта («вчувствовался в опыт»). Но в то же время он утверждал, что никакой опыт без свободных идей и глубокого философского анализа не позволил бы ему проникнуть в структуру пространства и времени — настолько она удалена от прямого чувственного восприятия. Эйнштейн был художником, философом и религиозным мыслителем — и именно поэтому он стал реформатором естествознания.





А. Эйнштейн
в Шюрихе. 1912 г.

знает, что такое полные предчувствия, длящиеся годами поиски во мраке, волнение и страстное ожидание, переходы от уверенности к изнеможению и, наконец, рывок, приносящий ясность».

Младшая дочь выдающегося физика Марии Склодовской-Кюри Ева сохранила детское воспоминание о семейной прогулке в Альпах летом 1913 г., когда к ним присоединился Эйнштейн со старшим сыном Гансом Альбертом, которому шёл десятый год. Дети прислушивались к разговору взрослых и развеселились, услышав, как Эйнштейн сказал Марии: «Понимаете, мне хочется знать, что происходит с пассажирами лифта, падающего в пустоту!».

«Могли ли мы подозревать, что это воображаемое падение лифта затрагивает основные проблемы теории относительности?» — записала Ева. Ей бы следовало уточнить — «общей теории относительности». Во время той альпийской прогулки полного ответа на вопрос о лифте у Эйнштейна, по-видимому, ещё не было.

А речь шла о свободном падении тел в поле тяготения. Решалась проблема природы тяготения — что оно собой представляет?

В классической механике всемирное тяготение — взаимное притяжение масс в соответствии с законом Ньютона — осуществлялось через пустоту. Ничто не связывало тяготеющие массы, и не было представления о поле тяготения — носителе гравитационной энергии, — связывающем все тела. И уж тем более не играли никакой физической роли геометрические свойства пространства, которые жёстко задавались аксиомами Евклида.

Согласно же общей теории относительности Эйнштейна, все тела в меру своей массивности искривляют окружающее пространство, как бы продавливая его собственной тяжестью. Менее массивные тела как бы скатываются к более массивным по естественному возникающим кривым траекториям. («Как бы» здесь означает, что это образная модель тяготения, и не более.)

КАРИНА МИРА, СОЗДАВАЕМАЯ ФИЗИКОМ-ТЕОРЕТИКОМ

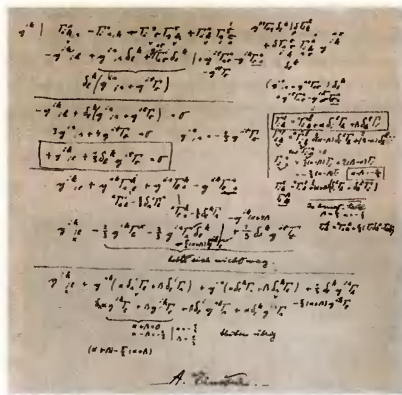
Какое место занимает картина мира физиков-теоретиков среди всех возможных таких картин? Благодаря использованию языка математики эта картина удовлетворяет наиболее высоким требованиям в отношении строгости и точности выражения взаимозависимостей. Но зато физик вынужден сильнее ограничивать свой предмет, довольствуясь изображением наиболее простых, доступных нашему опыту явлений, тогда как все сложные явления не могут быть воссозданы человеческим умом с той точностью и последовательностью, которые необходимы физики-теоретику. Высшая аккуратность, ясность и уверенность — за счёт полноты. Но какую прелесть может иметь охват такого небольшого среза природы, если наиболее тонкое и сложное малодушно и боязливо оставляется в стороне? Заслуживает ли результат столь скромного занятия гордого названия «картины мира»?

Я думаю — да, ибо общие положения, лежащие в основе мысленных построений теоретической физики, претендуют быть действительными для всех происходящих в природе событий. Путём чисто логической дедукции из них

можно было бы вывести картину, т. е. теорию всех явлений природы, включая жизнь, если этот процесс дедукции не выходил бы далеко за пределы творческой возможности человеческого мышления. Следовательно, отказ от полноты физической картины мира не является принципиальным.

Отсюда вытекает, что высшим долгом физиков является поиск тех общих элементарных законов, из которых путём чистой дедукции можно получить картину мира. К этим законам ведёт не логический путь, а только основанная на проникновении в суть опыта интуиция. При такой неопределённости методики можно думать, что существует произвольное число равноценных систем теоретической физики; в принципе это мнение безусловно верно. Но история показала, что из всех мыслимых построений в данный момент только одно оказывается преобладающим. Никто из тех, кто действительно углублялся в предмет, не станет отрицать, что теоретическая система практически однозначно определяется миром наблюдений, хотя никакой логический путь не ведёт от наблюдений к основным принципам теории.

(Из статьи А. Эйнштейна
«Методы научного исследования».)



Эйнштейн «имел счастье заметить» устройство мироздания — природу гравитации, связывающей все тела во Вселенной. Гравитация выглядит как силовое взаимодействие масс, на самом же деле это проявление свойств геометрии пространства, а точнее, пространства-времени — свойств, порождаемых кривизной нашего мира. Кривизна в свою очередь возникает оттого, что мир не пуст, но полон материей — веществом и полями... Если вести отсчёт от 1905 г., на создание общей теории относительности у него ушло целое десятилетие. Решающий рывок пришёлся на 1915 г., когда в один прекрасный день он увидел: его уравнения способны объяснить то, что для ньютоновской механики оставалось загадкой. Таково было мучившее астрономов дополнительное смещение перигелия Меркурия на 43" в столетие. Эйнштейн испытал радостное потрясение. Своему другу Паулю Эренфесту он признался: «Я был в экстазе неделю!».

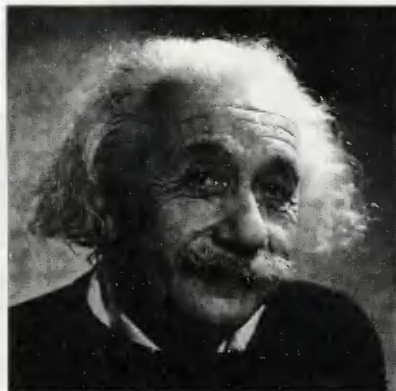
ТРУДНЫЕ ВРЕМЕНА

Эйнштейн говорил о гениальном датском физике Нильсе Боре, что тот с молодых лет казался загипнотизированным своими исканиями. Это можно было сказать и про него са-

мого. Приятель Эйнштейна врач Янош Плесч писал: «Ум его не ограничен ничем... и не подчиняется никаким заранее установленным правилам: он спит, пока его не разбудят, он бодрствует, пока ему не скажут, что пора спать, аппетит к нему приходит, когда ему подают кушанье, и тогда он может есть, пока его не останавливают... За ним нужно присматривать как за малым ребёнком...». О себе Эйнштейн как-то раз написал удивительно: «А чтобы Вы не очень надомной смеялись, добавлю: мне отлично известно, что я — весёлый ябллик...».

Несмотря на такое признание, Эйнштейн говорил порой, что завидует участи одинокого зрителя на далёком маяке, особенно когда у него выдавалось трудное время. Вероятно, самыми тяжёлыми в житейском смысле были для учёного годы разлада с первой женой Милевой Марич, матерью обоих его сыновей, с которой он связал судьбу ещё в студенческую пору.

Времена выпадали трудные не только в личной жизни. В 1933 г., после прихода Гитлера к власти, Эйнштейн нашёл временное прибежище в Бельгии под покровительством королевы Елизаветы и короля Альберта, распорядившегося о тайной охране Эйнштейна, потому что до Бельгии



Страница рукописи А. Эйнштейна, посвящённой общей теории относительности.

В 1923 г. Эрнест Резерфорд на вопрос о том, что он думает о теории относительности, ответил: «А, чепуха... Для нашей работы это не нужно».

Перигелий — ближайшая к Солнцу точка орбиты небесного тела, обращающегося вокруг него.

А. Эйнштейн. 1946 г.



ДРАМА ИДЕЙ

Одиночество Эйнштейна в последний период жизни усугублялось ещё одним мотивом. В его письме 1947 г. к выдающемуся немецкому физiku Максy Борну есть такая фраза: «Ты веришь в играющего в кости Бога, а я — в полную закономерность в мире объективно сущего...». Эти слова означали, что, по мнению Эйнштейна, Природа не является, вопреки представлениям квантовой механики, вероятностным миром, где господствуют законы случая.

Поразительно: Эйнштейн, с открытия которого началось исследование волн-частиц и который столько сделал для того, чтобы родилась механика этих «микрোকентавров», продолжал верить в классическую однозначную причинность! В истории физики остался «матч века»: его единоборство с Нильсом Бором на Сольвеевском конгрессе, состоявшемся в Брюсселе в 1927 г.

В 1911 г. Эрнест Сольвё (1838—1922), бельгийский химик-технолог и предприниматель, и Вальтер Нернст (1864—1941), выдающийся немецкий физик и химик, решили собрать в Брюсселе знаменитых физиков, чтобы обсудить современные проблемы науки. Финансировал предприятие Сольве, поэтому конгрессы получили название Сольвеевских.

День за днём Эйнштейн выдвигал тончайшие возражения против основного положения квантовой теории — со-

отношения неопределённости, — но всякий раз терпел неудачу. Poleмика выявила со всей беспощадностью, что на стороне Бора были парадоксальные реалии микромира, а на его стороне — только классическая традиция и вера в постижимость мира. Здесь кончалась физика и начиналась философия. Недаром сам Эйнштейн говорил про историю физики: «Это драма — драма идей!».



Участники 1-го Сольвеевского конгресса. 1911 г.

►► Памятник А. Эйнштейну в Вашингтоне.

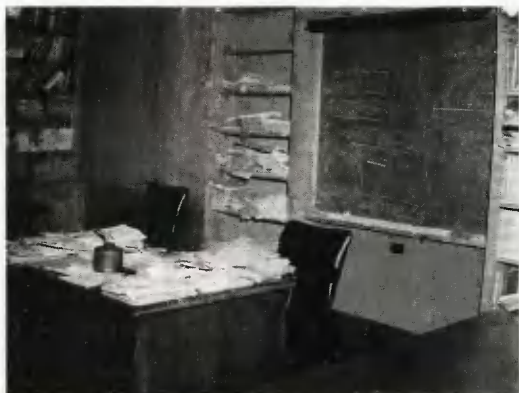
Рабочее место А. Эйнштейна в Институте фундаментальных исследований. Принстон. 1955 г.



дошли угрозы нацистов расправиться с ним. Два агента стали повсюду сопровождать 54-летнего профессора.

Эйнштейну предложили почётные профессуры в Париже и Мадриде, американцы пригласили его в Принстон, в Институт фундамен-

тальных исследований (*англ.* Institute for Advanced Study). Эйнштейн предпочёл Принстон и не ошибся. На 22 года — до самой его смерти в апреле 1955 г. — этот тихий «город высокой учёности» стал для учёного желанной обителью. Он обладал свободой и независимостью. У него





не было никаких обязанностей, кроме одной: делать то, что заблагорассудится. Главными для Эйнштейна в принстонские десятилетия стали поиски законов единой теории поля. Он верил, что у Природы есть такие законы, объясняющие все взаимодействия масс и зарядов, все проявления гравитации и электромагнетизма и «сплачивающие» их в единое целое.

Над камином в принстонском кабинете учёного было выгравировано изречение: «Бог хитроумен, но не злонамерен». Оно выражало веру Эйнштейна в разумное устройство Природы, которая воодушевляла его в поисках единой теории. Но эта теория никак не давалась ему в руки,

непреодолимые трудности возникали на пути. Времена снова оказались для него нелёгкими. А другие теоретики, хотя и исполненные величайшего почтения к нему, этих тяжких поисков не одобряли.

С годами Эйнштейн действительно превращался в одинокого смотрителя на маяке, которой освещал «дорогу в никуда», как полагало подавляющее большинство его современников. Но может быть, в своих надеждах он был всё-таки прав? Ведь поиски единой теории, правда на несколько иных путях, позднее захватили многих физиков и не без успеха продолжают в наши дни. В сущности, сейчас в науке выполняется именно программа Эйнштейна...



А. Эйнштейн в Принстоне.

НИЛЬС БОР И КВАНТОВАЯ РЕВОЛЮЦИЯ

Погружённый в размышления, отказавшийся от обыденных радостей жизни бледный отшельник — этому хрестоматийному образу «настоящего учёного» Нильс Бор соответствовал меньше всего. Друзья вспоминают его непревзойдённым лыжником, летящим по снежному склону; счастливым главой семейства, окружённым детьми, а потом внуками; азартным спорщиком, душой компании. Пожалуй, событий его долгой и насыщенной жизни хватило бы на нескольких человек.

в 1922 г.), — физиком и лауреатом Нобелевской премии.

Христиан и Эллен Бор сумели создать в семье атмосферу свободы и уважения, дать детям прочный фундамент знаний и развить уверенность в себе, благодаря чему расцвели их



Нильс Бор.

НАЧАЛО

Родился Нильс Хенрик Давид Бор 7 октября 1885 г. в семье, которая представляла собой настоящую научную династию: отец великого физика, Христиан Бор, был профессором физиологии, младший брат, Харальд Август (1887—1951), стал выдающимся математиком, а один из сыновей Нильса Бора, Оге (родился



Нильс Бор на защите докторской диссертации. Рисунок в газете «Дагбладет». Апрель 1911 г.

таланты. Мальчики присутствовали на традиционных встречах в доме Боров, где велись оживлённые дискуссии на самые разные темы. Кроме учёных, друзей отца, здесь бывали художники, писатели, музыканты, приезжали гости из других стран.

Добродушный, застенчивый Нильс и бойкий, насмешливый Харальд были неразлучны в детстве и остались самыми близкими людьми на всю жизнь. С разницей в год братья поступили в Копенгагенский университет; Нильс увлёкся физикой и философией, Харальд — математикой. Один из участников студенческих дискуссий так вспоминал братьев: «...казалось, они мыслят едино. Они поправляли друг друга или защищали то или иное положение пылко, но доброжелательно. Идеи становились более отточенными... Подобный метод мышления был настолько присущ братьям, что никто другой не мог вступить в их спор». Впоследствии именно Нильс Бор разовьёт и сделает основным в физике метод поиска научной истины в ходе непрерывного диалога и столкновения мнений.

Увлекались братья и футболом, они даже входили в состав национальной сборной Дании и стали знамениты на всю страну задолго до обретения научной славы. Позже, когда Нильс Бор получил Нобелевскую премию, датские спортивные газеты вышли с заголовками: «Нашему вратарю дали Нобелевскую премию!».

«НАУЧНЫЙ ОТЕЦ»

В 1908 г. Нильс Бор получил степень доктора наук, защитив диссертацию по электронной теории металлов. После отдыха он отправился в Кембридж к главе Кавендишской лаборатории Джозефу Джону Томсону (1856—1940), английскому физiku, открывшему электрон. Вначале дела шли не слишком удачно, однако

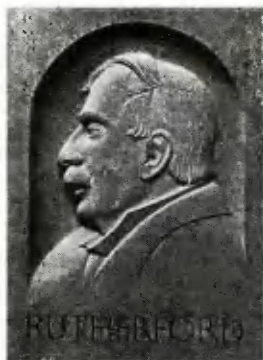
спустя несколько месяцев Бор познакомился с Эрнестом Резерфордом (1871—1937). Прославленный учёный произвёл на молодого человека огромное впечатление, и Бору стало ясно: он хочет работать только с этим шумным, весёлым человеком, обладающим поразительной научной интуицией. Резерфорд со свойственной ему пронизательностью быстро оценил потенциал датчанина. Он говорил коллегам: «Этот Бор — самый талантливый парень, которого мне приходилось встречать». В апреле 1912 г. Бор переехал в Манчестер, где находилась знаменитая резерфордовская лаборатория, в которой уже были совершены многие открытия в области атомной физики.

Здесь Бор чувствовал себя счастливым. Лекции по самым животрепещущим вопросам физики, новые эксперименты, традиционные вечерние чаепития, сопровождавшиеся увлечёнными спорами, — в лаборатории было всё, что нужно молодому учёному для быстрого роста. Резерфорд стал для Бора не просто руководителем, а «научным отцом», старшим другом, всегда готовым понять, поддержать, мягко предостеречь от поспешных выводов и бурно радоваться его успеху.

Первое пребывание Бора в Манчестере длилось лишь четыре месяца, но именно в это время родились идеи, которые легли в основу будущей квантовой революции. Манчестер отныне стал для Бора второй родиной, куда он возвращался снова и снова в самые плодотворные и самые тяжёлые периоды своей жизни.

СПАСЁННЫЙ АТОМ

Нильс Бор не случайно торопился вернуться в Копенгаген — там его ждала невеста, Маргарет. Ещё одним событием этого счастливого года была их свадьба.



Эрнест Резерфорд. Барельеф работы Э. Гиллара — подарок П. А. Капицы Н. Бору.



СЕМЬЯ БОРА

Брак Нильса и Маргарет оказался на редкость счастливым и гармоничным. Бор мог рассчитывать на понимание жены и поддержку всех своих начинаний; она помогала ему готовить статьи, переводить их на английский, вела переписку. Главное же — благодаря Маргарет в доме царил атмосфера теплоты, доброжелательности и искреннего участия, в которой любой новый человек быстро справлялся с напряжением и раскрывался, а оторванные от дома молодые люди, сту-

денты и сотрудники Бора, не чувствовали себя одинокими.

Спустя несколько лет в семье появился первенец, а затем один за другим ещё четверо сыновей. Так же как в своё время его отец, Бор обо-жал проводить время с детьми, обучать их самым разным вещам — от рубки деревьев до катания на лыжах. В зарубежных поездках Бора по очереди сопровождали сыновья — отец хотел, чтобы мальчики увидели мир.

Счастливую семейную жизнь Бора омрачила трагедия, случившаяся в 1934 г. Его старший сын, 19-летний

Христиан, погиб на глазах у отца: его смыло с палубы прогулочной яхты поднявшимся шквалом.

Бор всегда с уважением относился к интересам сыновей и предоставил им свободу в определении своего пути. Ханс стал врачом, Эрик — инженером, Эрнест — адвокатом, и только один, Оге, последовал примеру отца и работал вместе с ним. В дни семейных праздников и школьных каникул дом Боров наполнялся многочисленными внуками, и Нильс возил-ся с ними с таким же удовольствием, как когда-то с сыновьями.



Н. Бор с семьей в Москве. 1937 г.
Слева стоит П. А. Капица.



Н. Бор с женой. Марка Дании, выпущенная к 100-летию Н. Бора.



Оге Бор. Марка Доминиканской Республики.

Бор занял место доцента в родном университете и всё свободное время отдавал разработке новых идей. В течение года напряжённой работы и постоянной переписки с Резерфордом он создал знаменитую трилогию — три статьи, в которых излагал основные идеи своей теории строения атома.

Строение атома было уже выяснено экспериментами Резерфорда. Вокруг тяжёлого ядра вращаются лёгкие электроны. Оставалось непонятным главное. Согласно законам электродинамики Максвелла, электроны, двигаясь с центростремительным ускорением, должны излучать электромагнитные волны, терять энергию и падать на ядро. Атом Резерфорда

был неустойчив, и никакие хитроумные уловки не могли его спасти. Именно этот отрицательный результат и стал отправной точкой поисков Бора. Вопрос о стабильности атома «просто невозможно решить посредством уже известных правил». Нужно изменить не модель атома, а сами правила физики.

В 1900 г. немецкий физик Макс Планк решил в чём-то похожую проблему. Согласно законам классической физики, любое тело должно почти мгновенно излучить в пространство всю свою тепловую энергию и остыть до абсолютного нуля (*ультрафиолетовая катастрофа*). Планк вышел из этого тупика (а задом вывел формулу спектра теплового

Марка Дании, выпущенная к 50-летию боровской теории атома.





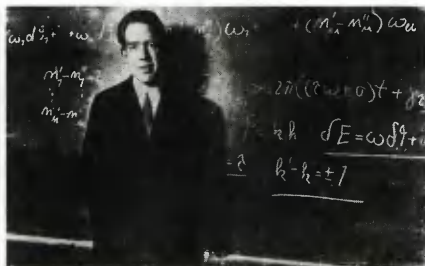
Макс Планк.

излучения тел), предположив, что энергия излучается не непрерывно, а порциями — квантами. По рассказу сына Планка, отец говорил тогда, что он либо сделал открытие первого ранга, сравнимое с открытиями Ньютона, либо полностью ошибается.

В 1905 г. Эйнштейн с помощью квантовой идеи объяснил явление фотоэффекта. Квант электромагнитного излучения ведёт себя как неделимая частица и поэтому может выбивать электроны из металла. Теперь Бор применил идею кванта к атому. Если орбитальный момент электрона L равен целому числу квантов Планка $L = n\hbar$, ($n = 1, 2, \dots$) то электрон не может непрерывно излучать, постепенно теряя свой момент вращения. Излучать он способен лишь порциями, прыгая с одной стационарной орбиты на другую, более низкую. Самая низкая орбита ($n = 1$) оказывается заведомо устойчивой — меньше, чем $\hbar$, момент электрона быть не может.

В теории Бора частота излучения электрона совершенно не зависела от частоты его обращения, как того требовала классическая электродинамика. Она определялась разницей в энергии между начальной и конечной орбитами, и это непринуждённо и просто объясняло спектры атомов. Эйнштейн назвал теорию Бора проявлением «высшей музыкальности в сфере теоретической мысли». Он признавался, что у него также «возникали подобные мысли, но не хватило духа их развить».

Нильс Бор.
20-е гг. XX в.



Резерфорд, однако, в письме Бору сразу же указал на главную трудность новой теории. «Как электрон устанавливает частоту, с которой он должен колебаться при переходе из одного стационарного состояния в другое? Видимо, Вы будете вынуждены предположить, что электрон заранее „знает“, где остановиться».

Реакция научного мира оказалась быстрой и бурной, сторонники и противники новой теории сталкивались в многочисленных дискуссиях. Макс Фон Лауэ сказал по поводу гипотезы Бора: «Это вздор! Уравнения Максвелла действительны во всех обстоятельствах, и электрон должен излучать непрерывно». Недовольство физиков старого поколения выразил лорд Джон Уильям Рэлей: «Не берусь утверждать, что открытия так не делаются. Быть может, и делаются. Но меня такое не устраивает». Через некоторое время всё же стало ясно: работы Бора изменили физику и задали направление её развития на весь XX век.

ЛЮБИМОЕ ДЕТИШЕ

В 1914-м, в год начала Первой мировой войны, Резерфорд вновь пригласил Бора к себе в лабораторию. Эксперименты и научные споры проходили теперь на фоне тревожных сводок с фронтов и беспокойства за судьбу призванных в армию коллег. Резерфорд прилагал максимум усилий, чтобы спасти своих учеников от военной мясорубки, но это удавалось не всегда. Ударом для многих стала гибель молодого и талантливого английского физика Генри Гвина Джеффриса Мозли (1887—1915), обнаружившего перед самой войной совпадение заряда ядра атома с порядковым номером элемента. Открытие Мозли явилось убедительным подтверждением теории Бора.

Через три года Бор вернулся в Копенгаген с новыми идеями и новой



мечтой: создать в родном городе научный центр, подобный лаборатории Резерфорда, где физики из разных стран могли бы работать и общаться. Идея нашла отклик у земляков. Один из друзей юности Бора, ставший преуспевающим предпринимателем, передал на строительство Института теоретической физики большую сумму денег и организовал сбор дополнительных средств по подписке. Город выделил под институт участок на краю прекрасного парка.

Бор с головой ушёл в новый проект. Он даже отказался от предложения, которое в другое время заставило бы его забыть обо всём на свете: Резерфорд вновь предлагал ему работу в лаборатории. В письме старшему другу Бор объяснял своё решение: «Я считаю себя морально обязанным помочь всем, что в моих силах, развитию физических исследований в Дании... Мне бы так хотелось снова поселиться в Манчестере, я уверен, что это сыграло бы колоссальную роль в моей исследовательской работе... Разумеется, средства для неё, моё собственное жалование, а также оборудование будут значительно ниже английских стандартов. Но я считаю своим долгом остаться и работать здесь, хотя превосходно отдаю себе отчёт в том, что результаты будут куда более скромными, чем в случае, если бы я согласился работать с Вами». Пришлось ограничиться лишь краткой поездкой в Англию к Резерфорду, который сменил Дж. Дж. Томсона на почётнейшем для физика посту главы Кавендишской лаборатории. Фактически Бор мог стать преемником Резерфорда в Манчестере, однако выбрал работу на родине.

Наконец 15 сентября 1920 г. в присутствии множества гостей, среди которых находился и Резерфорд, институт был открыт. Здесь было предусмотрено всё: лаборатории (хотя пока и не очень богатые оборудованием), идеальные для физиков маленькие, скромные кабинеты, про-

СТИЛЬ БОРА

В статьях Бора нет ни вступления, ни заключения. После краткого обзора он сразу же переходит к сути дела. Такой стиль у него выработался ещё в юности. В школе Нильс однажды поразил учителя сочинением под названием «Прогулка в порт», состоящим из двух фраз: «Мой брат и я пришли гулять в порт. Там мы увидели, как корабли причаливают к причалам». Другое сочинение о металлах заканчивалось фразой: «В заключение я хотел бы упомянуть об алюминии». В Копенгагенском университете преподаватель химии, услышав однажды серию взрывов, сказал не оборачиваясь: «Это Бор». Он не ошибся — для экспериментатора Нильс был слишком любознателен.

Бор считался тугодумом, но умел мыслить глубоко и парадоксально. Вероятно, такое мышление и нужно было в эпоху квантовой революции, когда в течение трёх десятилетий учёные неуверенно брели к истине по шатким мосткам явно некорректных, но необходимых теорий. Известный немецкий физик Джеймс Франк (1882—1964) рассказал историкам, как Бор в 1920 г. отвечал на вопросы о квантовой модели атома. На многие вопросы ответов не последовало: по признанию самого Бора, в его построении нет окончательности. «Порою он усаживался неподвижно с выражением безнадежной апатии на пустом лице. Глаза его становились бессмысленными, безвольно повисали руки, и он делался до такой степени неузнаваемым, что вы терялись... Но вдруг он озарялся изнутри. Вы видели, как вспыхивает в нём искра, и он произносил: „Так, теперь я это понимаю!..“. Я уверен, что такая сосредоточенность бывала свойственна Ньютону».

сторная аудитория для дискуссий, удобная библиотека, столовая, выход в парк. Ничего подобного специально для учёных не создавалось со времён Александрийского мусейона.

Простое и изящное здание Института теоретической физики превратилось в одну из достопримечательностей Копенгагена. Полтора десятка лет спустя рядом построили здание Института математики, который возглавил брат Бора Харальд.

Впоследствии Институту теоретической физики присвоили имя Нильса Бора, а Институту математики — имя Ханса Кристиана Эрстеда.

ГЕРОИЧЕСКОЕ ВРЕМЯ

В конце 1922 г. за свою теорию атома Нильс Бор стал лауреатом Нобелевской премии по физике. Ликовала вся страна: это была первая в истории Нобелевская премия, присуждённая датчанину. Свою нобелевскую лекцию Бор закончил словами: «Наша теория находится ещё в самой предварительной стадии, многие



Семинар в Институте теоретической физики в Копенгагене. В первом ряду О. Клейн, Н. Бор, В. Гейзенберг, В. Паули, Г. Гамов, Л. Ландау, Г. Краммерс. 1930 г.

фундаментальные проблемы ожидают своего разрешения». Впереди была огромная работа.

В последующие годы, названные потом «героическим временем», Бор

ВРЕМЯ БОРА

Это было героическое время. Научные открытия не были плодом деятельности одной выдающейся личности, они потребовали сотрудничества десятков учёных из различных стран, и каждого из них вдохновлял, поддерживал, углублял и вёл вперёд всеобъемлющий критический дух Нильса Бора. Это были времена терпеливой работы в лаборатории, смелых экспериментов, множества ложных стартов и необоснованных предположений, времена споров, критики и блестящих математических импровизаций.

Для тех, кто принимал в этом участие, это были времена творчества, исполненные ужаса и восторженного трепета перед совершаемым...

(Р. Оппенгеймер.)

Бор являл собой прямую противоположность тем учёным, которые, создав теорию, остаток жизни посвящают её защите. Он сам искал недостатки и слабые места в собственной теории, настаивал на всестороннем изучении проблемы и никогда не соглашался удовлетвориться первым попавшимся решением. Любая проблема, которую он разрабатывал, к моменту её решения теряла почти всякое сходство с первоначальным своим вариантом.

(Р. Мур.)

Удивительно привлекательным в Боре как в научном мыслителе является редкостное сочетание смелости и осторожности; мало кто обладает его талантом сочетать интуитивное понимание скрытых вещей с удивительным чувством критики. Он обладает поразительным знанием деталей, но взгляд его постоянно устремлён на основной принцип, скрытый под поверхностью. Бесспорно, Бор — один из величайших первооткрывателей нашего века в области науки.

(А. Эйнштейн.)

и собравшиеся в Институте теоретической физики молодые учёные, среди которых были лучшие умы того времени: швейцарец Вольфганг Паули (1900—1958), англичанин Поль Адриен Морис Дирак (1902—1984), немец Вернер Гейзенберг (1901—1976), — продолжили штурм атома. Гипотезы рождались и опровергались, эксперименты давали всё новые факты, дискуссии заходили в тупик, а затем вспыхивали с новой силой. Порой учёных охватывали усталость и отчаяние, но в институте были традиционные способы преодоления кризисов: прогулки, спорт, любимые Бором вестерны (при этом он никогда не мог уследить за сюжетом и требовал от окружающих пояснений), бесконечные шутки и розыгрыши.

«Превосходно, что мы столкнулись с парадоксом, — любил говорить Бор. — Значит, есть надежда на прогресс». И прогресс в самом деле был. К 1926 г. оформились две системы описания атома — матричная механика Гейзенберга и волновая механика австрийского физика-теоретика Эрвина Шрёдингера (1887—1961). Первая описывала электрон как частицу, вторая — как волну. При этом обе теории были несомненно верными и подтверждались данными экспериментов. Как это объяснить?

Возникали новые и новые вопросы. Гейзенберг убедительно доказал, что невозможно одновременно установить скорость электрона и его положение в пространстве, поскольку сам факт наблюдения, требующий присутствия фотонов, неминуемо приведёт к смещению электрона.

Такое утверждение ставило под сомнение не просто те или иные теоретические посыпки, но и собственно теорию познания. Впервые в истории науки речь шла о том, что в природе есть вещи принципиально непознаваемые. Смириться с этим было трудно и разуму, и душе. Вот как



Гейзенберг описывал охватившее его тогда отчаяние: «Неужели природа и в самом деле настолько абсурдна?».

Зимой 1927 г. Бор и его коллеги почувствовали, что оказались в тупике. Совершенно измучившись, Бор вместе с женой уехал в Норвегию кататься на лыжах. Там, во время стремительных спусков, на свежем горном ветру, безысходность отступила и сменилась ясностью. Через две недели, вернувшись в Копенгаген, Бор уже излагал Гейзенбергу свою новую идею — знаменитый принцип дополнительности. После месяцев совместной работы, в которой участвовал также Паули, родилась теория, о которой Дирак сказал: «Она в корне изменила понимание мира физиками; пожалуй, такого потрясения наука не знала за всю историю». Роберт Оппенгеймер назвал её «новым этапом в эволюции человеческого мышления».

Атомный микромир в корне отличается от нашего макромира, утверждалось в новой теории. Невозможность точного наблюдения за движением электрона есть принципиальное свойство микрочастиц, и это не мешает исследовать их и формулировать законы атомной физики. Главное же в том, что не нужно выбирать между представлением об электроны как о частице или волне. Эти «плоские» классические образы не исключают, а дополняют друг друга и только вместе могут достаточно полно описывать объёмную реальность квантового мира. Подобная «дополнительность», считал Бор, не препятствие к изучению природы, а её важнейшее свойство, понимание которого требует новой логики.

Многие физики восприняли теорию Бора — Гейзенберга настороженно и даже враждебно. Отказ от требования определённости, признание непознаваемости движения электрона слишком сильно противоречили духу и идеалам классической физики. Среди противников этих

идей был и Альберт Эйнштейн, всегда относившийся к Бору с огромным уважением и интересом. На знаменитом Сольвеевском конгрессе в 1927 г. Эйнштейн неустанно выдвигал всё новые и новые аргументы против квантовой теории. После нелёгких раздумий датский физик отводил их один за другим, ссылаясь в том числе на ранние работы по квантовой механике самого Эйнштейна. Но тот не мог согласиться с новым в идением Вселенной, продолжая и в дальнейшем отстаивать свою точку зрения. Эйнштейну не нравилось, что случайность и вероятность отныне стали частью фундамента физики. В классической статистической физике случайность лишь следствие неполноты информации о поведении огромного множества частиц, теперь же оказывалось неполным наше знание даже об одной частице. Однако критика Эйнштейна способствовала утверждению новой теории, которая прошла настоящую проверку боем.

Начало 30-х гг. XX в. Бору и его коллеги встретили с чувством особого подъёма: за короткий срок было сделано так много, что казалось, скоро в физике не останется несокрушимых бастионов. Молодые горячие головы даже предсказывали: через несколько лет физике можно будет «закрыть»,



Нильс Бор.
Графический портрет
работы С. Я. Яковлева.



Н. Бор и А. Ф. Иоффе.
Москва. 1934 г.



Нильс Бор. 1937 г.



Эвристика (от греч. «эуриско» — «нахожу») — «искусство нахождения истины», система логических и методических правил теоретического исследования.

Чтобы спасти свои нобелевские медали от конфискации, В. Гейзенберг и Дж. Франк оставили их у Бора в Копенгагене. Во время оккупации Дании венгерский радиохимик Дьердь Хёвешши сохранил их, растворив в царской водке. После войны из этого металла Нобелевский комитет перечислил медали.

на что Бор только улыбался, пытаясь избежать неизменной трубки.

В те годы Бор кроме развития квантовой теории много думал и о том, что сформулированные им принципы могут быть применены к другим областям знания — от биоло-

гии до социологии, — и обсуждал свои мысли с коллегами. Общение на самые широкие темы являлось неотъемлемой частью работы института, гениальные физические идеи рождались не только из формул и экспериментов, им необходима была питательная среда постоянного эвристического диалога. Один из участников традиционных вечерних бесед в гостиной у Боров, впоследствии знаменитый физик Отто Фриш, вспоминал: «У меня было такое чувство, словно сам Сократ вернулся к жизни; любой спор он поднимал на более высокий уровень, черпая из нас мудрость, о существовании которой мы и не догадывались (и которой, разумеется, на самом деле не было). Мы беседовали обо всём — о религии и о генетике, о политике и об искусстве, — и, когда я возвращался на велосипеде домой по мокрому от дождя копенгагенским

ДОПОЛНИТЕЛЬНОСТЬ КУЛЬТУР

...Шёл август 1938 года. Тревожное лето стояло в Европе. Пять лет господствовал в Германии Гитлер, и нацизм уже начал бесчинствовать за её пределами. Но до королевской Дании очередь ещё не дошла, и она могла позволить себе принять Международный конгресс антропологов и этнографов. Через два года это стало бы невозможно.

На одно из пленарных заседаний конгресс собрался в средневековом замке в городе Хельсингёр — в том знаменитом Эльсиноре, где когда-то по воле Шекспира разыгралось действие его трагедии «Гамлет». Гамлетовский вопрос «Быть или не быть?» стоял тогда острее, чем в шекспировские времена, и касался всего человечества.

Бор взял с собой в Хельсингёр четырёх сыновей. Он хотел, чтобы мальчики увидели, как научное сообщество мирового уровня примет его сокровенные идеи всечеловеческого единения: он выступал с докладом «Философия естествознания и культуры народов».

Бор не был искусным оратором, и если завораживал аудиторию, то тихой убедительностью. Так случилось и в Хельсингёре. «Однако настала минута, когда движение в зале заставило отца умолкнуть... — рассказал впоследствии один из сыновей Бора Оге. — А произошло вот что: внезапно, как по команде, вскочили со своих мест делегаты Германии и гуськом — в затылок друг другу — покинули заседание!» В этот момент с кафедры раздавались

тихие слова докладчика о равноправии всех культур. И ещё: «Всякой человеческой культуре, замкнутой в себе, свойственно националистическое самодовольство!». Оге Бор добавил, что едва ли все немецкие антропологи были нацистами, однако «дисциплина страха» перед доносом о неблагонадежности их уравнивала.

Но, по-видимому, более других возмутил немецкую делегацию тезис Бора о том, что есть лишь одно лекарство против губительного самодовольства: признать взаимную дополняемость разных культур, только вместе создающих культуру человечества.



Замок Хельсингёр в Дании, где в 1938 г. проходил Международный конгресс антропологов.



улицам, пахнувшим фиалками, я чувствовал себя пьяным от самого духа платоновских диалогов».

ВОЙНА

Между тем из Германии, где работало немало выдающихся физиков, доходили всё более тревожные известия. В 1933 г. Адольф Гитлер стал рейхсканцлером, и вскоре были приняты расистские законы против людей «неарийского» происхождения. Бор немедленно отправился в поездку по университетам Германии. Он приглашал учёных, которым грозила опасность, переехать в Копенгаген, а также предлагал помочь устроиться в других европейских странах. Это было только начало огромной работы, и трудно даже перечислить, сколько выдающихся умов спасли от нацистов Бор и организованный им совместно с братом и другими датскими учёными Комитет помощи учёным-беженцам.

С того времени, как стало ясно, что планы Гитлера распространяются далеко за пределы Германии, Бору предлагали переехать вместе с семьёй в один из университетов Соединённых Штатов Америки. Но он не покидал Данию и после начала Второй мировой войны, чувствуя ответственность как за институт, так за организованный им путь спасения учёных из оккупированных стран. Однако в Дании также стало небезопасно, и Бор обеспечивал переезд беженцев в Швецию и США. Его беспокоила не только судьба учёных. Когда и в Дании, вопреки обещаниям, фашисты попытались начать уничтожение евреев, Бор использовал всё своё влияние, чтобы предотвратить трагедию. Совместными усилиями датчан и шведов — от короля и королевы до простых рыбаков — датские евреи были спасены.

Во время оккупации Бор категорически отказался от любого сотрудничества с нацистскими властями, бойкотировал все, хотя бы косвенно связанные с ними мероприятия, поддерживал связь с подпольным движением. Тучи над его головой сгущались. Он и Харальд находились под постоянным наблюдением гестапо, но на арест гитлеровцы пока не решились: опасались, что до сих пор достаточно терпеливая Дания взорвётся от негодования.

Однако чем дальше, тем иллюзорнее становилось «мирное сосуществование» с оккупантами. Датчане всё больше тяготились тем, что, по сути, кормили ненавистную армию. В стране участились забастовки и диверсии, на что последовали жестокие репрессии, расстрелы заложников. Наконец 28 августа 1943 г. противостояние стало явным: правительство не выполнило требования оккупантов о расстреле участников забастовок и ушло в отставку, а в стране было введено военное положение. Бор уничтожил все документы института, которые могли быть использованы гитлеровцами, и приготовился к худшему. На Нюрнбергском процессе выяснилось, что именно на эти дни был запланирован арест Нильса и Харальда Боров. Но Нильса Бора предупредили о грозящей опасности, и в тот же день подпольщики переправили его с женой в Швецию. Вскоре ночную



Н. Бор в лаборатории. США.





ГЕРБ УЧЁНОГО

В середине 40-х гг. Датская корона наградила Нильса Бора орденом Слона. Это было и почётно, и обременительно. Почётно потому, что таким орденом награждались только члены королевских фамилий и главы государств. Обременительно потому, что этикет требовал представить большое изображение родового герба для почётного зала в замке Фредериксбург — старой резиденции датских королей. Откуда было взяться родовому гербу у профессора Бора, сына и внука профессоров — выходцев из простого народа, а по материнской линии — внука банкира-еврея? Герб пришлось придумать, и он последовал примеру своего покойного учителя лорда Резерфорда о Нельсон, также получившего титул за научные заслуги. На традиционном рыцарском шите сэр Эрнест решил выгравировать пересекающиеся кривые радиоактивных превращений — знаменитые экспоненты трансмутаций. Между тем у Резерфорда был выбор — рисунок планетарного атома или расщепляемого ядра, но он выбрал то, «с чего всё началось», — законы радиоактивности.

Бор тоже стоял перед выбором. Он мог изобразить на рыцарском шите квантовую модель атома или первую цепную реакцию деления урана, описанную им в 1939 г. вместе с американским физиком Джоном Арчибалдом Уилером. Однако из всех своих заслуг перед человеческим познанием он выбрал принцип дополнительности. На шите чётко очерчен круг — наполовину светлый, наполовину тёмный, образованный слиянием двух криволинейных фигур. Это древнекитайский символ инь — ян. Девиз над шитом гласил: «*Contraria sunt complementa*», что в переводе с латинского означает: «Несовместимости суть дополнительности».



Герб Нильса Бора, установленный в замке Фредериксбург. Дания.

■ Инь — в древнекитайской мифологии символ женского начала (севера, тьмы, смерти, земли, луны). Ян символизирует мужское начало (юг, свет, жизнь, небо, солнце). Весь процесс мироздания и бытия китайцы рассматривали как результат взаимодействия инь и ян, всегда выступающих вместе.

переправу через пролив совершили Харальд и сыновья Нильса, а маленькую внучку пришлось вывозить из страны в хозяйственной сумке.

В конце 30-х — начале 40-х гг. в разных странах одновременно проводились эксперименты по расщеплению атомного ядра. Вначале ни Бор, ни Эйнштейн, ни другие физики не предполагали, что использование гигантской энергии, которая должна выделяться при делении атомного ядра, — вопрос нескольких лет. Однако теперь, в разгар войны, тревога нарастала: из Германии доходили сведения о работе над созданием сверхмощной бомбы. Гейзенберг дал понять это Бору во время их короткой встречи в Копенгагене.

Вскоре Нильс Бор получил приглашение присоединиться к группе физиков, которые собрались в далёкой Америке для работы над такой бомбой. Их целью было опередить нацистских учёных. Из Швеции Бора

и его сына Оге самолётом тайно перебросили в Англию, а затем они отправились в Америку, чтобы принять участие в секретном проекте.

Противоречивые чувства испытывали работавшие над созданием бомбы физики. То им казалось, что они спасают мир от абсолютной власти Гитлера, то их терзали сомнения, что принесёт человечеству выпущенный из бутылки джинн. Когда после падения Германии стало ясно, что гитлеровцы не могли успеть создать бомбу, а американцы применили ужасное оружие без крайней необходимости, полностью уничтожив два японских города с многотысячным мирным населением, сомнениям пришёл конец. С этого момента Бор неустанно твердил об опасности гонки атомных вооружений. Но правительства Англии и Америки, как, впрочем, позднее и СССР, воодушевлённые новым могуществом, не желали его слушать.

Война закончилась, Бор смог воссоединиться с семьёй, а через некоторое время он вернулся в родной город. Его первое появление в Институте теоретической физики стало настоящим праздником: после всех мытарств друзья, коллеги, ученики снова были вместе, никто не скрывал слёз радости. Бору торжественно вручили новые ключи от здания. Предстояла грандиозная работа по перестройке института — для дальнейших исследований атома требовалось новое, гораздо более сложное и громоздкое оборудование. Институт вырос вглубь: под землёй были устроены современные лаборатории. Постепенно в Копенгагене вновь начали собираться молодые учёные со всего света.

Последние годы жизни Бора посвящены идее создания в Дании реактора для использования энергии атома в мирных целях и связанного с ним нового исследовательского центра. Он сам объездил немало мест,



пока не нашёл подходящее — остров Рёсо. Бору удалось убедить датских парламентариев, что огромные для маленькой страны деньги, потраченные на строительство, станут ценным вкладом в будущее Дании. В 1958 г. новый научный центр начал работу.

18 ноября 1962 г. полная событий жизнь Нильса Бора закончилась. Можно сказать, что учёному всегда везло. Ему удивительно повезло с родителями, учителями, женой, друзьями, у него были здоровье, увлекательная работа, любовь соотечественников, мировая слава, — что ещё



Н. Бор и Л. Д. Ландау на празднике Архимеда в МГУ. 1961 г.

нужно для счастья? Впрочем, все, кто знал и любил Бора, считали как раз встречу с ним огромным везением в собственной жизни.

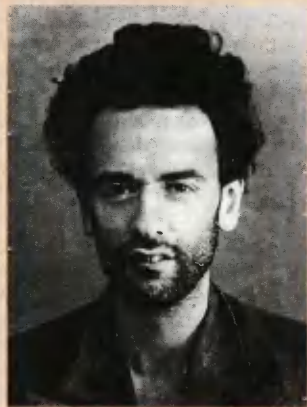
АТОМНАЯ БОМБА И «ФИЗИЧЕСКИЙ ИДЕАЛИЗМ»

Атомная бомба сыграла особую роль в истории российской физики XX в.

К 1949 г. готовилось Всесоюзное совещание физиков, на котором предполагалось дать отпор «физическому идеализму, космополитизму и низкопоклонству перед Западом», запретить в СССР теорию относительности и квантовую механику. Утверждалось, что среди книг по физике, изданных на русском языке, большинство написано «буржуазными учёными и

с идеалистических позиций» и что в учебниках физики «совершенно недостаточно показана роль русских учёных». Угроза была серьёзной: незадолго до этого на совещании биологов разгрому подверглась генетика. Немало учёных погибло в лагерях.

Совещание отменили в последний момент по указанию Сталина. Рассказывают, что Л. П. Берия, курировавший работы по созданию атомной бомбы, спросил у руководителя атомного проекта И. В. Курчатова, правда ли, что теория относительности и квантовая механика — идеалистические теории.



Лев Давидович Ландау в тюрьме НКВД на Лубянке. 1938 г.



Руководитель атомного проекта СССР Игорь Васильевич Курчатов.



Первая советская атомная бомба РДС-1.

На это Курчатов ответил: «Мы делаем атомную бомбу, действие которой основано на теории относительности и квантовой механике. Если от них отказаться, придётся отказаться и от бомбы». Берия был явно обеспокоен: «Главное — бомба, остальное — ерунда». Видимо, он сразу же доложил об этом разговоре Сталину.

Один из парадоксов истории: атомная бомба, оружие массового уничтожения, спасла жизни тысяч людей.



ПОЛЬ ДИРАК

Вклад учёного в развитие науки оценивают по-разному. Можно подсчитать количество ссылок на его работы в публикациях других учёных и вычислить *индекс цитируемости*. Так поступают при решении вопросов о выделении грантов, присуждении премий и замещении вакантных должностей на кафедрах институтов.

О вкладе классика науки можно судить иначе: по числу принципов, эффектов, формул или уравнений, носящих его имя. По этому критерию безусловный лидер физики XX в. — британский теоретик Поль Адриен Морис Дира́к. Уравнение Дирака, матрицы Дирака, дельта-функция Дирака, метод вторичного квантования Дирака, монополь Дирака, статистика Ферми — Дирака, «море» Дирака, сопряжение Дирака, антиматерия Дирака — вот далеко не полный перечень терминов, вошедших в учебники по квантовой физике.

И в целом современная физика «говорит» на языке введённых Дираком понятий, таких, как «наблюдаемая», коммутационные соотношения, «аш перече́ркнутое» $\hbar$, «бра-» и «кет-векторы» (от разбитого на две части английского слова bracket — «скобка»), c - и q -числа для классических (от *англ.* classical) и квантовых (от *англ.* quantum) величин соответственно, операторы рождения и уничтожения частиц и функциональный интеграл. Стиль творчества одного из самых оригинальных физиков XX столетия по виртуозной лёгкости и изяществу сопоставим лишь с мопартовским стилем в музыке.

СЛАГАЕМЫЕ УСПЕХА

Поль Дирак родился 8 августа 1902 г. в английском городе Бристоле. Его отец, Чарлз Адриен Ладислас Дирак, эмигрировав из Швейцарии, женил-

ся на англичанке Флоренс Ханне Холтен и зарабатывал преподаванием французского языка. Их дети Реджинальд, Поль и Беатрис, как и глава семьи, получили британское гражданство лишь в 1919 г. Семья эмигрантов вела довольно замкнутый образ жизни. В английском обществе всегда настороженно относились к чужакам. Молчаливость, застенчивость, привычка к размышлениям в одиночестве и долгим уединённым прогулкам стали основными чертами характера Поля на всю жизнь.

Ещё в школьные годы Дирак самостоятельно пришёл к идее о связи пространства и времени. «Немало поразмыслив над этим, я понял, что время очень похоже на любое другое измерение, и тогда мне пришло в голову, что между пространством и временем может существовать какая-то связь и что эти объекты следует рассматривать в общем четырёхмерном виде», — вспоминал он. Поэтому релятивистскую теорию пространства-времени Эйнштейна — Минковского юноша воспринял сразу.

В 1918 г. Дирак стал студентом Бристольского университета. Его знакомство с теорией относительности состоялось на лекциях философа Брода, который однажды выписал на доске формулу квадрата интервала между двумя разделёнными в пространстве и во времени событиями:

$$ds^2 = dx^2 + dy^2 + dz^2 - c^2 dt^2.$$

Юный Дирак сразу ощутил всю силу этого простого выражения. Его оказалось достаточно, чтобы студент «вскоре смог сам выводить основные уравнения специальной теории относительности». Вся специальная теория относительности Эйнштейна является следствием инвариантности приведённого интервала. Релятивистская тематика занимает особое место в творчестве Дирака: с ней связаны



Поль Адриен Морис Дирак.

«В мир с сокрушительной силой ворвалась теория относительности. О ней неожиданно заговорили все... Одни выступали за теорию относительности, но были и такие, которые выступали против... Нетрудно понять причину столь головокружительного успеха. Мы тогда только что пережили очень серьёзную и страшную войну... В результате все устали. Хотелось о ней забыть. И тогда возникла теория относительности, замечательная идея, открывающая дорогу к новому образу мышления... Мне кажется, что ни до, ни после ни одна научная мысль, которой удавалось завладеть умами широких слоёв публики, не произвела равного по своей силе эффекта».

П. А. М. Дирак



первые самостоятельные научные результаты и главное открытие в его жизни. Физики того времени увлекались следующей задачей — найти релятивистские обобщения всех физических законов. «Решить такую задачу, — вспоминал Дирак, — обычно было не очень сложно, и она выглядела как интересная игра. Я был тогда молодым студентом и немного спустя тоже включился в эту игру. В те времена было довольно просто сделать хорошую работу и опубликовать статью. Для этого можно было подобрать любое физическое явление, имеющее удовлетворительное объяснение в рамках старых представлений о пространстве и времени, и просто переписать его „в лоб“ в терминах новой четырёхмерной геометрии».

Получив в 1921 г. степень бакалавра в Бристольском университете, Поль сделал попытку продолжить учёбу в Кембриджском университете, но ему — недавнему эмигранту — было отказано в стипендии. Вернувшись в Бристоль, он получил разрешение слушать лекции на математическом факультете неофициально, без платы за обучение. Но, как говорится, нет худа без добра. Дирак познакомился с проективной геометрией, которая явилась вторым слагаемым его успеха.

В 1923 г. Дирак сумел осуществить свою мечту — он стал аспирантом Кембриджа. При выборе научного руководителя в его судьбу вновь вмешался счастливый случай. Дирак намеревался работать над проблемами теории относительности и хотел пойти к профессору Каннингхэму, но тот отказался взять ещё одного аспиранта. Руководителем Поля назначили Ральфа Говарда Фаулера (1889—1944). Он увлёк Дирака новой в то время темой — познакомил с работами Эрнеста Резерфорда, Нильса Бора и Арнольда Зоммерфельда, посвящёнными строению атома. Кембридж тогда являлся мировым центром развития теории атома.

Прежде атомы были для Дирака некими совершенно гипотетическими объектами, а о квантовых идеях Планка и Эйнштейна он не имел ни малейшего представления. Уже через два года в самом престижном журнале того времени — «Трудах Королевского общества» — появилась первая 12-страничная статья Дирака «Основные уравнения квантовой механики», ещё через три года — статья «Квантовая теория электрона». Спустя пять лет (в 1933 г.) эти работы были отмечены высочайшей наградой — Нобелевской премией по физике.

В 31 год Дирак превратился в признанного лидера квантовой науки. Он стал одним из создателей квантовой механики, заложил основы квантовой электродинамики и квантовой электроники, предсказал существование антиматерии. Дирака избрали членом Лондонского королевского общества; он возглавил наиболее известную в Кембридже кафедру Люкаса, которой некогда руководил сам Ньютон.

МОСТ ДИРАКА

Фаулер поставил перед аспирантом Дираком вопрос: «Как распространить идею боровских орбит на более сложные атомы?». Познакомившись с теорией Бора, Дирак был поражён её непоследовательностью. При определённых условиях законы динамики Ньютона могли описывать движение электронов в атоме. Для этого

«Проективная геометрия... произвела на меня сильнейшее впечатление своим математическим изяществом. Теоремы евклидовой геометрии, над которыми мы долго бились, оказываются очень простыми, как только вы воспользуетесь соображениями проективной геометрии... В своей работе я всегда прибегал к соображениям проективной геометрии... но я ничего не писал о ней... ибо понимал, что большинство физиков плохо её знают. Получив какой-нибудь результат, я переводил его на аналитический язык и превращал свои аргументы в уравнения. Такое доказательство мог понять любой физик.»

П. А. М. Дирак

- 109 Meeting 19 Jan 1916.
Mathematical Principles of Quantum Mechanics
P. A. M. Dirac.
- 110 Meeting 26 Jan 1926.
The Brackets and Integrals of Hamiltonian Mechanics
R. W. Ditchburn
- 111 Meeting 3 Feb 1926.
Dirac's theory of quantum electrodynamics
R. W. Ditchburn
- 112 Meeting 17 Feb 1926.
The effect of electric fields on the Hamiltonian of a free electron
R. W. Ditchburn
- 113 Meeting 24 Feb 1926.
Dirac's theory of quantum electrodynamics
R. W. Ditchburn

Лист из журнала-дневника Клуба Капицы с записью об очередном докладе П. Дирака.

Кембриджский университет.





Уильям Роуан Гамильтон необычайно рано проявил свои научные таланты. Уже в 22 года он стал профессором Дублинского университета; в 28 лет установил принцип наименьшего действия для консервативных механических систем; в 29 лет обнаружил аналогию между механикой и оптикой, привёл уравнения механики к каноническому виду (уравнения Гамильтона). В 1843 г. Гамильтон ввёл «кватернионы», обобщающие понятие комплексного числа, в 1847-м — термин «вектор».

Симеон Дени Пуассон (1781—1840) — французский математик, механик и физик.

Скобки Пуассона $[u, v]$ определяются как

$$\sum_k \left(\frac{du}{dq_k} \frac{dv}{dp_k} - \frac{dv}{dq_k} \frac{du}{dp_k} \right);$$

где q_k — произвольная координата, p_k — произвольный импульс. Несложно убедиться, что $[u, v] = -[v, u]$.

П. Дирак.

достаточно было запретить электронам излучать на стационарных орбитах, т. е. наложить на классические законы квантовые условия. При этом удавалось объяснить атомные спектры, но почему-то лишь в случае атомов с одним валентным электроном. Даже для простейшего двухэлектронного атома гелия теория Бора переставала работать.

Теорию боровских орбит Дирак штудировал по книге «Строение атома и спектры» немецкого физика и математика Арнольда Йоганна Вильгельма Зоммерфельда (1868—1951). В книге есть приложение, посвящённое динамике ирландского математика и физика Уильяма Роуана Гамильтона (1805—1865) и её применению в теории атомов. Гамильтоновская форма записи уравнений механики поразила Дирака своей математической красотой: «Гамильтон был, по-видимому, наделён каким-то удивительным даром проникать в самую суть... Он нашёл для уравнений механики такую форму записи, значение которой суждено было понять лишь спустя столетие, через много лет после его смерти».

Примерно в то же время Дирак ознакомился с работой Гейзенберга, который считал, что теорию атома следует строить не на основе классической механики, а только на языке наблюдаемых величин. Но все наблюдаемые величины — спектральные линии атомов — связаны не с одной, а с двумя боровскими орбитами (атом излучает при переходе электрона с одной боровской орбиты на другую). В классической физике (механике Ньютона, электродинамике Максвелла) динамические переменные являются либо скалярами, либо векторами. Например, импульс частицы $\vec{p} = (p_1, p_2, p_3) = \{p_i\}$, $i = 1, 2, 3$. Для квантовых же величин, которые должны отражать состояния не одной, а двух боровских орбит, понадобились переменные не с одним, а с двумя индексами a_{ij} , $i, j = 1, 2, 3$.

Гейзенберг считал, что придумал новый математический аппарат, не подозревая о существовании матричного исчисления, в связи с чем получил от своего учителя Макса Борна прозвище «талантливый невежда».

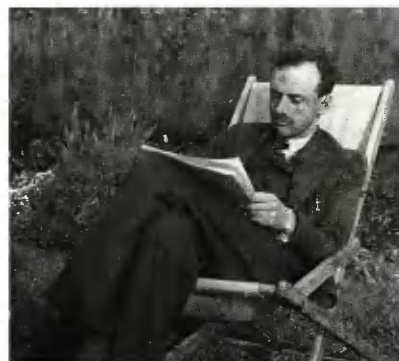
Неперестановочность (после Дирака физики стали говорить «некоммутативность») динамических переменных в механике Гейзенберга, т. е. когда $uv \neq vu$, удручала её создателя, который считал это пороком своей теории. Напротив, Дирак рассматривал некоммутативность переменных как основной вклад Гейзенберга в построение новой динамики. Он поставил перед собой задачу так изменить уравнения Ньютона, чтобы они удовлетворяли некоммутативной алгебре. Неожиданно Дирак вспомнил, что в классической механике уже есть нечто подобное — некоммутативные скобки Пуассона.

По Гамильтону, уравнение движения для любой динамической переменной можно записать в виде

$$du/dt = [u, H],$$

где в правой части стоит скобка Пуассона данной переменной с полной энергией H , которую называют также функцией Гамильтона. Совершив замену $[u, H] \rightarrow (uH - Hu)/i\hbar$, Дирак пришёл к общему уравнению движения в квантовой механике:

$$du/dt = (uH - Hu)/i\hbar.$$





Работа Дирака «Основные уравнения квантовой механики» стала для него «пропуском» в элитарный клуб «Создателей квантовой механики», который швейцарский физик-теоретик Вольфганг Паули (1900–1958) называл *Knabenphysik* (нем. «Физика мальчишек»). Очень молоды были члены этого клуба: Паули исполнилось 25, Гейзенбергу — 24, Дираку и Паскуалию Йордану — по 23 года.

Дирак фактически построил мост между старой — классической — механикой и новой — квантовой. Для него получение свежих результатов вновь превратилось в своеобразную игру. Различные модели динамических систем описывались в форме Гамильтона, затем замена скобки Пуассона на квантовый коммутатор давала уравнения квантовой механики.

В мае 1926 г. Дирак защитил в Кембридже докторскую диссертацию под названием «Квантовая механика». Тогда же появилась работа австрийского физика-теоретика Эрвина Шрёдингера (1887–1961), в которой вводилось представление о волновых функциях. Вначале Дирак не воспринял новую волновую механику: во-первых, уже существовала квантовая механика Гейзенберга; во-вторых, Шрёдингер пользовался неизвестным английскому учёному аппаратом волновых функций; в-третьих, Шрёдингер какое-то время надеялся, что его идеи «отменяют» квантовую революцию, вернув физику в классическое состояние. Но затем, освоив новый аппарат и задумавшись о свойствах симметрии волновых функций, Дирак независимо от итальянского физика Энрико Ферми (1901–1954) создал статистическую теорию квантовых частиц с полуцелым спином (статистику Ферми — Дирака). Вскоре Дирак неожиданно для всех физиков показал, что картины Гейзенберга и Шрёдингера, несмотря на противоположность их идеологий, были разными представлениями одних и тех же квантовых законов.



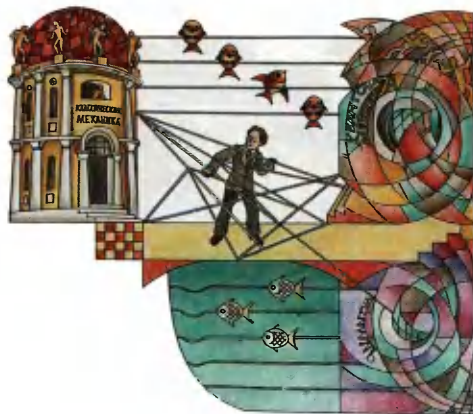
П. Дирак
и П. А. Капица
в Кембридже.

Наиболее значительным результатом осмысления идей Шрёдингера была «одна из неизвестно откуда родившихся идей». Дирак подумал: «Что будет, если взять волновое уравнение Шрёдингера и попробовать применить процесс квантования к самой волновой функции? Всегда считалось, что волновая функция выражается обычными числами, т. е. c -числами. Возникает вопрос, что будет, если превратить их в [квантовые] q -числа... Так возник метод, известный как теория вторичного квантования». В результате «первичного» квантования удастся описать

ОТКРЫТИЕ НА ПРОГУЛКЕ

Дирак вспоминал: «В одно из октябрьских воскресений 1925 года, когда, несмотря на твёрдое желание отдохнуть на прогулке, я усиленно размышлял над разностью $uv - vu$, мне... вспомнилось, что в продвинутых курсах динамики я кое-что читал о таких странных величинах, как скобка Пуассона, и мне показалось, что существует тесная аналогия между скобкой Пуассона для величин u и v и коммутатором $uv - vu$... Я плохо помнил, что такое скобка Пуассона, и не знал для неё точной формулы... Но скобка Пуассона таила в себе замечательные возможности, и я подумал, что, может быть, мне удастся сделать великое открытие. Я чувствовал себя обязанным освежить свои знания о скобке Пуассона...

За городом это было невозможно, поэтому мне оставалось поспешить домой... Имевшиеся у меня учебники были слишком элементарны и не содержали таких сведений. Больше я просто ничего не мог сделать, потому что в воскресенье вечером библиотеки не работали. В мучительном ожидании я провёл ночь, ничего не зная о том, стоила ли чего-нибудь моя идея, но в течение этой ночи уверенность моя крепла. Наутро я бросился в библиотеку прямо к открытию и, найдя в «Аналитической динамике» Уиттекера скобку Пуассона, обнаружил, что это как раз то, что мне нужно... Мысль о том, чтобы связать скобку Пуассона с коммутаторами, положила начало моей работе в области новой квантовой механики».



Оскар Бенджамин Клейн (1894—1977) — шведский математик.
Вальтер Гордон (1893—1939) — немецкий физик-теоретик.
Владимир Александрович Фок (1898—1974) — российский физик-теоретик.

движение квантовых частиц во внешних полях, которые сами остаются «за бортом» квантовой теории. В результате вторичного квантования частицы и поля «уравниваются в правах». Взаимодействие частиц описывается как результат обмена квантами полей. В этом — основная идея квантовой теории поля.

ПРОРЫВ К АНТИМАТЕРИИ

В 1927 г. Дирак приступил к задаче релятивистского обобщения квантовой механики. Это представлялось особенно актуальным, поскольку скорости движения электронов в атоме сравнимы со скоростью света. Синтез теории относительности и квантовой механики станет главным достижением Дирака и важнейшей задачей XX столетия — в полной мере она не решена до сих пор.

Однажды перед началом лекции на Сольевеевском конгрессе 1927 г. к Дираку подошёл Бор и спросил: «Над чем вы сейчас работаете?». «Пытаюсь построить релятивистскую теорию электрона», — ответил Дирак. «Но ведь Клейн уже решил эту задачу». Замечание Бора обескуражило Дирака, и он стал объяснять, чем его не устраивает решение Клейна. В это время началась лекция, и обсуждение вопроса не состоялось.

Квантовое релятивистское уравнение, получившее имя Клейна — Гор-

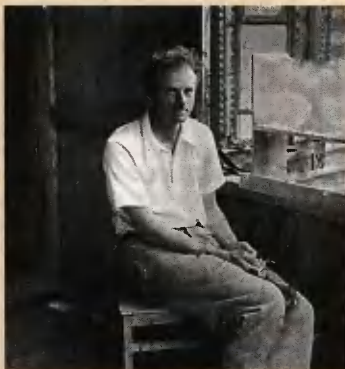
ЛИЧНАЯ ЖИЗНЬ ДИРАКА

Творческая жизнь Поля Дирака целиком отражена в его многочисленных открытиях. В личной жизни он всегда был скромным, и, возможно, поэтому о ней известно меньше. В 1937 г. Дирак женился на сестре известного американского физика-теоретика Юджина Пола Вигнера — Маргарет, и у них родились две дочери.

Дирак был замечательным и верным другом. С Петром Леонидовичем Капицей (1894—1984) они сблизились в Кембридже в 20-х гг., и эта дружба продолжалась 60 лет. По словам Анны Алексеевны, жены П. Л. Капицы, «замкнутый, немногословный, застенчивый, можно сказать абсолютно противоположный Капице по характеру, Дирак был с ним как-то особенно душевно близок и трогательно внимателен». Когда советское правительство не разрешило Петру Леонидови-

чу вернуться в Кембридж после очередного летнего отпуска, Дирак много раз приезжал в Россию повидаться с Капицей, чтобы его другу не было одиноко. Тесная дружба связывала

Дирака и с другим известным российским физиком, Игорем Васильевичем Таммом (1895—1971). Помимо науки их объединяло страстное увлечение альпинистскими походами.



Поль Дирак на даче П. Л. Капицы.



Поль и Маргарет Дирак.



СТИЛЬ ДИРАКА

Дирак любил выражаться точно и требовал точности от других. Однажды на семинаре в конце длинного вывода докладчик обнаружил, что знак в окончательном выражении у него не тот. «Я в каком-то месте перепутал знак», — произнёс он, всматриваясь в написанное. «Вы хотите сказать — в нечётном числе мест», — поправил его Дирак.

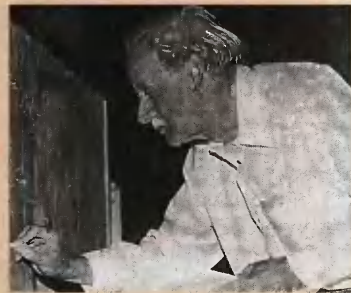
В другой раз Дирак сам был докладчиком. Окончив сообщение, он обратился к аудитории: «Вопросы есть?». — «Я не понимаю, как Вы получили это выражение», — подал

голос один из присутствующих. «Это утверждение, а не вопрос, — ответил Дирак. — Вопросы есть?»

Математическая красота физических законов была для Дирака интуитивным мерилем правильности физических теорий. Выступая в 1955 г. перед студентами-теоретиками физического факультета Московского государственного университета, он оставил им как заповедь надпись мелом на доске: «Physical laws should have mathematical beauty» (англ. «Физические законы должны быть математически красивы»).

«Заповедь Дирака» решили сохранить: часть доски с надписью заклю-

чили в рамку под стекло, и она до сих пор служит украшением стены одной из аудиторий факультета.



дона — Фока, выводили в разное время различные авторы. С этой формулы начинал Шрёдингер, но затем отказался от неё в пользу своего нерелятивистского уравнения. Однако уравнение Клейна — Гордона — Фока не согласовывалось с опытом и имело внутренние логические погрешности. Его решения допускали отрицательные вероятности состояний электрона. В итоге синтез релятивистских и квантовых представлений нельзя было признать состоявшимся. Именно об этом мог бы сообщить Дирак Бору, если бы не лекция...

Создавшееся положение беспокоило Дирака до тех пор, пока однажды ему не пришла в голову спасительная мысль — получить уравнение, извлекающая квадратный корень из выражения для релятивистской энергии частицы: $E^2 - p^2 c^2 = m^2 c^4$. Так он вывел своё знаменитое уравнение. Оно не только удовлетворяло теории относительности и вероятностной интерпретации квантовой механики, но и содержало нечто неожиданное: информацию о полуполном спине электрона и его магнитном моменте.

Однако электрон в теории Дирака приобретал новую степень свободы — он мог переходить в состояния с отрицательной энергией. Это вы-

глядело настолько непривычно, что другой на месте Дирака мог бы отказаться от сделанного. Однако он избрал иной путь. Поверив в реальность состояний с отрицательной энергией и воспользовавшись принципом Паули, запрещающим двум электронам находиться в одном состоянии, он заполнил электронами все состояния с отрицательными энергиями и назвал такое состояние вакуумом. Позднее учёный придумал и другие названия для подобных



П. Дирак. 1982 г.

ДЕСЯТЬ ВЕЛИЧАЙШИХ

Согласно опросу, проведённому среди учёных журналом «Physics World» («Физический мир», 1999, № 12), издаваемым Британским обществом физиков, десятка величайших физиков в истории такова: 1. Альберт Эйнштейн; 2. Исаак Ньютон; 3. Джеймс Кларк Максвелл; 4. Нильс Бор; 5. Вернер Гейзенберг; 6. Галилео Галилей; 7. Ричард Фейнман; 8. Поль Дирак; 9. Эрвин Шрёдингер; 10. Эрнест Резерфорд.

Физические открытия по степени важности распределены так: теория относительности Эйнштейна, механика Ньютона и квантовая механика. Большинство участников опроса не верят в то, что успех в построении единой теории поля приведёт к концу физике как науке. Десятью величайшими нерешёнными проблемами в физике названы квантовая гравитация, ядерные силы, термоядерный синтез, изменение климата, турбулентность, стеклоподобные материалы, высокотемпературная сверхпроводимость, солнечный магнетизм, сложные системы, физика сознания. Из опрошенных физиков 70 % заявили, что если бы им пришлось выбирать заново, то они стали бы изучать физику.

состояний — «море» или «океан», который «заполнен электронами без предела для величины отрицательной энергии, и потому нет ничего похожего на дно в этом электронном океане». Наблюдать электроны с отрицательной энергией невозможно, потому что они образуют сплошной невидимый фон, на котором и происходят все мировые события.

Когда в «море» Дирака попадает энергичный световой квант, то он может выбить один из бесчисленных «морских» электронов. Освободившееся место — «дырка» — будет вести себя, как частица с положительным зарядом (антиэлектрон). Рождаются сразу две частицы, которые могут быть обнаружены в ходе эксперимента. Антиэлектрон, получивший имя «позитрон», был экспериментально открыт в 1932 г. американским физиком Карлом Дэвидом Андерсоном (1905—1991), который

даже не подозревал о гипотезе Дирака. Затем были открыты антипротон и другие античастицы. Среди фантастов стала популярной тема антивещества, антиматерии.

В 1969 г. Дирак должен был по возрасту оставить свою кафедру в Кембридже. Он принял приглашение Университета штата Флорида (США). Проведя начало своей жизни эмигрантом в Англии, учёный избрал «страну эмигрантов» последним пристанищем. Дирак с готовностью откликнулся на приглашения, объездил полмира с лекциями и выступлениями. До конца дней своих он продолжал раскрывать слушателям красоту физической картины мира XX в., в создании которой принимал самое непосредственное участие. Его любимые воскресные прогулки становились всё короче, силы иссякали. 20 октября 1984 г. Поля Дирака не стало.

Идеи Дирака оказались поразительно плодотворными. Последняя глава его «Принципов квантовой механики» посвящена науке, созданной им за несколько лет до написания книги, — квантовой электродинамике, или квантовой теории взаимодействия электромагнитного поля и вещества. Усилиями теоретиков 40-х гг. XX столетия расчётный аппарат теории был доведён до такого совершенства, что результаты экспериментов предсказываются с точностью до десятого знака после запятой. Фейнман сравнивал такую точность с тем, как если бы расстояние между Лос-Анджелесом и Нью-Йорком измеряли с ошибкой, составляющей толщину человеческого волоса. Когда были открыты сильные и слабые взаимодействия, квантовая теория этих полей строилась во многом по аналогии с квантовой электродинамикой Дирака.

Другое замечательное направление, тоже связанное с именем Дирака, — проблема одиночного магнитного заряда (монополя). Проанализировав возможности электродинамики Максвелла, Дирак в 1931 г. показал, что если бы в удалённом уголке Вселенной мог существовать хотя бы один монополь, тогда стало бы совершенно понятным, почему электрические заряды всех известных частиц строго кратны заряду электрона. Идея Дирака получила продолжение в теории Великого объединения. В 1974 г. молодой советский физик Александр Маркович Поляков (родился в 1945 г.) и голландский физик Герард Хоофт, лауреат Нобелевской премии 1999 г., нашли решение с единичным магнитным зарядом в одном из нелинейных обобщений электродинамики. В этом обобщении монополь превратился в модель протяжённой частицы — солитона. Солитон — один из первых объектов нелинейной динамики. Нелинейность — новое измерение физики и направление развития, которое может превратить её в универсальный язык естествознания, биологии и даже экономики и социологии.

МИР ФИЗИКОВ

**Физическое образование. Сообщество физиков.
Физика и религия**

tions can be derived from a variational principle. For that purpose we consider the Lagrange function

$$L = \int \mathcal{L} d^4x \quad (15)$$

function defined by

$$\mathcal{L} = \frac{1}{2} \dot{\chi}^2 - \frac{1}{2} \chi^2 - \partial_\mu \phi_\alpha - \partial_\mu \phi_\beta v^\mu. \quad (16)$$

where $\mathcal{L}$ is the Lagrangian density (10). In particular for $\mu=0$

and for

The H.

$$H = \int d^3x \quad (25)$$

expression we must consider the ϕ^α and their space derivatives.

$$\phi^\alpha = -\delta H / \delta \pi_\alpha, \quad (26)$$

ent to Eqs. (8), (9), and (20).

The explicit expression is complicated. In the following we shall not be used since we restrict

where χ is the field function

or

or

or

or

or

or

or

or

or

or

or

or

or

or

or

leads then at once to the d

Since

$$\frac{\delta \mathcal{L}}{\delta (\partial^\mu \phi^\alpha)} = -(\partial_\mu \phi_\alpha - \partial_\alpha \phi_\mu) - \chi \partial_\mu \phi^\alpha, \quad (19)$$

with

$$\chi = 0, \quad (20)$$

$$\chi = 0, \quad (21)$$

$$\chi = 0, \quad (22)$$

$$\chi = 0, \quad (23)$$

$$\chi = 0, \quad (24)$$

$$\chi = 0, \quad (25)$$

$$\chi = 0, \quad (26)$$

$$\chi = 0, \quad (27)$$

$$\chi = 0, \quad (28)$$

$$\chi = 0, \quad (29)$$

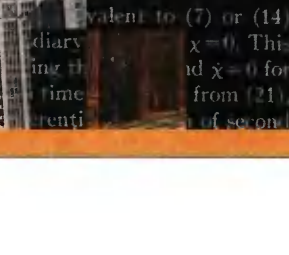
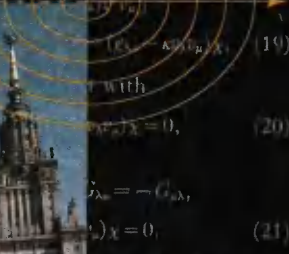
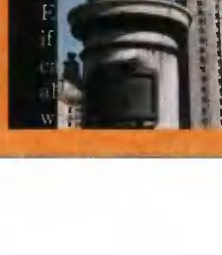
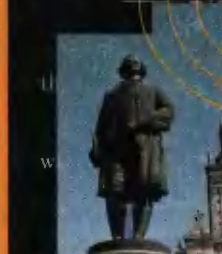
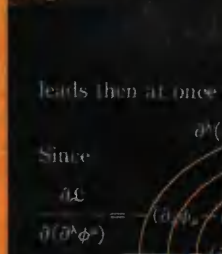
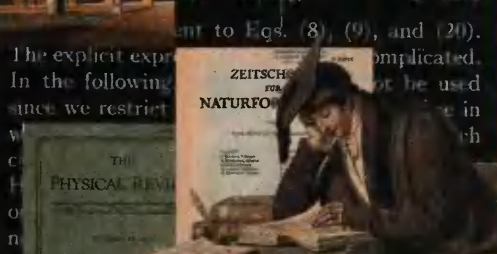
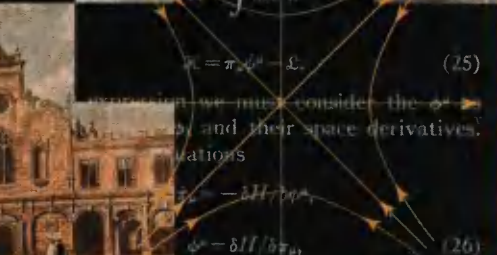
$$\chi = 0, \quad (30)$$

$$\chi = 0, \quad (31)$$

$$\chi = 0, \quad (32)$$

$$\chi = 0, \quad (33)$$

$$\chi = 0, \quad (34)$$





ФИЗИЧЕСКОЕ ОБРАЗОВАНИЕ

Наука и учёные появились давно, но лишь 300 лет назад занятие наукой превратилось в особую профессию со своей системой подготовки и организацией труда. Массовой же эта профессия стала только в XX столетии.

Профессиональная подготовка учёных начинается с университет-

ской скамьи. Закончив университет и получив учёную степень, выпускник приобщается к «учёному сословию». В дальнейшем его научная карьера развивается либо в стенах университетов, где он проходит ряд ступеней, высшая из которых — должность профессора, либо в специализированных лабораториях или институтах.

Сегодня в мире есть несколько самых знаменитых учебных заведений, дающих лучшее, по общему признанию, образование в области физико-математических наук.

ОКСФОРД И КЕМБРИДЖ

Оксфордский университет, старейший в Великобритании, основан в 1163 г. Уже к XIV в. он превратился в главное учебное заведение страны, готовившее учёных и государственных деятелей. В нём зародилась существующая и сейчас система, объединяющая факультеты и колледжи.

Английские студенты на лекции. Юмористическая гравюра. XVIII в.





Студент, поступивший в университет, выбирает факультет, где хочет учиться, а также колледж, в котором будет жить. Но колледж — это не только общежитие. Здесь студент получает личного наставника, который проводит с ним индивидуальные научные

консультации и помогает в житейских вопросах. Студент может пользоваться библиотекой своего колледжа, участвовать в спортивных состязаниях между колледжами и т. д.

В каждом колледже состоят профессора и преподаватели разных

ПРАЗДНИК АРХИМЕДА

Замечательная традиция физиков МГУ — студенческий праздник юмора День рождения Архимеда (позже День физика) — родилась в 1960 г. благодаря постановке шуточной «физической» оперы-капустника «Архимед». Однако физики МГУ считают началом традиции «физического искусства» создание острополюемической подпольной поэмы «Евгений Стромьинкин» (1948—1955 гг., автор Герцен Копылов), гимна физиков «Дубинушка» (1946 г.) и первой «физической» оперы «Дубинушка» (1955 г.). Согласно студенческой легенде, опера «Дубинушка» была написана выпускниками физфака 1955 г. сразу после государственных экзаменов, сыграна на выпускном банкете и там одобрена академиком Львом Ландау. Опера имела огромный успех, её показали физикам Обнинска (работающим на первой в мире АЭС), Дубны (в Объединённом институте ядерных исследований), в клубе Совета министров (ныне театр «Сатирикон»).

Праздник юмора физфака МГУ был учреждён специальным решением комсомольской конференции факультета 1959 г.: «Учредить праздник юмора физфака — День физика. Считать Днём физика день рождения Архимеда. Постановить, что Архимед родился 7 мая 287 года до н. э.». Местом торжеств были выбраны ступени перед входом на факультет — идеальный аналог сцены классического греческого театра. Так появился многотысячный праздник и с ним опера «Архимед» — вершина музыкального творчества физиков того времени. В ней удалось отобразить всё то, чем жили студенты на рубеже 60-х гг.: героическую историю и прозаический быт,



вечную учёбу, поездки на целину и предчувствие грядущей трагедии богов-разрушителей и героев-создателей. Популярность этой любительской оперы-капустника остаётся непревзойдённой — в течение 40 лет её сыграли на сценах разных физических вузов и научных институтов около 200 раз.

Праздник День рождения Архимеда проводился ежегодно в мае и продолжался иногда несколько дней. Обычно его открывал в 13 часов сигнал команды трубачей, а затем начиналось юмористическое представление на ступенях физфака. Костюмированные делегации от разных курсов и аспирантов рассказывали о событиях своей жизни. Отчёты принимал «Михайло Ломоносов», а прибытие «Архимеда» сопровождалось пиротехническими эффектами. Юмористические тексты чередовались со стихами, песнями, танцами, вечными студенческими сценками про экзамены, профессоров и хитрых студентов; нередко разыгрывались полумимовизированные спек-

такли. Праздники эти украшали герои своего времени: в 1960 г. академик Лев Ландау, в 1961 г. великий Нильс Бор, в 1963 г. Герман Титов (наступило время космонавтов).

В конце 60-х гг. в стране начались перемены. Обстановка изменилась, руководство физфака стало тяготиться свободомыслием студентов. В 1969 г. лидеров студии «Архимед» вызвали в партком факультета и предложили её закрыть. С конца 1969 г. студия обособилась в Доме культуры Института атомной энергии имени И. В. Курчатова.

Только в 90-х гг. были опубликованы шедевры «физического искусства», созданные Г. Копыловым — «Четырёхмерная поэма и другие неодномерные произведения» и поэма «Евгений Стромьинкин». В 1993 г. под эгидой Российского физического общества переиздана книга «Физики шутят», ставшая знаменитой далеко за пределами физических кругов и дополненная физфаковским фольклором 50-х гг. Несколько раньше, в начале 80-х, возобновилось и празднование Дня физика.

*Чтим теорий достиженья,
Мысли строгое движенье,
Но в насмешке физик лют —
Он любое приближенье
Не возводит в абсолют.
Он всегда готов трудиться
И лишь тем одним гордиться,
Что ничтожный внёс нюанс
В вечно зыблемый баланс
Парадоксов и традиций,
Ибо физики — сыны
Дисциплины и свободы
И умеют лик природы
Зреть с обратной стороны.*

Александр Кессених



Печать Оксфордского университета и её оттиск. XIII в.

факультетов. Они видятся друг с другом за традиционными ланчами и обедами. Эти дружеские встречи позволяют общаться представителям разных специальностей.

Колледжи гордятся своими достижениями. В одном из них находится самая большая библиотека, другой знаменит командой по гребле, а третий насчитывает среди своих выпускников наибольшее число премьер-министров Великобритании.

Чтобы поступить в университет, нужно пройти конкурс так называемых аппликационных форм. Абитуриент заполняет несколько анкет, где сообщает сведения о своей успеваемости, об окончании средней школы, прикладывает к ним письменную работу на определённую тему. Кроме того, нужно сдать экзамен по английскому языку. Студенты младших курсов выбирают большинство предметов по своему желанию — возможно сочетание занятий по физике и, например, по музыке. Но студент, который хочет стать физиком, должен сдать несколько промежуточных экзаменов по этому предмету и затем экзаме́н на первую научную степень — бакалавра. На старших курсах обучение специализированное. После получения степени бакалавра студент может перейти на вторую университетскую ступень (graduate), где будет готовиться к получению степени магистра, а в дальнейшем и доктора наук. В этом английская система отличается от американской, где выс-

шая научная степень — PhD (Doctor of Philosophy) — приблизительно соответствует российской кандидатской. Докторские степени в США носят почётный характер.

Особенностью подготовки студентов-физиков английских университетов является то, что уже на младших курсах они могут работать в лабораториях. В Оксфордском университете находятся Институт теоретической физики и известная Кларендонская лаборатория. Профессорами-физиками в Оксфорде были такие крупные учёные, как Рудольф Эрнст Пайерлс, Ричард Далитц, Давид тер Хаар.

Вторым по старшинству университетом Англии и вечным соперником Оксфордского является Кембриджский университет, который основан в 1209 г. Сейчас он объединяет 22 колледжа. Самый известный из них — Тринити-колледж, в котором преподавал Исаак Ньютон. Среди прославленных членов колледжа — лорд Джордж Ноэл Гордон Байрон, Фрэнсис Бэкон; физики Джеймс Кларк Максвелл, Майкл Фарадей, Джон Уильям Рэлей, Джозеф Джон Томпсон, Эрнест Резерфорд, Уильям и Лоуренс Брэгги.

Физический факультет Кембриджа всё же лучше, чем в Оксфорде. При нём работает знаменитая Кавендишская лаборатория, основанная в 1871 г.

ВЫСШЕЕ ОБРАЗОВАНИЕ ВО ФРАНЦИИ

Старейший во Франции Парижский университет (основан в 1215 г.) называют Сорбонной в честь Робёра де Сорбонна, духовника короля Людовика IX, который основал здесь в 1257 г. первый коллеж для обучения теологии. Сорбонна просуществовала как единый университет до конца 60-х гг. XX в., когда произошло разделение на 13 независимых университетов.



Мертон-колледж. Оксфорд.



В нескольких из этих университетов есть физические факультеты. При них действуют научные лаборатории, входящие в систему Национального центра научных исследований, где наряду с постоянными сотрудниками работают студенты, аспиранты (graduate students) и Postdocs.

Знаменитые учебные заведения Grandes Ecoles (Высшие школы) появились в период Великой французской революции (1794 г.). Естественные науки и математику изучают в Высшей нормальной и Политехнической школах. Одним из отличий Высших школ от университетов является сложные вступительные экзамены. Высшая нормальная школа особенно славится своими математиками. Среди её выпускников — Эварист Галуа, Эли Картан, Андре Вейль.

Политехническая школа, основанная известными французскими математиками Гаспаром Монжем и Лазаром Никола́ Карно, не только сыграла исключительную роль в подготовке инженеров и учёных Франции, но и повлияла на методы и

структуру их подготовки во всём мире. Главный принцип обучения здесь — сочетание высокого уровня теоретической подготовки студентов с углублённым изучением практических технических предметов. Он стал основой будущих физико-технических институтов широкого профиля, включая такие всемирно известные институты, как Массачусеттский и Калифорнийский технологические институты, Московский физико-технический институт и др.

В Политехнической школе учились крупнейшие учёные Франции: математик, механик и физик Симеон Дени Пуассон, математик Огюстен Луи Коши, физик, математик и философ Жюль Анри Пуанкаре и др.

Ещё одно достижение французской системы образования — Коллеж де Франс, не имеющий аналогов в мире. Он основан в 1530 г. французским королём Франциском I по рекомендации его секретаря Гульенна Бюде. Коллеж де Франс должен был предоставить выдающимся учёным Франции возможность плодотворно



Доктор физики в традиционном облачении. Кембридж. 1815 г.



Эмблема Политехнической школы.



Коллеж де Франс. Старинная гравюра.

работать в избранной ими области и передавать свои знания всем, кто желает их получить. Для этого основали несколько кафедр, на каждую избирался только один учёный (профессор Коллеж де Франс), в функции которого входили чтение лекций по своему выбору и работа в лаборатории. Посещать лекции бесплатно и свободно мог любой желающий. Эта система сохранилась до наших дней

Postdoc — молодой специалист, защитивший диссертацию, но не имеющий постоянного места работы.

Сорбонна.





почти без изменений (лишь увеличилось число кафедр). Быть избранным на кафедру Коллеж де Франс считается во Франции одним из самых высоких отличий, это не менее почётно, чем избрание в Академию наук.

ФИЗИЧЕСКИЕ ЖУРНАЛЫ

Современному физiku, буквально тонущему в море специализированных журналов, издаваемых по всему миру и выходящих не только в традиционной «бумажной» форме, но параллельно и в электронном виде, трудно представить себе, что было время, когда обмен научной информацией происходил степенно и неспешно — в ходе переписки между учёными.

Иное дело сегодня. В период бума, связанного с высокотемпературной проводимостью, сведения о всё новых достижениях передавались по электронным средствам связи с рекордной быстротой: разрыв между получением результата и сообщением о нём составлял дни, а иногда даже часы.

Первый научный журнал под названием «Журнал учёных» стали издавать с 1665 г. в Париже (с 1684 г. — в Амстердаме). Помимо статей на его страницах печатались сообщения особого жанра: кто-либо из учёных бросал вызов своим коллегам, предлагая решить какую-нибудь трудную проблему. С 1682 г. эстафету специализированного физико-математического издания подхватил журнал «Труды учёных», издававшийся в Лейпциге на языке научного общения того времени — латыни.

С 1665 г. под попечительством неперменного секретаря Лондонского королевского общества Генри Ольденбурга начали выходить знаменитые «Философские труды Королевского общества» («Philosophical Transactions»). Почётное место на их страницах заняли публикации по «натуральной философии» — физике. Имела свой печатный орган и молодая Петербургская Академия наук: «Труды Петербургской Академии» также издавались на латыни.

В XVIII в. специализированные физико-математические журналы стали выпускать не только национальные академии наук, но и наиболее передовые учебные заведения. Например, в 1795 г. начал выходить (на французском языке) «Журнал Политехнической школы» — орган одного из лучших высших учебных заведений Франции.

В настоящее время в мире издаётся несколько десятков тысяч физических журналов. Среди них есть журналы-новички и журналы-старожилы. Так, немецкий журнал «Анналы физики» («Annalen der Physik»), на страницах которого печатали свои статьи создатели теории относительности и квантовой механики, выходит с 1799 г.

Помимо многочисленных узкоспециализированных журналов, содержащих информацию, необходимую тем, кто работает в данной области, но не представляющую интереса для «физика из соседней лаборатории», существуют общефизические журналы, рассчитанные на более широкий круг исследователей. Заслуженно высокой международной репутацией пользуется выходящий на английском языке журнал Американского физического общества «Физическое обозрение» («Physical Review»). Однако никаких обзоров в нём не печатают — лишь оригинальные научные статьи. Для обзоров предназначен другой журнал общества — «Обзор современной физики» («Review of Modern Physics»), в котором публикуются статьи, написанные только по заказу редакции. Этот журнал имеет самый высокий индекс цитируемости среди всех физических журналов мира. Оперативная информация в виде кратких сообщений, предваряющих более подробные статьи, публикуется в журнале «Письма в „Физическое обозрение“» («Physical Review Letters»).

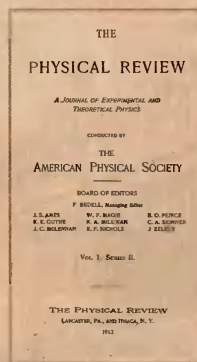
ИНСТИТУТЫ США

В системе образования и организации научно-исследовательских работ в США большую роль, чем в Европе, играют различные государственные

На русском языке с 1918 г. издаётся журнал «Успехи физических наук». Он содержит статьи обзорного и методического характера, рецензии на вышедшие книги по физике и информацию о новинках физической литературы. Как и многие другие русскоязычные издания, «Успехи физических наук» систематически переводятся на английский язык под эгидой Американского физического института. Другой пример общефизического российского журнала — «Журнал экспериментальной и теоретической физики». Оперативную информацию публикуют «Письма в „Журнал экспериментальной и теоретической физики“» и другие «Письма».

Многие традиционные журналы выходят и в электронной версии. Появились также первые чисто электронные издания. Чтобы не утонуть в море журнальной физической литературы, существуют «лошманы» — каталоги и справочники, — как на бумажных носителях, так и электронных.

Тем, кто с детских лет интересуется физикой и математикой, адресован журнал «Квант» (и его американский аналог «Quantum»).





КОНГРЕССЫ, КОНФЕРЕНЦИИ И СЪЕЗДЫ

Кроме форм научного общения и обмена идеями, носящих заочный характер: публикаций в периодической печати, переписки по традиционной («бумажной») или электронной почте, создания сайтов в Интернете, — современные учёные также непосредственно общаются на конгрессах, симпозиумах и семинарах. Помимо пленарных заседаний, работы по секциям и постерных (стендовых) докладов учёные получают возможность лично познакомиться с коллегами, которых прежде знали лишь по публикациям, обсудить в неформальной обстановке насущные проблемы, узнать последние научные новости, расспросить признанного специалиста, — словом, ощутить живое дыхание науки.

Со второй половины XIX в. началась эра международных научных конгрессов. Их проводят статистики (Брюссель, 1853 г.), химики (Карлсруэ, 1860 г.), математики (Цюрих, 1897 г.). В развитии физики XX в. особую роль сыграли проводимые в Брюсселе так называемые Сольвеевские конгрессы, их спонсором был бельгийский химик и предприниматель Эрнест Сольве (1868—1922).

Темой 1-го Сольвеевского конгресса, состоявшегося в 1911 г., был закон излучения чёрного тела, выведенный

Максом Планком с помощью гипотезы о кванте. В работе конгресса приняли участие физики, чьи имена стали гордостью физической науки, представители «старой гвардии» и нового поколения, совместными усилиями создавшие экспериментальную и теоретическую физику новейшего времени, включая самого Планка и Эйнштейна.

Каждый Сольвеевский конгресс посвящён одной из наиболее животрепещущих тем современной физики. Не будет преувеличением сказать, что создание квантовой теории и теории относительности, как, впрочем, рождение и развитие всей новейшей физики, многим обязано этим конгрессам. В настоящее время Сольвеевские конгрессы проводятся международными институтами физики и химии Сольве каждые два года в Брюсселе под патронажем правящего монарха Бельгии.

В России традиция проведения национальных конференций берёт начало со съездов Русского физико-химического общества, созданного в 1878 г., когда объединились Русское химическое общество (основано в 1868 г.) и Русское физическое общество (основано в 1872 г.). Именно съезды Русского физико-химического общества способствовали становлению и развитию в России самостоятельных физических школ.

и негосударственные фонды, система грантов и т. д. Лучшие центры обучения физике в Соединённых Штатах — Гарвардский, Принстонский, Стэнфордский университеты, Массачусетский и Калифорнийский технологические институты.

Старейший университет США — Гарвардский — основан в 1636 г. Серьёзно изучать физику здесь стали с 1726 г., когда англичанин Томас Холлис основал первую кафедру математики и экспериментальной философии. В Гарварде в конце XVIII — начале XIX в. работал граф Бенджамин Румфорд, знаменитый естествоиспытатель и политический деятель, один из первооткрывателей закона сохранения энергии. Среди выпускников и профессоров Гарварда самое большое число американских нобелевских лауреатов по физике: Перси Уильямс Бриджмен, Джулиус Швингер, Эдвард Милс Парселл, Джон Хазбрук ван Флек и др. Сейчас на физическом факультете Гарварда работают нобелевские лауреаты: Шелдон Глэшоу, Николас Бломберген. Ос-

новной метод подготовки исследователей — сочетание лекционных курсов и работа в лабораториях — характерен для всех американских университетов и, конечно, для Гарварда, где имеется несколько первоклассных лабораторий, включая ускоритель и обсерваторию.



Гарвардский университет.



Принстонский университет.
Вторая половина XVIII в.

Вечный конкурент Гарварда — Принстонский университет, основанный в 1746 г. Здесь учились и работали не менее знаменитые учёные, нобелевские лауреаты по физике — Филипп Андерсон, Юджин Пол Вигнер, Джозеф Тейлор-младший. Физический факультет Прин-

стонского университета известен своими исследованиями в области астрофизики, физики плазмы, теоретической физики.

Калифорнийский технологический институт, основанный в 1891 г., обязан своей славой Роберту Эндрюсу Милликену, измерившему заряд электрона, нобелевскому лауреату по физике за 1923 г. Роберт Милликен оказался очень хорошим директором. Он стремился брать на преподавательскую работу знаменитых учёных, гибко реагировать на изменение тематики, привлекать средства меценатов. Эти принципы до сих пор являются основополагающими в организации работы института.

Калифорнийский технологический институт — небольшой (в нём учатся всего 1,5 тыс. студентов), частный многопрофильный инсти-

АМЕРИКАНСКОЕ ФИЗИЧЕСКОЕ ОБЩЕСТВО

Наиболее массовая организация учёных Соединённых Штатов Америки — Американское физическое общество (American Physical Society). Оно насчитывает к 2000 г. около 50 тыс. членов. Это добровольное объединение физиков-профессионалов состоит из преподавателей университетов и колледжей США, работников промышленных лабораторий, сотрудников государственных научных лабораторий (аналоги российских научных центров). Примерно пятая часть членов Общества — учёные из других стран; так что оно в значительной мере носит всемирный характер. Общество существует на членские взносы и добровольные пожертвования. В его уставе записано, что оно преследует исключительно научные и образовательные цели: прогресс и распространение физических знаний. Общество издаёт несколько научных журналов, проводит конференции для обмена новыми идеями и результатами.

Американское физическое общество было основано в 1899 г. как профессиональное товарищество. Оно насчитывало 59 постоянных членов. В 1905 г. в устав Американского физического общества были внесены изменения, согласно которым в его составе помимо постоянных членов (Fellows) появились почётные и рядовые члены. Именно последняя категория и является сейчас наиболее многочисленной частью Общества. В члены Общества могут быть приняты студенты и аспиранты, работающие над магистерскими и докторскими (PhD) диссертациями по физике; учителя и преподаватели физики в школах, кол-

леджах и университетах; лица, получившие профессиональное физическое образование или же способствующие развитию физических знаний.

Для того чтобы стать постоянным членом Общества, нужны солидные оригинальные публикации в известных журналах и рекомендации двух ранее избранных постоянных членов. Окончательно вопрос об избрании решается специально создаваемым для этого комитетом. Постоянные члены составляют в настоящее время 10 % от совокупной численности Общества. За выдающиеся заслуги в физике и перед Обществом присуждается звание почётного члена, однако их не может быть больше десяти.

Американское физическое общество является наиболее крупным коллективным членом Американского физического института (American Institute of Physics), в состав которого входят ещё девять других коллективных членов, например Американская ассоциация преподавателей физики, Американское астрономическое общество. Американский физический институт издаёт с 1948 г. ежемесячный научно-популярный журнал «Physics Today» («Физика сегодня»). Члены Американского физического общества получают этот журнал регулярно за счёт части членского взноса; кроме того, они имеют льготы при подписке на журналы Общества и при поездках на конференции, которые оно проводит.

В 1999 г. Американское физическое общество, один из самых авторитетных профессиональных союзов в мире, отметило свой 100-летний юбилей, встретив его в расцвете сил и возможностей, уверенно глядя в будущее.



тут. Наряду с физическим там имеется сильный биологический отдел, математическая группа и др. Физический департамент института был много лет сильнейшим в США. В 1930 г. здесь работал Альберт Эйнштейн. Долгие годы профессорами были один из основателей квантовой электродинамики — нобелевский лауреат 1965 г.

Ричард Филлипс Фейнман, физик-теоретик Мюррей Гелл-Манн, астрофизик, один из создателей американской ядерной бомбы Эдвард Теллер. Калифорнийский технологический институт тесно сотрудничает с такими гигантами научно-промышленного комплекса США, как Лаборатория имени Лоуренса (исследования по

АКАДЕМИИ

Одной из старейших в мире академий является Лондонское королевское общество, основанное в 1660 г. Сейчас в нём более 1 тыс. человек. Первоначально это был небольшой научный кружок, ставивший своей целью развитие учения Фрэнсиса Бэкона. Указом короля Карла II утверждён устав общества, провозгласивший его задачи — способствовать развитию науки, а также давать консультации королю и правительству по всем научным вопросам и осуществлять соответствующие эксперименты.

Королевское общество было основано как независимая (от государства) научная организация. Оно существует на членские взносы и частные пожертвования. Первым президентом был избран математик Джон Уилкинс. Членами общества являлись почти все знаменитые учёные Англии. Среди его президентов — Исаак Ньютон, Джон Уильям Рэлей, Джозеф Джон Томпсон, Эрнест Резерфорд.

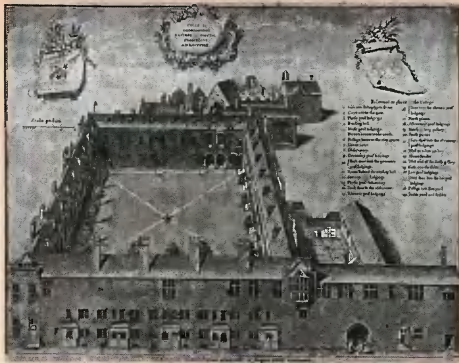
Система выборов в Королевское общество достаточно сложная, но вместе с тем весьма гибкая, что позволяет довольно быстро избрать в члены общества талантливого учёного, сделавшего важное открытие (не более 40 человек в год). Помимо действительных членов Королевское общество выбирает и иностранных — учёных с мировой известностью. Среди физиков из России ими стали Пётр Леонидович Капица, Лев Давидович Ландау, Виталий Лазаревич Гинзбург, Исаак Маркович Халатников.

Французская академия наук была основана в 1667 г. министром финансов Жаном Батистом Кольбером, но вскоре перешла под патронаж короля Людовика XIV. С самого начала академия пользовалась государственными субсидиями, — в частности, члены академии получали жалованье. В 1793 г., в период Великой французской революции, академию закрыли, а несколько её членов, включая знаменитого химика Антуана Лорана Лавуазье, казнили. Академия, но уже под

названием Институт Франции, возродилась в 1798 г. по указу Наполеона I Бонапарта. В дальнейшем при Луи Наполеоне III было восстановлено её прежнее название.

Французская академия наук — элитарное малочисленное (40 человек) учреждение, имеющее сложную двухступенчатую систему выборов. Существуют звания члена-корреспондента и академика. В состав академии входили (и входят) крупнейшие учёные Франции. Иностранцами членами Французской академии наук были или являются Леонид Иванович Седов, Владимир Игоревич Арнольд, Израиль Моисеевич Гельфанд, Александр Маркович Поляков и др.

Национальная академия наук США, основанная в 1863 г., — крупнейшее неправительственное учреждение Соединённых Штатов. В настоящее время число её действительных членов составляет около 1,4 тыс. человек и примерно 250 иностранных членов. Среди них много известных современных российских учёных.



Грэхам-колледж. Гравюра. XVIII в. Здесь во времена Ньютона собиралось Лондонское королевское общество.



Институт Франции.



ФИЗИЧЕСКИЕ ОЛИМПИАДЫ

Изучая физику, приходится постоянно решать задачи, упражнения, примеры. Впоследствии, если физика становится элементом профессии, их количество уменьшается, но резко возрастает сложность. Приходится овладевать математическим аппаратом, учиться составлять модели явлений и процессов, анализировать и предсказывать их поведение. Этому искусству можно научиться. Один из способов — не дома или за партой, а... в соревнованиях.

История физических олимпиад насчитывает не один десяток лет. Их прообразом в России можно считать конкурс по решению задач, проводившийся с 1885 по 1917 г. журналом «Вестник опытной физики и элементарной математики». Первая олимпиада по физике была организована в 1938 г. на физическом факультете Московского университета. Она положила начало ежегодным городским олимпиадам школьников — вначале в Москве и Ленинграде (ныне Санкт-Петербург), а затем в других городах Советского Союза. С 1962 г. проводятся «большие» олимпиады, собирающие школьников из разных городов и регионов.

Первую такую олимпиаду организовал Московский физико-технический институт (Физтех), в ней участвовало более 6 тыс. школьников из 58 городов и посёлков. В том же году прошла первая Всесибирская олимпиада, а в 1963 г. олимпиаду учащихся средних школ провели и Физтех, и Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова. В ней приняли участие школьники из 167 городов европейской части СССР и республик Закавказья. Эти олимпиады были физико-математическими.

С 1964 г. стали проводиться всероссийские олимпиады, а с 1967 г. — всесоюзные. В 1963—1969 гг. олимпиады начинались с заочного тура. Его победители приглашались на следующие, областные туры. После 1970 г.

роль заочного тура взял на себя конкурс по решению задач, проводимый журналом «Квант».

Сейчас во всероссийских олимпиадах принимают участие победители зональных олимпиад. Их организуют в шести регионах России, а также в Москве и Санкт-Петербурге. В зависимости от величины региона в нём может проходить несколько туров (например, в Москве проводятся окружной тур и три городских: первые два — теоретические, третий — экспериментальный).

Победители Всероссийской олимпиады представляют Россию на международных олимпиадах, которые проходят ежегодно с 1967 г. Первая была проведена в Польше, в ней участвовало всего пять стран. Два раза, в 1970 и 1979 гг., международные олимпиады принимала Москва. Сейчас стран-участниц уже более 60, но школьники из России, как прежде школьники из Советского Союза, показывают стабильно высокие результаты и не уезжают без призовых мест. Победители всероссийских и международных олимпиад становятся студентами лучших вузов страны без экзаменов.

Задачи, предлагаемые на олимпиадах, не похожи на обычные задачи из учебника. Конечно, для их решения необходимы знания и навыки, не выходящие за рамки школьной программы; как правило, нет необходимости выполнять сложные и громоздкие вычисления. Однако недостаточно лишь умения использовать широко известный алгоритм, а требуется ясное понимание основных законов физики, способность творчески применять их для объяснения физических явлений, сообразительность, ассоциативное мышление. Приведём в качестве примера задачу с Московской городской олимпиады.

Шерлок Холмс и доктор Ватсон переходили Бейкер-стрит. В это время профессор Мориарти на своём кабриолете выехал из бокового переулка и, не притормаживая, помчался по Бейкер-стрит, чуть не сбив их.

— Холмс, — воскликнул доктор, — этот маньяк катается по Лондону с бешеной скоростью!

— Неправда, Ватсон. Я заметил, что «зайчик» от бокового стекла его авто, освещённого заходящим солнцем, некоторое время оставался вон на том фонарном столбе, в десяти футах от кабриолета. Он не мог ехать быстрее двадцати миль в час!

— Но как Вы догадались, Холмс?!

— Элементарно, Ватсон!..

Воспроизведите рассуждения великого сыщика. Учтите, что 1 фут $\approx 0,3$ м, а 1 миля $\approx 1,6$ км.

Как решать эту задачу? Прежде всего нужно заметить, как движется кабриолет: раз солнечный зайчик остаётся ненадолго на фонарном столбе, значит, стекло автомобиля в движении образует поверхность, фокусирующую на столбе лучи света. Оправданно предположив, что траектория машины является окружностью, вспомним, как связаны для вогнутого зеркала радиус кривизны r и фокусное расстояние f : $f = \frac{r}{2}$. Следовательно,

радиус окружности, по которой движется профессор Мориарти, 20 футов (≈ 6 м). Если автомобиль едет не притормаживая, то из кинематики можно получить соотношение между его скоростью v и центростремительным ускорением a : $a = \frac{v^2}{r}$. Ускорение, сообщаемое ему силой трения (под действием которой автомобиль и поворачивает), не превышает ускорения свободного падения $g \approx 9,8$ м/с². Отсюда получается, что $v < \sqrt{gr} = \sqrt{9,8 \cdot 20 \cdot 0,3} \approx 8$ м/с. Это примерно равно 18 милям в час. Холмс как всегда оказался прав!

Начиная со 2-й Всесоюзной олимпиады (1968 г.) участникам кроме теоретических (вычислительных) задач предлагаются также экспериментальные. Такие задачи бывают, как правило, трёх видов. В них требуется измерить какую-либо величину, построить



экспериментальную зависимость одной величины от другой или разгадать устройство «чёрного ящика» — прибора, схема которого неизвестна. Например, используя лампочку, линейку, булавку и лист бумаги, измерить расстояние между дорожками компакт-диска; выяснить с помощью батарейки, амперметра и вольтметра, что находится внутри коробки с четырьмя выходящими из неё проводами; определить зависимость растяжения резинки сложной формы от приложенной к ней силы, имея в своём распоряжении скотч, линейку, нитки и всего один грузик (ведь нужно ещё придумать, как регулировать растягивающую силу).

С 1994 г. в России кроме традиционных проводится также Соросовская олимпиада школьников на средства Фонда Джорджа Сороса. Физика является одним из четырёх предметов, по которым проходят соревнования. Первый тур — заочный, второй и третий — очные, причём во втором может участвовать каждый желающий, а в третий выходят победители второго тура. Вначале, в 1994 г., в Соросовской олимпиаде приняло участие чуть больше 10 тыс. школьников. Уже через пять лет, в 1999 г., их число превысило 270 тыс. Всего за первые пять лет participa-

ми этих соревнований стало больше 700 тыс. человек.

Помимо олимпиад проводится Турнир юных физиков. Это необычное состязание, в котором противоборствуют команды. Задания известны заранее, но это преимущество компенсируется тем, что решение каждой задачи — самостоятельное научное исследование, в ходе которого требуется провести множество экспериментов, построить модель явления или сконструировать прибор с заданными свойствами.

Создать модель физического явления нелегко. Это можно понять на примере задачи с Турнира городов по физике.

Маленькая полевая мышь съедает за сутки 10 г корма. Оцените, сколько должна съедать мышь, все размеры которой ровно в два раза больше.

Попробуйте выделить физические процессы, существенные для решения. Даже это непростая работа, а ведь, кроме того, нужно понять, как они изменяются в зависимости от роста мыши.

Основа решения — уравнение теплового баланса: мышь должна получать с пищей столько энергии, сколько тратит за сутки на перемещение (в поисках корма) и обогрев (поскольку мышь — существо теплокровное). Потери тепла прямо пропорциональны площади поверхности тела (возра-

стают в 4 раза, как квадрат размеров), а вот с энергией перемещения ситуация несколько сложнее. Работа против сил трения при перемещении на равные отрезки у большой мыши в $2^3 = 8$ раз выше, чем у маленькой, но движется она с другой скоростью: её шаг в 2 раза больше, но на него требуется в $\sqrt{2}$ раз большее время (ведь шаг — это падение с высоты подъёма ноги, которое увеличивается как квадратный корень из высоты). Значит, скорость движения второй мыши будет в $\sqrt{2}$ раз больше, а мощность, необходимая для преодоления сил трения, в $\sqrt{2^7}$ раз выше. Следовательно, ответ лежит между 40 г и $10\sqrt{2^7} \approx 115$ г корма в сутки.

Все эти физические соревнования учат мыслить не по шаблону, не только использовать известные алгоритмы, но и создавать свои там, где нет готового пути решения. Совсем обязательно, чтобы участники олимпиад знали больше остальных школьников, но они более свободно применяют свои знания, которые становятся не просто сводом формул и законов, а рабочим инструментом. Именно в этом особенность работы учёного-исследователя. Олимпиады позволяют развить в себе такие способности.



Физическая олимпиада школьников в МГУ. 1995 г.



Награждение победителей физической олимпиады. МГУ. 1997 г.



НАУЧНЫЕ ШКОЛЫ

В древности научные школы возникали часто, поскольку иных способов передачи знаний и подготовки последователей не существовало. С развитием средств передачи и хранения информации научные школы появлялись, как правило, когда создавались новые научные направления. Известны школа Эрнеста Резерфорда, занимавшаяся экспериментальным изучением атомов и их ядер; копенгагенская школа Нильса Бора, где создали квантовую механику. Лидеры этих школ были не только выдающимися учёными, но и яркими личностями со своеобразным стилем мышления и несомненным педагогическим даром.

В российской физике XIX в. главное место занимали школы А. Г. Столетова и П. Н. Лебедева. После Октября 1917 г. важную роль сыграла школа «папы Иоффе» — так называли ученики Абрама Фёдоровича Иоффе (1880—1960). Питомцами школы были П. А. Капица, Н. Н. Семёнов, А. Д. Ландау, Д. Д. Иваненко, А. П. Александров, Я. И. Френкель. Школа кроме исследовательской работы должна была также координировать создание новых научных центров. В результате образовались Физико-технический институт (ЛФТИ), Медико-биологический и Радиовый институты в Ленинграде и их филиалы в Харькове, Свердловске и Томске. Во главе этих институтов стояли ученики Иоффе.

В послевоенное время ведущие позиции в физике России занимали представители школ Льва Давидовича Ландау (1908—1968) и Николая Николаевича Боголюбова (1909—1992). У каждой из школ были не только свои сторонники, но и «свои» институты, кафедры, журналы. Помимо чисто научного соперничества проявлялись и черты клановости, борьбы за «сферы влияния», за места в Академии наук СССР, что не всегда способствовало прогрессу в науке. В частности, представители одной школы исследователей никогда не выдвигали представителей другой на Нобелевские и подобные престижные премии, даже в тех случаях, когда достижения соперников не подвергались сомнению.

физике высоких энергий), Ливерморская лаборатория (исследования по физике плазмы).

Массачусеттский технологический институт был основан в 1861 г. Сейчас это самый крупный подобный институт в мире. Спектр проводимых в нём исследований огромен: от химии и биологии до самых абстрактных разделов математики, а также экономики. Физический факультет Массачусеттского технологи-

ческого института имеет прекрасную экспериментальную базу. Здесь работали и работают крупнейшие физики-экспериментаторы, лауреаты Нобелевской премии за 1990 г.: Джером Айзек Фридман, Генри Кендалл, Ричард Эдуард Тейлор, экспериментально подтвердившие гипотезу кварковой структуры элементарных частиц, а также крупные теоретики в области физики высоких энергий, среди них — Роман Джакив.

НОБЕЛЕВСКАЯ ПРЕМИЯ — ФЕНОМЕН XX ВЕКА

В истории человечества не было и нет награды, которая по престижности и международному авторитету могла бы сравниться с Нобелевской премией. Начало этому феномену XX столетия было положено на излёте XIX в., 27 ноября 1895 г. Прославленный изобретатель динамита Альфред Бернхард Нобель (1833—1896) подписал в тот день знаменитое завещание.

На производстве динамита, одно из своих многочисленных откры-

тий, Нобель сумел накопить фантастический по тем временам капитал — 33 млн шведских крон. В соответствии с завещанием после передачи около 1,5 млн крон в качестве наследства его родным и близким оставшуюся сумму следовало направить в специально образованный фонд. Доходы от капитала (из процентов, накопившихся за год) «будут выплачиваться в виде премии тем, кто за предшествующий год внёс наибольший вклад в прогресс человечества».

Марка и почтовый блок Коморрских островов, выпущенные в честь 100-летия учреждения Нобелевской премии.





Эти доходы Нобель разделил на пять частей, учредив тем самым пять ежегодных премий: по физике, химии, физиологии и медицине, литературе, а также премию «тому, кто внесёт весомый вклад в сплочение народов, ликвидацию или сокращение численности постоянных армий или в развитие мирных инициатив», позднее названную Нобелевской премией мира. Наделителями премий по физике и химии Нобель назначил Королевскую академию наук Швеции, по физиологии и медицине — Королевский каролингский медико-хирургический институт в Стокгольме. Избрание лауреатов премии по литературе поручалось языковедческой Шведской академии, а премии за мир — специально создаваемому норвежским парламентом (стортингом) комитету из пяти человек.

В 1969 г. Королевский банк Швеции, первый в истории центральный банк мира, в связи с 300-летием основания и в память об Альфреде Нобеле учредил шестую премию — по экономике. Она выплачивается из средств банка в тех же размерах, что и по другим номинациям. Учреждением-наделителем также является Королевская академия наук.

Обнародование последней воли Альфреда Бернхарда Нобеля состоя-

ПРЕМИЯ ДОБРОЙ ВОЛИ

Премия мира — единственная, которая вручается не в Швеции, а в столице Норвегии — Осло. У этой особенности есть своя историческая подоплёка. В 1895 г., когда Альфред Нобель обдумывал завешание, Швеция и Норвегия составляли единое государство — унию (от лат. *unio* — «единение»). Жили оба народа под властью одного монарха недружно. Норвегия стремилась к полной независимости, которой в конце концов добилась десять лет спустя, в 1905 г. Пик взаимного раздражения пришёлся как раз на лето 1895 г. Избежать вооружённого столкновения удалось лишь благодаря уступчивости норвежских парламентариев, отказавшихся от ряда радикальных требований. Желая поощрить миролюбивые инициативы парламента Норвегии (стортинга), Нобель принял решение передать ему права на премию мира.

лось 2 января 1897 г. Оно ошеломило общественность не только громадными суммами, завещанными на формирование премиального фонда. Не менее поразительны были условия присуждения наград. «Моё неприменное требование, — отмечал завещатель, — заключается в том, чтобы при присуждении премии никакого значения не имела национальность претендентов и её получали самые достойные». Так появилась первая по-настоящему международная премия, с которой не могла сравниться никакая другая из существовавших наград — ни по размерам, ни, главное, по широте охвата потенциальных претендентов.

Если во всём мире последнюю волю А. Нобеля встретили с большим интересом и одобрением, то Швеция негодовала. Возмущались и многочисленные родственники. Недовольство высказал даже король Оскар II, характеризуя идеи завешания как сумасбродные. Правительство же Швеции опасалось вывоза из страны иностранными лауреатами немалого капитала, полагавшегося на премии.

Тем не менее в июне 1898 г. удалось достичь согласия с представителями разных ветвей семейства Нобелей. 29 июня 1900 г. король утвердил Устав Нобелевского фонда и правила, регулирующие деятельность комитетов по присуждению премий.

По уставу Нобелевская премия могла быть присуждена только за экспериментальную работу. Хендрик Антон Лоренц получил её как теоретик, и для этого соответствующий пункт устава был срочно дополнен Шведской академией наук.

Из письма Альфреда Нобеля (август 1882 г.): «Каждое новое открытие воздействует на человеческое мышление и меняет его способность к восприятию новых идей. Способствуя распространению знаний, мы способствуем благосостоянию — я имею в виду общее благосостояние, а не личное богатство, — а рост благосостояния благоприятствует ликвидации многих недугов, являющихся наследием тяжёлого прошлого. Научные достижения, распространяющиеся на всё более широкую сферу познания, рождают в нас надежду, что „микробы“ как души, так и тела будут побеждены и что единственная из войн, которую будет вести человечество, — это война с „микробами“».



Альфред Нобель.



Знаменитые лауреаты Нобелевской премии по физике. Марка Коморских островов.

КАК СТАНОВЯТСЯ ЛАУРЕАТАМИ

Пока шло разбирательство, группа шведских академиков трудилась над созданием системы поиска и выбора наиболее достойных претендентов на премию. Главными требованиями помимо указанных завещателем стали полная независимость учреждений-наделителей в их выборе, обязательная конфиденциальность представления и рассмотрения кандидатур, международный характер их выдвижения. В итоге был создан уникаль-

ный механизм награждения, не имеющий аналогов по эффективности и безошибочности выбора.

Основную работу по поиску достойных претендентов осуществляют Нобелевские комитеты. Каждый состоит из пяти членов, выдвинутых учреждениями-наделителями из числа своих членов.

В течение сентября, предшествующего году присуждения премии, Нобелевские комитеты рассылают приглашения конкретным лицам, получающим право предложить своего кандидата. Согласно уставу поми-

ДЕНЬГИ НА НАУКУ

Материальным фундаментом фонда в 1900 г. стал неприкосновенный капитал в 31 млн шведских крон, завещанный Альфредом Нобелем. Из этой суммы по решению правительства был выделен главный денежный фонд в 28 млн крон, проценты с которого должны были идти на выплату пяти премий. Точнее, на все мероприятия, связанные с премиями, направлялось 9/10 ежегодного дохода, а 1/10 — на увеличение капитала главного фонда. Сумма, предусматриваемая на премии, делилась на пять частей. Четверть каждой доли расходовалась на сопутствующие процедуры, а 75 % образовывали денежную составляющую премии, стоимостью золотой медали и т. д.

Неприкосновенный капитал при формировании Нобелевского фонда был обращен в государственные облигации, обеспеченные золотым запасом, или в заёмные средства, гарантировавшиеся недвижимостью. В начале XX в. такое вложение капитала приносило постоянный реальный доход, поскольку уровень цен оставался стабильным на протяжении столетий. Всё изменилось после Первой мировой войны (1914—1918 гг.), когда мир вступил в эпоху глобальных инфляционных потрясений и стоимость ценных бумаг покатилась вниз. В результате сократилась покупательная способность свя-

занных с ними доходов и соответственно реальная ценность денежной составляющей Нобелевской премии.

Стараясь спасти престиж ценового эквивалента премии, шведское правительство предприняло ряд неординарных шагов. В 1946 г. Нобелевский фонд освободили от налога на капитал, а в 1953 г. он получил право вкладывать свои средства в коммерческие предприятия любой страны (акции, недвижимость и т. п.), что ранее запре-

шалось уставом. Вскоре реальная цена неприкосновенного капитала начала быстро восстанавливаться. Вместе с ним стала расти покупательная способность Нобелевской премии и в 1991 г., впервые за 90 лет, достигла уровня 1901 г.

По Уставу Нобелевского фонда, премиальные суммы не должны использоваться с целью извлечения доходов. Однако бывали нарушения. Немецкий физик Йоханнес Штарк (1874—1957), лауреат премии 1919 г., ставший впоследствии приверженцем «арийской физики» и активным сподвижником гитлеровского режима, приобрёл фарфоровую фабрику в основном на деньги от Нобелевской премии. Коллеги по Юрибургскому университету восприняли этот поступок как неэтичный и вынудили Штарка покинуть университет.

Противоположных примеров немало. Вильгельм Конрад Рентген (1845—1923) завещал всю сумму Юрибургскому университету, где сделал своё великое открытие. Якоб Хендрик Вант-Гофф (1852—1911) использовал награжденные деньги для финансирования научной деятельности своих коллег, а Макс фон Лауэ (1879—1960) и Джордж Паджет Томсон (1892—1975) поделились ими с сотрудниками, отдав должное их вкладу в исследования, принёсшие физикам нобелевскую награду...



Нобелевский диплом В. К. Рентгена, первого лауреата Нобелевской премии по физике.



тендентов на премию участвуют не входящие в его состав сотрудники учреждений-наделителей, лауреаты Нобелевской премии по её соответствующему разделу, профессора определённых уставом фонда университетов скандинавских и иных стран. Чтобы обеспечить наибольшее международное представительство, комитет ежегодно может назначать до шести зарубежных университетов, профессора которых получают право предложить своих кандидатов на данный год. И наконец, самый большой контингент образуют видные учёные из разных стран, к которым Нобелевские комитеты обращаются персонально из года в год. Если до Второй мировой войны общее число экспертов по разделам физики и химии не превышало 50—60 человек, то сейчас эта цифра приближается к четырёмзначной. Выдвижение кандидатур на Нобелевскую премию со стороны учреждений или государственных органов полностью исключено по соображениям гуманности. Коллективное выдвижение должно сопровождаться открытым обсуждением и последующим голосованием, а это может травмировать кандидата. Всё происходящее в Нобелевских комитетах является конфиденциальным, архивные сведения рассекречиваются только через 50 лет. Система конфиденциальности в нобелевских учреждениях по разделам науки столь эффективна, что бывали случаи, когда только что избранным лауреатам сообщали об этом по телефону из Стокгольма, а те бросали трубку, подозревая розыгрыш кого-то из приятелей.

Предложения должны поступить в комитеты не позднее 31 января года присуждения премий. Самовыдвижение или выдвижение со стороны близкого человека, например отцом — сына, не учитываются. С февраля по сентябрь зарегистрированные предложения детально

рассматриваются в комитетах с привлечением авторитетных экспертов, причём не только из Швеции.

В процессе отбора поступивших предложений комитеты формируют так называемые малые списки, отсеивая кандидатов, показавшихся экспертам недостаточно серьёзными. Голосование по малому списку проходит в сентябре. Его результат передаётся в учреждение-наделитель, где малый список вновь подвергается детальному анализу. При этом голосование в учреждении-наделителе, которое проходит в начале октября, далеко не всегда совпадает с предложением комитета. Например, в 1908 г. Нобелевский комитет по физике и физическая секция Королевской академии наук Швеции единогласно предложили присудить премию выдающемуся немецкому физико-теоретику Макс Планку (1858—1947), первооткрывателю элементарного кванта действия — новой универсальной постоянной. Академия же в полном составе избрала француза Габриеля Липмана (1845—1921), автора метода цветной фотографии. Планк удостоился награды лишь десять лет спустя.

Таким образом, предугадать результаты окончательного выбора невозможно вплоть до момента оглашения итогов. Это надёжно страхует от предварительной договорённости голосующих или предвзятых оценок, хотя и не предохраняет от редких ошибок.

Кто и где проводит анализ достижений претендентов на премию данного года? Для этой цели мудрые устроители Нобелевского фонда предусмотрели создание при каждом комитете Нобелевского института. Здесь специалисты знакомятся с публикациями претендентов и формируют своё мнение. На экспертизу научных результатов в Стокгольме не жалеют средств. Ежегодно их расходуется даже больше, чем на выплату самой премии.



Лицевая сторона нобелевских медалей.



Медаль по физике.



Медаль по химии.



Медаль по физиологии и медицине.



ВЫБОР — ДЕЛО ТОНКОЕ

С 1901 по 1999 г. лауреатами Нобелевской премии по всем её разделам (включая премию по экономике) стали 682 человека, из них четверо награждены дважды. Это французский физик и химик Мария Склодовская-Кюри (1867—1934), которая получила в 1903 г. премию по физике и в 1911 г. — по химии; американский физик Джон Бардин (1908—1991), лауреат премии по физике за 1956 и 1972 гг.; английский биохимик Фредерик Сенгер (родился в 1918 г.), лауреат премии по химии за 1958 и 1980 гг.; американский физик, химик и общественный деятель Лайнус Карл Полинг (1901—1994), удостоенный в 1954 г. Нобелевской премии по химии и в 1962 г. — премии мира.

Общее число физиков, ставших лауреатами Нобелевской премии, достигло к 1999 г. 158 человек. Из них 67 американцев, 20 англичан, 19 немцев, 11 учёных из Франции, 8 из Голландии, 7 из Советского Союза и т. д. В целом этой премии удостоились граждане 17 стран.

Невольно возникает вопрос, отчего Россия, с её могучим научным потенциалом в области физических знаний, занимает в этом списке столь скромное место, уступая даже крошечной Голландии? Причины тому бывали самые разные.

Нобелевскую премию за открытие радио получил работавший в Англии итальянский изобретатель Гульельмо Маркони (1874—1937) и не получил Александр Степанович Попов (1859—1906), который обнаружил эффект «телеграфирования без проводов» (так именovali радиопередачи на рубеже XIX—XX вв.) несколько раньше Маркони. Дело в том, что в соответствии с уставными требованиями Нобелевская премия может присуждаться только здравствующим лицам. Маркони её удостоился в 1909 г., почти через четыре года после безвременной кончины Попова.

Нечто подобное полвека спустя произошло с российским физиком Сергеем Ивановичем Вавиловым (1891—1951). В 1958 г. советские учёные (Павел Алексеевич Черенков, Игорь Евгеньевич Тамм, Илья Михайлович Франк) получили Нобелевскую премию по физике «за открытие и объяснение эффекта Черенкова — Вавилова». Инициатором же и руководителем экспериментов, принятых в 1934 г., во время которых, собственно, и удалось обнаружить ранее неизвестное излучение света заряженными элементарными частицами при равномерном движении в среде со скоростью, превышающей скорость света в этой среде, был Вавилов. Однако он скончался в 1951 г., и даже выдвижение его кандидатуры было бы неправомочным.

Не менее драматична история награды за открытие комбинационного рассеяния света. В 1930 г. её присудили индийскому физiku Чандрасекхаре Раману (1888—1970) из Калькутты, но не отметили заслуг российских учёных Григория Самуиловича Ландсберга и Леонида Исааковича Мандельштама. 21 февраля 1928 г. они открыли спектральные линии нового явления на кристалле. Раман и его сотрудник Кариаманиккам Кришнан обнаружили их на органических жидкостях на пять дней раньше и незамедлительно, 16 февраля, направили сообщение в научный журнал, который опубликовал его 31 марта. Российские учёные обнародовали свои результаты лишь 13 июля. В итоге первооткрывателем нового явления был признан Раман, а за эффектом закрепилось название «эффект Рамана». Нобелевскому комитету, как и Королевской академии наук, осталось лишь подтвердить этот факт. В истории науки известно немало похожих случаев, происшедших в разных странах.

Не замеченным в Стокгольме оказалось открытие электронного парамагнитного резонанса, сделанное



Премия мира.



Медаль по литературе.



Медаль по экономике.

Автор нобелевской медали — Эрик Линберг. На оборотной стороне выбита строфа «Энеиды» Вергилия: «Inventas vitam juvat excoluisse per artes» (лат. «Содействует обогащению жизни открытиями в области искусств»). В нижней части выбито имя лауреата. На медалях по физике и химии природа показана в виде богини, восстающей из облаков; с рогом изобилия в руках; вуаль на её лице поднимает женщина — олицетворение гения науки.



в 1944 г. будущим академиком Евгением Константиновичем Завойским (1907—1976). Хотя по своей значимости оно не уступает открытиям комбинационного рассеяния света и ядерного магнитного резонанса, удостоенных нобелевских наград.

В том же 1944 г. другой российский физик Владимир Иосифович Векслер (1907—1966) обосновал принцип автофазировки, благодаря которому удалось на два-три порядка поднять предел энергии частиц в ускорителях. Не зная о публикации Векслера, год спустя ту же идею предложил американец Эдвин Маттисон Макмиллан (1907—1991). Оба они выдвигались на Нобелевскую премию, но не получили её (Макмиллан



Король Швеции Густав вручает Нобелевскую премию по физике Макс Борну.

стал нобелевским лауреатом по химии только в 1951 г. за открытие трансурановых элементов).

ПРЕМИИ ПО ФИЗИКЕ

Знаменитый немецкий математик Франц Нейман как-то сказал: «Открытие новой истины само является величайшим счастьем; признание почти ничего не может добавить к этому». Однако признание всё же важно. Наука — это тяжелое, требующее всей жизни занятие, потому для большинства учёных оценка коллегами их труда весьма существенна. Несомненной наградой для учёного является избрание в академию и присуждение научных премий.

Помимо самой знаменитой премии — Нобелевской — есть ещё несколько известных и престижных премий, присуждаемых физикам. Целый ряд высоких наград учредило Американское физическое общество.

Премия Тома Боннера присуждается ежегодно с 1965 г. за выдающиеся эксперименты по ядерной физике, ведущие к пересмотру теоретических представлений. Среди лауреатов американский физик Роберт Ван де Граф (первый ускоритель частиц); американка китайского происхождения Циен Шиунг Ву (экспериментальное подтверждение несохранения чётности в слабых взаимодействиях); рос-

сийские физики Сергей Поликанов и Виктор Струтинский (синтез трансфермиевых элементов).

Премия Оливера Бакли учреждена в 1952 г. за выдающиеся работы в физике конденсированных сред. Ею награждены дважды лауреат Нобелевской премии Джон Бардин и его соавтор по теории сверхпроводимости Джон Роберт Шриффер; «калифорнийский вулкан идей» Филипп Андерсон и многие другие.

Премия Динни Хейнемана учреждена в 1959 г. Фондом Хейнемана за выдающиеся публикации в области математической физики. Среди лауреатов премии почти все лучшие представители теоретической физики второй половины XX в.: автор гипотезы кварков и разработчик квантовой хромодинамики Мюррей Гелл-Манн; сын Нильса Бора и автор оболочечной модели ядра Оге Бор; один из создателей квантовой электродинамики Фриман Дайсон; итальянский физик Тулио Регже; соавтор гипотезы «цвета кварков» японский теоретик Йоширо Намбу; англичане Роджер Пенроуз и Стивен Хокинг; российские математики и физики Людвиг Дмитриевич Фаддеев, Александр Маркович Поляков, Яков Григорьевич Синай, Александр Бори-

сович Замолодчиков; голландский физик Герард Хоофт; американские физики Кеннет Вильсон, Стивен Вайнберг, Джеффри Голдстоун, Мартин Крускал.

Авторитетные премии, учреждённые иными организациями или людьми:

Премия Рикардо Вольфа. Эта премия присуждается за заслуги в области физики, математики, химии, биологии, а также в музыке. Она основана миллионером Рикардо Вольфом и его женой Франсиской в 1978 г. Ею награждены физики Ф. Дайсон, В. Гинзбург, Г. Хоофт, К. Вильсон, Й. Намбу. Многие из них позднее стали и нобелевскими лауреатами.

Медаль Поля Дирака. Она учреждена в 1985 г. в честь Поля Дирака Международным институтом теоретической физики в Триесте. За последние годы премия стала одной из самых почётных наград в области теоретической физики. Среди её лауреатов С. Вайнберг, Р. Фейнман, Н. Боголюбов, А. Поляков.

Премия Фрица Лондона. Это высшая награда в физике низких температур, основанная в честь голландского физика Фрица Лондона (1900—1954). Она вручается ежегодно на международных конгрессах по физике низких температур.



В гитлеровской Германии существовал закон, запрещающий её гражданам получать Нобелевские премии. В 1939 г. Нобелевская премия по химии была присуждена сразу трём немцам: Адольфу Бутенандту, Герхарду Домагу и Рихарду Куну. Всем им пришлось отказаться от премии. После ликвидации нацизма они взяли назад свой отказ и получили в дальнейшем диплом и золотую медаль. Денежный приз в подобных случаях не возвращается.

Вручение Нобелевской премии.



Были и иные случаи. В конце 20-х гг. молодой российский исследователь Дмитрий Владимирович Скобельцын (1892—1990) обнаружил необычное явление. При опытах с камерой Вильсона он первым в мире наблюдал следы позитрона — электрона с положительным зарядом. Однако он не был готов принять феномен за реальность и посчитал его случайным эпизодом. Вторым, кто обратил внимание на такие следы, стал ещё более молодой физик — американец Карл Дэвид Андерсон (1905—1991); произошло это в 1932 г. В противоположность Скобельцыну он не испугался загадочного открытия и оперативно опубликовал результаты. Сенсация, вызванная сообщением Андерсона, завершилась для него Нобелевской премией.

Упущенное открытие имело и на счету Е. К. Завойского. В мае 1941 г. он со своими коллегами впервые в мире наблюдал сигналы ядерного магнитного резонанса (ЯМР), но от публикации воздержался, поскольку теоретики тех лет утверждали, что открыть ЯМР вряд ли возможно. Американские учёные Феликс Блох (1905—1983) и Эдуард Милс Пёрселл (родился в 1912 г.) меньше доверяли теоретическим предсказаниям. Столкнувшись с аналогичным явлением (независимо друг от друга), они разработали метод ЯМР (1946 г.) и в 1952 г. стали лауреатами Нобелевской премии.

ВО СЛАВУ МИРА И НАУКИ

Церемонии вручения Нобелевской премии разработчики Устава Нобелевского фонда решили приурочить к 10 декабря — дню кончины учредителя фонда. Первое вручение награды состоялось в 1901 г. С тех пор эти торжества приобрели большой размах и стали неотъемлемой частью пред рождественских недель шведской столицы. Уже в первых числах декабря Стокгольм начинает жить предстоящими торжествами. Улицы украшают гирляндами разноцветных лампочек, на фасадах многих домов устанавливают ряды плошек с ярко горящими фитилями...

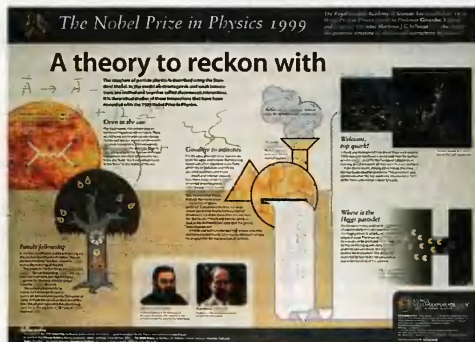
Прибывающим лауреатам, их родственникам, а также приглашённым Нобелевским фондом гостям предоставляют номера в «Гранд-отеле», самой роскошной гостинице города. Над её крышей поднимают государственные флаги Швеции и тех стран, представители которых получают награды.

На церемонии вручения премии все без исключения лауреаты должны быть в традиционной одежде: мужчины — в чёрной фракной паре с белым жилетом, белой рубашкой и такого же цвета бабочкой, а дамы — в тёмном вечернем платье. Для студентов, полноправных и непрерывных участников церемониала, обязательны белая кепочка с чёрным околешем и широкая шёлковая перевязь синего-жёлтого, в тон шведскому флагу, цвета.

День вручения премий особенно труден для его героев, ведь лауреаты не только волнуются, но и опасаются запутаться в ритуальных мелочах. Чтобы этого избежать, утром 10 декабря их везут на репетицию в зал Концерт-халла, где вечером состоится процедура награждения.

Сама церемония начинается в 16 часов. Огромный зал Концерт-халла и его сцена заполнены участниками и зрителями. В центре сце-

Плакат Нобелевского комитета, посвящённый премии по физике. 1999 г.





ны — бюст Альфреда Нобеля. Правее королевских кресел, которые специально по такому случаю привозят из дворца, — столик, на нём разложены комплекты дипломов в красном переплёте и золотых медалей лауреата Нобелевской премии. За столом — представитель Нобелевского фонда, ответственный за передачу королю знаков, олицетворяющих звание лауреата. Рядом находится ассистирующий ему студент.

Ровно в 16 часов раздаётся торжественная мелодия королевского гимна. Зал стоя поёт. Не поёт лишь король. Затем под звуки марша Моцарта появляются лауреаты. Они проходят и рассаживаются по креслам в том порядке, в каком перечислены в завещании разделы премии: впереди лауреаты по физике, потом по химии, физиологии и медицине и по литературе. С 1969 г. шествие замыкают лауреаты премии памяти Нобеля по экономике. До кресел их сопровождают академики, которые будут представлять награждаемых.

Первым на трибуну с бронзовым барельефом Альфреда Нобеля поднимается президент Нобелевского фонда и произносит вступительное слово в память учредителя премий. Читает он, как и последующие ораторы, на шведском языке. Трудностей это не вызывает, поскольку каждому гостю заранее вручаются программа церемонии и английский текст официальных речей.

Процесс награждения начинается с речи представителя Нобелевского комитета по физике. Затем хранитель комплекта наград с дипломом и коробочкой с медалью в руках размеренно приближается к вставшему с кресла королю. Одновременно поднимаются все присутствующие и молча наблюдают за встречным движением короля и лауреата. В момент передачи награды и рукопожатия из правого угла сцены раздаются звуки двоянных фанфар. Для получившего награду это знак раскланивания.



Нобелевская церемония 1996 г.

Лауреат должен твёрдо помнить очердённость поклонов после получения диплома и медали: первый поклон в сторону короля, второй — академиком на сцене и последний — сидящим в зале.

Король медленно возвращается к креслу, а ассистент в кепочке и с лентой через плечо одновременно подходит к шефу, который ждёт его близ королевского кресла. Очередной набор наград снова в руках короля, и процедура повторяется... Первая часть главного дня Нобелевского фестиваля завершается государственным гимном Швеции; на этот раз вместе с подданными поёт и король.

Десять минут езды — и гости здания Ратуши, грандиозного сооружения на оконечности одного из

Иногда число сопровождающих лауреата подвергает устроителей в шок. Своеобразным рекордсменом в этом плане стал получивший в 1976 г.

Нобелевскую премию по физиологии и медицине американец Дэниел Карлтон Гайдзек (родился в 1923 г.), расщипавший природу смертельной болезни куру, которая поражает аборигенов Новой Гвинии. Оставаясь в 53 года холостяком, он усыновил 28 детей с разных тихоокеанских островов и всех их привёз на нобелевское торжество.



Нобелевская церемония. Штандарты академических учреждений Швеции.



Нобелевская церемония 1996 г. Король Швеции Карл XVI Густав и королева Сильвия.

Герольд — так в Средние века в Западной Европе назывался глашатай при дворах королей и крупных феодалов, распорядитель на различных торжествах и рыцарских турнирах.

Для нобелевского банкета отводится огромный (52 × 21 м) Голубой зал Ратуши. Высотой с само здание, это помещение в действительности красного цвета. Проектировщики собирались оформить его в тон дневному свету, льющемуся из сплошной полосы стрельчатых окон под потолком. Но когда возвели стены из специально изготовленного красного кирпича, обнаружили, что они органично вписались в интерьер и не требуют покрытия. Название же, указанное в проекте, решили не менять.

Банкет в честь присуждения Нобелевских премий. 1996 г.



многочисленных скалистых островов, на которых раскинулся Стокгольм. Построенное в начале XX в. в стиле средневековой готической архитектуры, оно, как на машине времени, переносит оказавшихся здесь из неоклассической современности Концерт-халла в рыцарскую эпоху. В Ратуше традиционно проходит нобелевский банкет.

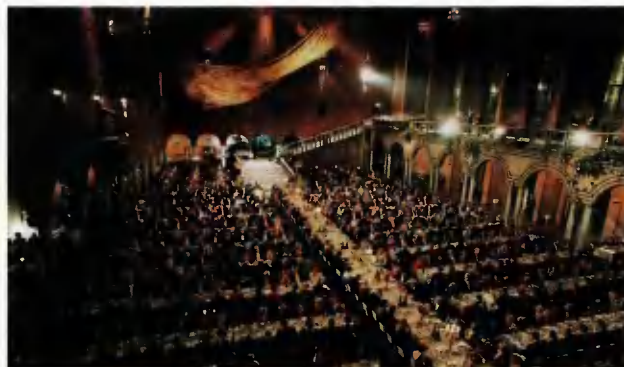
По центру Голубого зала тянется главный банкетный стол на 88 персон. В средней его части — места для короля и королевской семьи, лауреатов Нобелевской премии и их супруг и супругов. Остальные места предусмотрены для руководства Нобелевского фонда и учреждений-наделителей, членов семейства Нобелей, послов стран, граждане которых удостоились наград. По периметру от главного располагаются ещё 65 столов разных размеров. Всего поса-

дочных мест в зале 1268, из них 200 мест отведено студентам.

В 19 часов раздаются фанфары, сменяемые триумфальным маршем. С верхних хоров зала чинно следует процессия. Перед ней — герольд с длинным серебряным шестом. След за ним спускаются король рука об руку с дамой — лауреатом одной из премий; если же среди героев дня представительницы прекрасного пола нет, парой короля становится супруга лауреата Нобелевской премии по физике, названного в решении Королевской академии наук первым. Следом идёт королева, её спутник — президент Нобелевского фонда.

Первый тост — за здоровье короля — произносит президент фонда. Зал стоя поднимает бокалы с шампанским. Второй тост — в память Альфреда Нобеля — провозглашает король. Официальная часть банкета позади, и начинается непринуждённая дегустация экзотических блюд (меню держится в строгом секрете до момента прибытия гостей). К кофе подают вазы с множеством круглых шоколадок в золотистой обёртке, имитирующей лицевую сторону нобелевских медалей. Гости не столько употребляют их по назначению, сколько разбирают на сувениры и прячут в карманы и сумочки. Завершается банкет благодарственными выступлениями лауреатов, по одному от каждого раздела премии. Предваряют их речи звуки фанфар.

А затем до глубокой ночи на втором этаже, в Золотом зале Ратуши, под студенческий оркестр проходят танцы, в которых, конечно, задаёт тон молодёжь. В Галерее принца король и королева за лёгкими ширмами дают аудиенцию нобелевским лауреатам. В витринах выложены дипломы и медали, одолженные для обозрения у их новых владельцев. Дипломы не просто удостоверяющий документ. Их левая внутренняя створка исполняется художником в единственном экземпляре.





На ней символически отображены заслуги лауреата перед наукой или литературой, которые отмечены Нобелевской премией.

Своеобразным венцом праздничной недели является 13 декабря — День святой Люсии, девушки-христианки, принявшей в 304 г. мученическую смерть. С 1927 г., с лёгкой руки одной из стоковых газет, этот день превратился в общешведский праздник, в рамках которого проходят конкурсы красоты, благотворительные мероприятия и т. д.

Нобелевский фонд не упустил возможности использовать вновь возникшую традицию для эффектного завершения пребывания в Стокголь-

ме лауреатов. 13 декабря в восемь часов утра начинается шествие святой Люсии со свитой по номерам «Гранд-отеля», в которых проживают герои фестиваля. Заранее проинструктированные, лауреаты ожидают их прихода под одеялом в постелях, но уже одетые. Святая Люсия как бы приглашает их в народившийся новый день — день возвращения на Землю солнечного света — для новых свершений во имя мира и благоденствия на многострадальной планете, к новым творческим успехам.

Именно об этом мечтал Альфред Нобель, завещая заработанный на динамите огромный капитал для благородных и светлых целей.



Студентка в costume Святой Люсии.

НОБЕЛЕВСКИЙ ДОКЛАД

В соответствии с Уставом Нобелевского фонда (§ 9) каждый лауреат обязан, «если к тому не будет препятствий, в течение шести месяцев, следующих за присуждением премии, прочесть публичную лекцию на тему премированной работы». В последние десятилетия XX в. традиционный день нобелевских лекций — 8 декабря. На лауреатов налагается ещё одно обязательство: до прочтения нобелевского доклада они не вправе где-либо в Швеции выступать с публичными сообщениями.

Нобелевские лекции (доклады) по различным наукам проходят в актовом зале Королевской академии наук, в аудиториях Стокгольмского университета, Политехнического института, Каролинского медико-хирургического института. Вход на лекции свободный, и наряду с почтенными профессорами там можно увидеть студентов и старшеклассников. Лауреаты премии по литературе выступают в парадном зале Шведской академии. Для докладов лауреатов премии мира предоставлен тот же зал в здании городской мэрии Осло, в котором 10 декабря проходит церемония вручения наград.

Если премия присуждена двум или трём учёным, они прочитывают нобелевские доклады на одном заседа-

нии — в той очередности, в какой их фамилии перечислены в вердикте учреждения-наделителя. Каждому выступающему отводится 40 минут, и иногда возникают осложнения с регламентом. Академик И. М. Франк вспоминал, что его коллега по премии 1958 г. академик И. Е. Тамм, увлечшись, ушёл от подготовленного текста и затронул вопросы, выходящие за рамки нобелевской лекции. Спыхватившись, он попросил Франка уступить ему свои 10 минут, чего тот сделать не мог: плохо зная английский язык, он был не в состоянии отвлечься от написанного текста. Тогда всё обошлось благополучно — председательствующий позволил Тамму продолжить интересный доклад.

Готовясь к выступлению, лауреаты стараются довести до аудитории свои самые последние научные достижения. Нильс Бор в 1922 г. даже задержал начало лекции, ожидая из Копенгагена телеграмму, подтверждающую открытие нового элемента — гафния. Так и не дождавшись, вышел на трибуну. Но здесь он пережил ещё одно разочарование — не обнаружил в карманах заранее подготовленных записей с тезисами выступления. Как с юмором сообщили на следующий день газеты, Бора это не обескуражило и вместо одного часа он говорил

два; прервать же популярнейшего в мире учёного никто не посмел.

Выше упоминалось, что тема нобелевского доклада должна соответствовать содержанию работы, которая удостоена премии. Но известно одно исключение, носившее к тому же демонстративный характер. Академик Пётр Леонидович Капица был удостоен премии «за фундаментальные изобретения и открытия в области низких температур», сделанные им в 30—40-х гг. XX в. Уже в 1946 г. английский физик Поль Дирак, лауреат премии 1933 г., впервые номинировал Капицу на Нобелевскую премию. Однако из-за формальных обстоятельств Пётр Леонидович стал её лауреатом только в 1978 г., на 85-м году жизни. Человек достаточно прямой, дабы высказать своё отношение к столь позднему признанию, Капица заявил перед началом доклада в переполненном зале Королевской академии наук: «Я эти работы сделал сорок лет назад и уже не помню о них. Потому расскажу здесь о том, чем занимаюсь сейчас». Зал, отлично понимая намёк, встретил его слова дружными доброжелательными аплодисментами и смехом, а Пётр Леонидович в качестве нобелевского доклада с блеском прочёл лекцию «Плазма и управляемая термоядерная реакция».



ФИЗИКА И РЕЛИГИЯ

ДВА МИРОПОНИМАНИЯ

И предмет религии (Бог и потусторонний мир), и средства, которые верующий использует для связи с ним (вера вместо разума), и способ установления истины (откровение) слишком чужды для физика и непонятны с точки зрения науки. Тем не менее религия играла важную (иногда даже определяющую) роль в формировании естественных наук.

Так, математика возникла как часть религии пифагорейского союза. Она имела целью постижение Божества через гармонию числовых соотношений. Рождение физики тоже состоялось под знаком религиозности — высший разум (Демиург) постигался через осмысление наблюдаемой гармонии мира. Источником этой гармонии — разумного причинного устройства Вселенной, — по Аристотелю, являлся Перводвигатель.

От античности вплоть до Средневековья религия включала и знание, так как удовлетворяла все духовные потребности человека, в том числе потребность в познании мира. Что же в религии способствует развитию естественных наук?

На первый взгляд такой вопрос поставлен некорректно. Возникшая в Новое время наука решительно от-

вергла авторитет Церкви в вопросах познания природы. И вся дальнейшая история науки была её борьбой с Церковью за самоутверждение.

Учёные справедливо отстаивали свои автономные права на свободное исследование природы, не зависящее от власти какого бы то ни было авторитета. Однако при этом сами создатели новой науки все без исключения были людьми религиозными. Стало быть, они боролись не против веры вообще, а против предрассудков слепой веры, против ничем не обоснованных суждений.

Наука и религия изучают совершенно разные предметы и противоречить друг другу в принципе не могут. Но если нет почвы для конфликта, то почему конфликт между учёными и Церковью всё-таки существовал?

Первая причина — взаимная нетерпимость. Католическая церковь проявляла нетерпимость к научному познанию, потому что одну себя считала обладательницей абсолютной истины. Она сожгла на костре Джордано Бруно, заставила отречься Галилео Галилея, предала анафеме Блезз Паскаля. Однако нетерпимость со своей стороны обнаруживали и многие учёные, которые лишь разуму приписывали способность полностью овладеть истиной.

Была и более важная, хотя и скрытая причина конфликта. Борьба между религией и наукой сводилась к борьбе за выбор причинности. Что лежит в основе мира: свободная воля божества или природный механизм?

Различие в типах причинности — естественной и свободной — порождало два принципиально противоположных типа понимания, или объяснения, мира. Понять явление означает объяснить незнакомое через знакомое. Вопрос в том, что принимается за это знакомое. Для физического познания незнакомое и знакомое на-

«Малое знание уводит от Бога, большое знание приводит к Нему».

Франсис Бэкон

«Естествознание нужно человеку для знания, а религия нужна для действия».

Макс Планк

«Первый глоток из сосуда естествознания порождает атеизм, но на дне сосуда нас ожидает Бог».

Вернер Гейзенберг

Анафема — в христианстве церковное проклятие, отлучение от Церкви.





ходятся здесь же, в познаваемом мире. В религиозном же объяснении знакомое (Бог как нечто близкое верующему) лежит за пределами явлений и его нельзя проверить на опыте. Поэтому Галилей и Декарт отвергали так называемые финальные (окончательные) потусторонние причины как ненаучные и были правы с точки зрения создаваемой ими научной картины мира. Галилей отмечал, например, сколь бессмысленно было бы доказывать справедливость учения Коперника с помощью ссылки на финальную причину — волю Бога. Нашему сознанию она недоступна, а Богу одинаково легко было бы вращать Землю вокруг Солнца и, наоборот, Солнце вокруг Земли. Воля Бога оказалась совершенно ненужной для научного описания мира. И когда Наполеон I Бонапарт спросил знаменитого французского астронома, математика и физика Пьера Симона Лапласа, почему в его «Трактате о небесной механике» не упоминается имени Бога, учёный имел полное основание ответить: «В этой гипотезе я не нуждался».

Слова Лапласа выражали истинное отношение науки Нового времени к религии: наука не опровергает религию и не может этого сделать, однако, объясняя явления без ссылок на Бога, она делает религию ненужной, излишней для познания. И сегодня ссылка на Бога означает, с точки зрения физика, отказ от науки и научного метода. Однако это совершенно не означает, что наука делает религию ненужной учёному и вытесняет Бога из его души. Часто бывает наоборот: религиозность способна обогатить творчество учёного, стать для него стимулом. Альберт Эйнштейн, например, говорил, что огромную роль в создании теории гравитации сыграла его вера в гармонию Вселенной.

Не случайно из шести самых великих учёных XVII в. трое — Галилео Галилей, Рене Декарт и Готфрид Вильгельм Лейбниц — были верую-

щими рационалистами, а трое других — Иоганн Кеплер, Исаак Ньютон, Блез Паскаль — были мистиками, веровавшими не только в сотворение мира, но и в Божий промысел в мире.

Сама по себе наука не даёт повода для того, чтобы вытеснить Бога из сознания. Рационализм и само развитие наук не обязательно ведут к атеизму. Но необоснованная безграничная вера в силу разума уже в XVIII в. привела к безверию многих мыслителей. Прошло немногим более 100 лет после выхода в свет «Математических начал натуральной философии» Ньютона, как среди физиков господствующим стал лапласовский принцип всеобщего *детерминизма* (от *лат. determinare* — «определять»), изгнавший из сознания идею Бога. Тотальная (всё определяющая) причинность несовместима со свободой, а значит, с Богом.

Любопытная получилась картина: создатель математической физики Ньютон был глубоко верующим, а ньютоновец Лаплас провозгласил полное безбожие физиков. Опираясь на одну и ту же науку, Ньютон сделал одни выводы относительно Бога, а Лаплас — совершенно противоположные. Из физики как таковой не вытекает, что существует лишь естественная причинность. Лаплас провозгласил всеобщность естественной причинности, но можно было сделать и другой выбор.

Факт остаётся фактом: после Ньютона физика сделала выбор, противоположный ньютоновскому. Она пошла по пути отказа от метафизики и Бога — по пути *позитивизма* (от *лат. positivus* — «положительный»). Позитивизм, как и материализм, признаёт лишь то, что нам дано в мире. Русский религиозный философ Николай Александрович Бердяев (1874—1948) назвал это «рабством человека у мира».

Современная физика отказалась от абсолютизации только одного типа причинности. Общая теория



Известно, что Наполеон резко возразил Лапласу: «Объединяя аргументы... науки и религии, мы придём к Богу, создавшему Природу».

Лаплас. Гравюра. XIX в.





«Над дверью своего деревенского дома Бор прибил подкову, которая, согласно поверью, должна приносить счастье. Увидев подкову, один из посетителей воскликнул: «Неужели такой великий учёный, как вы, может действительно верить, что подкова над дверью приносит удачу?». «Нет, — ответил Бор, — конечно, я не верю. Это предрасудок. Но, вы знаете, говорят, она приносит удачу даже тем, кто в это не верит».

Из книги «Физики шутят»

«В религии язык используется совсем иначе, чем в науке. Язык религии родственен скорее языку поэзии, чем языку науки... Если религии всех эпох говорят образами, символами и парадоксами, то это, видимо, потому, что просто не существует других возможностей охватить ту действительность, которая здесь имеется в виду. Но отсюда вовсе не следует, что она не подлинная действительность».

Нильс Бор

Нильс Бор.



относительности допускает причинные структуры пространства-времени, исключаящие однозначную (детерминистскую) предсказуемость явлений. Такова, например, сингулярность поля в виде чёрной дыры. Известная теорема об «отсутствии волос» у чёрной дыры утверждает, что наблюдатель, находящийся на бесконечности, не может предсказать внутреннее состояние чёрной дыры — даже не может знать ничего о ней, за исключением трёх характеризующих её параметров: массы, момента импульса и заряда.

Другой тип сингулярностей, Большой взрыв, — это событие, для которого космология в принципе не способна отыскать иной причины, кроме финальной. Возникновение Вселенной произошло без предшествовавших ему во времени физических причин, — следовательно, из ничего, и это не противоречит никаким известным физическим законам. Квантовая космология нашла даже механизм возникновения Вселенной: это спонтанная флуктуация эйнштейновского мира. Происходит как бы самопроизвольное рождение Вселенной из вакуума, когда не было ни реальных частиц, ни реальных пространства и времени. Физический вакуум — основной метафизический элемент квантовой космологии — вполне соответствует библейской метафизике творения, хотя и без употребления слова «Бог».

Квантовая теория в свою очередь установила, что процессы в микромире не детерминированы полностью, так что невозможно однозначно предсказать поведение электрона в атоме. Состояние атома определяется лишь ненаблюдаемой ψ -функцией, для наблюдателя же оно изменяется спонтанным (самопроизвольным) образом, или, можно сказать, оно свободно и не обусловлено никакими причинами.

Естественно-научную обусловленность природы и «финалистский»

(целенаправленный) способ её объяснения на основе «свободы воли» Нильс Бор считал хотя и взаимоисключающими способами описания, но тем не менее не противоречащими друг другу. Это парадоксальное утверждение представляет собой знаменитый принцип дополнительности Бора, который он распространил также на философию и религию. Бор любил повторять: «Противоположность верного утверждения — ложное утверждение. Но противоположностью глубокой истины может оказаться другая глубокая истина».

Противоположность науки и религии можно понимать именно как противоположность двух глубоких истин — истины естественной причинности и истины причинности свободной, финальной.

КОСМИЧЕСКАЯ РЕЛИГИЯ

Религиозность — нормальное состояние человека; она иногда берётся в качестве главного признака, выделяющего человека из всего животного мира: человек есть религиозное животное. Однако мотивы, по которым человек приходит к религиозной вере, могут быть весьма различными.

Долгое время в нашей стране господствовала идеология, согласно которой всякая религия зарождалась вследствие страха перед явлениями природы, недоступными пониманию первобытного человека. Религия — это «фантастическое отражение в головах людей тех внешних сил, которые господствуют над ними», писал один из основоположников марксизма Фридрих Энгельс (1820—1895). Однако как возникло в таком случае религиозное сознание учёного, например Ньютона, который сам дал объяснение внешним силам, действующим в природе?

Даже у первобытных народов религиозность порождалась не стра-



РАЗУМНАЯ ВЕРА

Родоначальник немецкой классической философии Иммануил Кант (1724—1804) показал неправомерность претензии разума на полное знание. Прежде всего это относится к предмету веры — Богу. В четвёртой антиномии Кант утверждал: чистый разум не способен разрешить вопрос о Боге — не может ни доказать, ни опровергнуть Его бытие. Немецкий философ «ограничил знание, чтобы освободить место вере», доказав, что есть вопросы, которые навсегда останутся неразрешимыми для чистого разума.

Вера и разум, относящиеся к разным областям духовного мира человека, дополняют друг друга: разум ищет глубокие истины в сфере познания, вера — в сфере свободных деяний и свободного выбора. В силу этого некорректны как попытки разума контролировать веру (доказывая или опровергая, например, бытие Бога и бессмертной души), так и попытки веры заставить человека отказаться от своей разумности. Предмет веры может явиться порождением

безумия — в этом случае речь идёт о религиозном суеверии или религиозном фанатизме.

Вот почему Кант, ограничив притязания разума в области религии, отнюдь не отказывал ему в праве на постижение религии доступными разуму средствами. Разум способен ориентироваться в области веры, хотя и не может постичь всю глубину её истин.

Дело в том, что разум изначально содержит в себе некоторый минимум веры в саму способность человека быть разумным существом. Это естественная вера разума в то, что человек может быть не рабом внешних обстоятельств и своих природно обусловленных прихотей, а хозяином и законодателем своих поступков, т. е. подлинно свободным, моральным существом. Но цель разума — стремление к высшей добродетели — обретает смысл лишь вместе с верой в бесконечное бытие (бессмертие души), а также в абсолютного нравственного законодателя и гаранта осуществления добра (Бога).

Так Кант обосновал религию с точки зрения разума, или «разумную

веру»: это — вера, так как Бог и бессмертие души недоступны опытному познанию, и она — разумная, так как и Бог, и бессмертие вводятся и требуются разумом. Кант не доказал, что религия истинна, но показал, как и на каких условиях она может согласовываться с разумом.

Разум не только открывает человеку моральный закон, но и создаёт мотив (внутреннее побуждение) к вере.



Иммануил Кант. Гравюра.

хом перед природой. Такая точка зрения на происхождение религий, ведущая начало от века Просвещения, давно оставлена после научного исследования древних мифов. Швейцарский психолог, а также исследователь мифологии Карл Густав Юнг (1875—1961) показал, что мифы не являются отражением природы — это отражение души человека, его внутреннего созерцания.

Кант обосновывал веру постулатом (абсолютным нравственным законом), который можно принимать или не принимать. Это дало повод к критике «разумной веры» Канта со стороны русского религиозного философа Владимира Сергеевича Соловьёва (1853—1900). Во впросе обоснования веры Соловьёв придерживался «метафизики внутреннего

опыта» христианского богослова Августина Аврелия (Блаженного Августина; 354—430): действительность Божества не принимается как постулат, а обнаруживается как факт. Бог есть факт внутреннего религиозного опыта. Достоверность Его бытия не требует обосновывать разумом: «Есть Бог в нас, — значит, Он есть» (В. Соловьёв).

Чья мотивация веры убедительнее — Иммануила Канта или Владимира Соловьёва? Аргументация Соловьёва тоже не свободна от недостатков. Она целиком субъективна и потому не обладает обязательной для всех достоверностью. По словам Франсиско де Гойи, «сон разума рождает чудовищ» — откуда мы можем знать, что постигаем внутренним опытом именно Бога, что это не игра

Антиномия (от греч. «анти» — «против» и «номос» — «закон») — противоречие между двумя взаимоисключающими положениями, которые признаются одинаково доказуемыми логическим путём или одинаково опровергаемыми.

«Требование научного обоснования веры, доказательства истинности веры... обнаруживает непонимание самой природы веры... Требование замены веры знанием есть отказ от свободы, оно унижает человека... Знание — принудительно, вера — свободна».

Николай Бердяев



ФИЗИКА И ФИЛОСОФИЯ

«Философия» переводится с греческого языка как «любовь к истине», но какими средствами она добывает истину, если не имеет дела с предметами? Мир один — почему же философские объяснения совершенно не согласуются друг с другом? Получается, что, несмотря на тысячелетние усилия, философия ничего не достигла — не получила общезначимых, всеми признанных результатов.

Между тем в точных науках не спорят об истине — её находят и доказывают. Там не спорят, истинно ли, что сумма углов треугольника равна 180° или что проводник с током создаёт магнитное поле. Такие утверждения доказываются экспериментом либо логикой. После этого их не может отрицать ни один человек, они становятся научным знанием и уже не являются философией. Так, идея сохранения энергии много веков оставалась лишь философским принципом («сохранение субстанции»). После колоссального обоснования этой идеи в XIX в. Юлиусом Майером и Германом Гельмгольцем она перестала быть частью философии — превратилась в физический закон.

Так что любой физик на вопрос, нужна ли ему философия, имел бы веские основания ответить отрицательно, если бы не возникали некоторые сомнения.

ПУТЕВОДИТЕЛЬ ФИЗИКИ

Во-первых, исторически физика появилась в недрах философии как её составная часть: самая древняя физика была создана философом (Аристотелем) и называлась натурфилософией — «философией природы». Даже язык, на котором говорят физики, заимствован ими у философов: именно они ввели такие основополагающие понятия физики, как «энергия», «пространство», «время», «сохраняющаяся величина» («субстанция»).

Физика и математика Нового времени тоже создавались философами. Великие творцы математики и механики Рене Декарт, Готфрид Вильгельм Лейбниц, Блез Паскаль, Исаак Ньютон вошли в историю и как величайшие философы. Ньютон при построении теории тяготения использовал новый философский метод — индукцию, позволившую ему распространить свой закон тяготения на все тела во Вселенной (а мог ли Ньютон все их созерцать?). Дедуктивный метод Декарта стал научным методом математизации физики.

Во-вторых, с философией связаны ключевые моменты физики — научные революции, когда знаний не просто становится больше — они меняются качественно. Как говорят историки науки, происходит принципиальная смена научной парадигмы, или физической картины мира. Смену парадигмы, как правило, вызывает не появление новых, не укладывавшихся в имеющиеся теории фактов: они обычно как-то объясняются господствующей картиной мира. Главным революционизирующим фактором является изменение философского мирозерцания учёных: они по-ино-

му начинают воспринимать мир — в частности, вкладывать новый смысл в прежние понятия.

Именно мистические философские взгляды Ньютона позволили создать механику, соединив то, что представлялось несоединимым грекам, — пустоту и взаимодействие. Выйти из многовекового тупика Ньютону позволило представление об абсолютном пространстве-времени как «чувствилище» Бога. Его геометрия вечно, неизбежно и единственна: это геометрия, построенная Евклидом.

Согласно современной физике, свойства времени и пространства, напротив, относительны — зависят от движения наблюдателя, а также от расположения и движений тел. Геометрия уже не единственна, поэтому прежнее «беспорное» положение о сумме углов треугольника перестало быть таковым. Изменение парадигмы опять началось с новых философских идей: австрийский физик и философ Эрнст Мах потребовал изгнать из физики все ненаблюдаемые вещи, подобные ньютоновскому абсолютному пространству-времени. Эта критика прямо вела к теории относительности.

Переход же к квантовой парадигме был настолько радикальным, что её не принял даже Эйнштейн. До того познание считалось объективным (т. е. отражающим не зависящие от нас свойства внешнего мира). Уравнения квантовой механики, к удивлению самих её создателей, показывали, что свойства микрообъекта зависят от средств наблюдения, а результат эксперимента — от взаимодействия объекта с наблюдателем. Может ли физика давать научное (общеобязательное) знание, если её результаты зависят от того, как и в каких условиях исследуется объект?

Чтобы разрешить эту проблему, Нильс Бор обратился к философии Иммануила Канта, согласно которой познающий субъект не слепо отражает мир, а в значительной мере сам предписывает свойства изучаемой им природы.

Теория познания Иммануила Канта совершила переворот в философии. Он впервые поставил вопрос: как возможно научное знание? Казалось бы, новое знание появляется благодаря накоплению фактов. Но познать все





факты учёный всё равно не может. Научное суждение лишь начинается с отдельных фактов, но само по себе должно быть всеобщим и необходимым. Именно потому, что физический закон — всеобщий, его нельзя вывести из отдельных опытных фактов. Чтобы ум мог производить новое знание, он должен обладать некоей познавательной способностью, не зависящей от случайностей опыта.

Кант заметил, что сам опыт невозможен без присущих нам представлений пространства и времени. Без них мы не могли бы воспринимать предметы и происходящие с ними изменения. Пространство и время даны нашему сознанию до опыта и вне опыта и потому не могут быть получены из ощущений: они априорны (от лат. *a priori* — «изначальное»).

Далее, само познание мира основывается на законе причинности: каждое явление имеет свою причину. Однако откуда нам известен данный закон? Факты опыта показывают лишь то, что одни явления всегда наступают вслед за другими, но это ещё не даёт нам основание устанавливать между ними причинную связь. День всегда следует за ночью — но разве ночь есть причина наступления дня? Закон причинности также является не фактом познания, а его априорным условием, он не вытекает из опыта, а предписывается ему. Причинность вообще существует не в явлениях, а в нашем рассудке. Только он устанавливает причинную связь между наступлением дня и вращением Земли.

Пространство, время и причинность (а также идея сохранения материи) — это и есть наши априорные средства познания природы, своего рода инструментарий ума. Благодаря им опыт представляет собой не хаос ощущений, а нечто упорядоченное и поэтому доступное познанию. Наиболее общие законы природы, по Канту, есть условия возможности опыта. Выявление интеллектуального инструментария, установление границ познавательных возможностей человеческого разума — задачи философии.

МЕТАФИЗИКА В ФИЗИКЕ

Уже древние греки усомнились, таков ли мир на самом деле, каким он кажется, и из этого их сомнения возникла философия. Они стремились найти первосущность (греч. «архэ»), или начало всех вещей, невидимое и неосязаемое, проявлением которого оказывается всё видимое и осязаемое в мире. Таковы были учения Пифагора о числах, Демокрита об атомах, Эмпедокла о четырёх стихиях, Платона о идеях (эйдосах), Аристотеля о Перводвигателе мира.

Эти философы создавали метафизические учения о бытии. Слово «метафизика» в буквальном переводе с греческого означает «после физики» или «по ту сторону физики». Это стремление постичь скрытый от нашего восприятия запредельный мир составляет, говоря словами Канта, «неистребимую потребность» человеческого духа, так как «опыт никогда полностью не удовлетворяет разум».

Физика состоялась как наука именно тогда, когда отказалась решать метафизические задачи (ньютоновское «гипо-

тез не измышляю»). История физики тем не менее показывает, что без метафизических оснований она существовать не может. Уже механика Ньютона не возникла бы как наука без абсолютных пространства и времени.

Теория относительности отбросила абсолютные пространство и время, но вместо них ввела иной абсолют — пространство-время, или четырёхмерный эйнштейновский мир. Этот странный мир с минимым временем, к тому же искривлённый (при описании тяготения), никак не мог возникнуть на основе опыта, ибо он не наблюдаем ни глазом, ни прибором. Не может он быть и априорной формой познания, поскольку пространство и время в нём относительны — зависят от движения тел. Кривизна этого четырёхмерного мира определяет все наблюдаемые движения тел.

Свои невидимые сущности обнаружила и квантовая механика. Состояние частиц в микромире описывается ненаблюдаемой величиной — волновой ψ -функцией. Определяя весь спектр излучения атомов, ψ -функция сама не может быть однозначно определена по наблюдаемым величинам.

Итак, XX век изменил привычные представления о предмете физики. Теперь она проникла в невидимые сущности, не принадлежавшие к миру опыта в прежнем понимании. Физика изучает то, что Кант считал недоступным физическому познанию. Как кривизна R , так и ψ -функция не воспринимаются нашими органами чувств, а равно физическими приборами (которые представляет собой лишь их усовершенствование). Тем не менее эти идеальные ненаблюдаемые сущности определяют всё видимое, материальное в природном мире: от движения планет до излучения атомов.

Изменился смысл самого слова «понимание» в физике. Если раньше «понять» означало «свести неизвестное явление к известному, знакомому», то в современной физике это уже невозможно. Так, наглядное пространственно-временное описание процессов, происходящих в атоме, невозможно в силу квантового соотношения неопределённостей. Эти процессы не являлись более предметами непосредственного опыта классической физики. Но их можно понимать как предметы нового научного познания, включающего также ненаблюдаемые, запредельные элементы. «Атомы — не вещи», — написал Вернер Гейзенберг, и в этом с ним согласился Нильс Бор. Атомы — постигаемая современной физикой метафизическая реальность.

Физик может не быть философом, когда теория уже создана и есть готовая техника для расчёта явлений. Тогда легко забыть о философских началах, потребовавшихся для создания теории, о её метафизических предпосылках, которые к тому же не доступны никаким наблюдениям. Однако в переломные периоды развития физики, при формировании новой парадигмы философский анализ играет ключевую роль. Только изменив взгляд на мир и средства его познания, физик может по-новому переосмыслить известные факты и вывести науку на более высокий уровень.



Мир физиков

Вернер Гейзенберг описал свой диалог со швейцарским физиком Вольфгангом Паули, который спросил:

— Веруешь ли ты в личностного Бога?..

— А можно ли мне сформулировать этот вопрос иначе? — отвечал Гейзенберг. — Например, так: можно ли вообще относиться к центральному порядку вещей или событий так непосредственно, вступать с ним в такую глубокую связь, в какую можно вступать с душой другого человека?.. Если ты согласишься таким вот образом, то я отвечу: да.

нашего подсознания и не заимствованные извне стереотипы? На месте Бога может оказаться любой призрак; отсюда рождаются суеверие и фанатизм.

«Чистая» вера Канта, напротив, может быть передана любому, так как целиком основана на разуме: «Чистая религиозная вера одна только может обосновать всеобщую Церковь, ибо только она является верой разума, которую можно убедительно сообщить каждому...». И кроме того, разум — единственное противоядие против чудовищных идолов веры, фанатизма и мракобесия.

Аргументации веры, несомненной для всех, не существует — каждый находит к ней свой путь. А какой путь к вере наиболее близок физика?

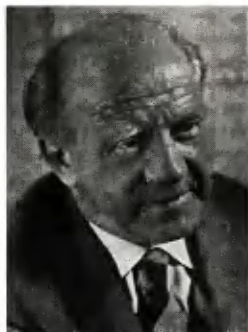
Нет прямого способа определить, что такое Бог. Можно лишь сказать, чем Бог не является: Бог не есть рукотворный идол, Бог не есть огонь, Бог не есть природа... Но, как сказал французский мыслитель Блез Паскаль, можно знать, что Бог есть, даже не зная, что Он такое. Можно постигнуть существование Бога по его творениям — по видимому миру.

Такой путь постижения Бога оказывается вполне типичным для физика, изучающего наблюдаемую природу. Уже древние греки, воспринимавшие мир как гармонично устроенное целое, считали, что «разум правит миром» (Анаксагор), что мир устроен по разумному плану, и этот план математический: «Бог всегда является геометром» (Платон). Готфрид Вильгельм Лейбниц считал, что сама природа своим разумным устройством свидетельствует в пользу идеи о её разумном творце (трактат, в котором он это утверждает, так и называется: «Свидетельство природы против атеистов»). Леонард Эйлер также считал, что открывать математические законы — значит свидетельствовать о неизречённой мудрости Всевышнего: «Наш мир устроен наисовершеннейшим образом



и является творением всеведущего Творца».

Физика XX в. не только не отбросила, но и настойчиво подтвердила это «свидетельство природы против атеистов». Альберт Эйнштейн писал: «Я не могу найти выражения лучше, чем „религия“, для обозначения веры в рациональную природу реальности». Эйнштейн говорит о «вере», а не о знании. Он сказал однажды: самое непонятное для него в мире — то, что мир можно понять. «Мир нашего чувственного опыта познаваем, — утверждал учёный в другом месте. — Сам факт этой познаваемости представляется чудом». Это «чудо» возможно потому, что наша способность мыслить устроена так, что мы можем понять природу. Немецкий физик-теоретик, один из создателей квантовой механики Вернер Гейзенберг, например, определял это так:



Вернер Гейзенберг.



И. Кант.
Рисунок. 1798 г.



РЕЛИГИЯ И ЭТИКА УЧЁНОГО

Учёный живёт не только в сфере природы: как мыслящая личность, он имеет также свободу воли. В сфере природы существуют явления, в сфере свободы — действия. Явления отменить нельзя, но действия можно совершать или не совершать. Тем самым учёный, иногда сам того не желая, встаёт перед моральным выбором — служить добру или злу? Что есть добро, а что зло, — на этот вопрос наука не даст ему ответа, он не входит в её компетенцию. Это вопрос веры, а не знания.

Наука исследует, каков мир; она изучает то, что есть. Религия говорит о том, как должно быть, и, следовательно, о том, как должно нам поступать. В сфере религии устанавливаются ценности, в соответствии с которыми люди формируют себя, вырабатывая своё поведение и определяя поступки. В этом смысле религиозная вера служит человеку как бы компасом, позволяющим ориентироваться в море неизвестного. Вернер

Гейзенберг так и говорит о собственной вере как о «компасе, которым мы должны руководствоваться, отыскивая свой путь в жизни» — в той сфере, где наше знание бессильно.

Выбор веры играет для человека огромную роль: сделанный выбор определяет его отношение к миру и человечеству. В особенности это относится к физику, открытия которого (например, изобретение ядерной или водородной бомбы) могут быть употреблены во зло.

В своё время атеизм сыграл положительную роль — как справедливая реакция против рабской (антропоморфной) идеи Бога. Но это низкое представление о Боге должно быть заменено не безверием, а более высокой идеей Бога. Безверие не может быть постоянным состоянием человека: он всегда религиозен, и на место безверия к нему может прийти худшая вера, например вера в идола, а в более широком смысле он может погрузиться в бездну негативного мироощущения. Таким человеком, не различающим добро и зло,

легко манипулировать, сделать его орудием любого злого дела, даже если это личность с первоклассным интеллектом.

История физики знает примеры выдающихся учёных, лишённых религиозного компаса, чей талант вследствие этого был использован для злых целей. Например, нобелевские лауреаты Йоханнес Штарк и Филипп Эдуард Антон Ленард сознательно служили нацизму. Они говорили об «арийской» истинной физике, отрицали теорию относительности, как еврейскую.



«Те же самые упорядочивающие силы, которые создали природу во всех её формах, ответственны и за строение нашей души, а значит, и наших мыслительных способностей». Можно сказать иначе: научному познанию поддаётся только та Вселенная, которая от начала до конца сотворена свободным Разумом.

Этот особый «естественно-научный» тип религиозности Эйнштейн назвал космическим религиозным чувством. Это именно религиозность: не познание Бога, а уверенность в Его существовании, происходящая, по словам Эйнштейна, из «глубокой эмоциональной уверенности в высшей логической стройности устройства Вселенной». Космическая религия разумна и потому не слепа и не суеверна: она изгоняет призраки и исключает фанатизм. Эта религия возвышенна: «не ведая ни

догм, ни Бога, сотворённого по образу и подобию человека», она вызывала у Эйнштейна такой же «мистический трепет», какой Кант, по его словам, испытывал при сознании морального закона в душе и при созерцании звёздного неба над головой.



«Научное мышление и вера в Бога совершенно несовместимы, если Бог привлекается в качестве „объяснения“ каких-то процессов или явлений. Происхождение жизни, эволюция Вселенной, да и любые другие естественно-научные проблемы являются предметом научного изучения, и шаг за шагом мы узнаём о них всё больше и больше в результате наблюдений, экспериментов и их анализа. Привлекать здесь Бога, сказав, например, что Бог создал живые существа, значит, по существу, капитулировать, отказаться от научного подхода к вопросу о происхождении и эволюции живых организмов...»

Как я убежден, мода пройдёт, многовековой процесс освобождения общества от религии в конце концов, пусть и не очень скоро, победит. Будущее принадлежит не мистике, таинствам и вере, а научному мышлению и научному мировоззрению».

В. Л. Гинзбург



ФИЗИКА НАСТОЯЩАЯ И НЕНАСТОЯЩАЯ

Наверное, ни одна вещь, появившаяся рядом с человеком в XX столетии, не возникла или не совершенствовалась без участия физики. Связь, транспорт, энергетика, компьютеры, медицинская техника... Кроме того, физика обеспечивает понимание мира, в котором мы живём. Успехи физики всеялют в людей веру в разумность и познаваемость мира. Методологические принципы, созданные и проверенные физиками, используются в других областях знания.

Однако физика не только многое даёт обществу, но и немало потребляет. Стоимость современного физического оборудования сравнима с бюджетом целых стран. Причём общество тратит деньги на науку без твёрдых гарантий, лишь с надеждой на полезный результат в будущем. Поэтому в науке не может не быть конкуренции за ресурсы и доверие общества. В конкурентной борьбе участвуют не только представители различных научных направлений, но и деятели так называемой псевдонауки.

МИР ПСЕВДОНАУКИ

Псевдонаука стремится быть похожей на науку, маскируется под неё, но имеет иные цели и методы.

Одна из наиболее распространённых частей псевдофизики рассчитана на получение денег и почёта от государства. Традиционная тема — «сверхоружие». Например, применение телепатии для связи с подводными лодками, образование «окон в атмосфере, через которые прямое космическое излучение выжигает всё живое на поверхности» (это не шутка, а точная цитата). Иногда в симбиозе с псевдоучёными выступают чиновники, от которых зависит распределение бюджетных денег и которые находятся «в доле» с получателями этих денег. Система независимой экспертизы, меньшая идеологизированность и коррумпированность власти мешают развиваться этой части псевдонауки в демократических обществах.

Псевдонауку может питать идеология. В научных дискуссиях иногда принимало участие государство (борьба с генетикой и кибернетикой, теорией относительности и квантовой механикой в СССР). Пользуясь своими «аргументами» — лагерями и тюрьмами, — государство успешно насаждало псевдонауку, искореняя при этом науку подлинную.

Другая часть псевдонауки рассчитана на удовлетворение личных амбиций. Как правило, «научные» изыскания ведутся в области наиболее сложных и фундаментальных проблем. Это может быть и реальная нерешённая задача, и уже решённая (ищется простое, «понятное» решение), и задача, невозможность решения которой уже доказана, и, наконец, задача, сформулированная столь нечётко, что она вообще не может быть названа задачей. Классические примеры: выяснение природы гравитации, доказательство теоремы Ферма, квадратура круга, создание вечного двигателя, выяснение устройства Вселенной.

Есть часть псевдонауки, рассчитанная на коммерческий успех. Традиционная тема для неё — здоровье. Псевдомедицина предлагает многочисленные, совершенно новые и необычайно эффективные способы быстрого и абсолютно безопасного лечения. Для придания наукообразия и убедительности обычно используется физическая терминология, например разговоры о том, в каких местах из стены дома выходят силовые линии. Поскольку школьный курс физики слушатели уже забыли, они не возражают, что силовая линия не может «быть» в одном месте комнаты и «не быть» рядом. Важная составляющая коммерческой псевдонауки — издание множества книг о том, как стать моложе, использовать силу третьего глаза, мгновенно путешествовать по Вселенной, правильно (по меридианам или параллелям) располагать кровати и т. д.

Нередко псевдоучёный — вполне сознающий ситуацию мошенник, современный Остап Бендер, но гораздо менее симпатичный. В других случаях человек очень увлечён своим делом, например строит вечный двигатель, и не осознаёт истинной ситуации. Он реже выступает в прессе, но охотящиеся за сенсациями журналисты сами его разыскивают и с удовольствием пишут о «великом открытии»: «В этом заброшенном сарае не признанный высокомерной официальной наукой гениальный изобретатель и создал свой вечный двигатель, о котором рассказал нашему корреспонденту».

ЛЮДИ И ПСЕВДОНАУКА

Что толкает человека в объятия колдунов в третьем поколении, специалистов по отвороту и привороту, гарантирующих успех в 500 % случаев (это цитата)? Люди особенно охотно верят во всякие чудеса (НЛО, левитацию, мгновенные исцеления) в период неудач — личных или общественных, — когда сложности стоящих перед человеком или обществом задач оказываются выше обычных. Как показывают социологические исследования, на рубеже XX—XXI столетий





по степени интереса к мистике Россия занимает одно из первых мест в мире, далеко обогнав страны Запада.

Впрочем, особого вреда непосредственно от веры в НЛО и растения, которые чувствуют на расстоянии, что их собрались сорвать, нет. Хуже другое — человек, привыкший всё воспринимать некритически, отучившийся думать своей головой, становится лёгкой добычей разных мошенников, которые обещают сделать несметные деньги прямо из воздуха, построить завтра рай на земле или берутся за десять часов научить всему — хоть карате, хоть менеджменту. Непосредственный вред приносит, пожалуй, только псевдомедицина. Тех, кого лечили «сильнейшие колдуны», «магистры и апостолы чёрной и белой магии» и «потомственные ворожеи», порой уже не удаётся спасти врачам.

КАК ОТЛИЧИТЬ НАУКУ ОТ ПСЕВДОНАУКИ?

Сделать это не всегда просто. Некоторые теории, которые сейчас считаются псевдонаукой, в своё время были наукой. Типичные примеры — теории теплорода и мирового эфира, которые позволяли получать провераемые следствия. Однако теории, отвергнутые со временем наукой, изначально не имели характеристик, свойственных псевдонауке, — они не противоречили достигнутому на тот момент уровню знаний, не использовали «учёные слова», не понимая их смысла, не игнорировали уже известные факты и научные результаты. То, что со временем были созданы другие теории, объяснившие большее количество фактов, — нормальный научный процесс.

Другая сторона проблемы в том, что любая новая теория принималась не сразу, сначала могла считаться псевдонаукой, а наиболее революционные, например теория относительности, завоевали признание лишь десятилетия спустя. Но внимательный анализ показывает, что новые теории, выдвинутые в рамках науки, также не имеют отмеченных выше признаков псевдонауки, поскольку они не выдвигаются дилетантами. Если автор новой идеи не включён в научную иерархию, это ещё не означает, что он дилетант. Ведь и Эйнштейн был всего лишь служащим патентного бюро. Дилетантизм — незнание твёрдо установленных фактов, нежелание соотносить свои изыскания с тем, что вообще делается в науке, отсутствие соответствующего образования.

Физика, как и любая наука, создаёт знание о мире, увеличивающееся со временем и существующее не в виде отдельных откровений, а в виде системы связанных утверждений, законов и принципов. Достоверность каждого из них является следствием и причиной достоверности других. Любая новая работа в области физики развивает какие-то результаты ранее выполненных работ (или используя их, или оспаривая). Физическая теория должна дать наиболее простое объяснение экспериментальных данных из всех возможных. Хотя бы потому, что придумать более сложную теорию можно всегда. Любой результат обсуждается и подвергается критике — и чем он новее и оригинальнее, тем

эта критика серьёзнее. Физика позволяет инженерам делать вещи, в работоспособности которых мы убеждаемся каждый день. Всякий раз, когда мы говорим по телефону, слушаем магнитофон или смотрим телевизор, получаем подтверждение законов Ньютона, Ома и теории относительности. И наконец, физика накапливает навыки построения теорий, технологию исследования, аппарат познания, создаёт свой язык и систему образования.

Псевдонаука, удовлетворяющая амбиции её создателей и тягу людей к простому «объяснению» всего на свете, принципиально отличается от науки, хотя во многом ей подражает. В ней тоже пишутся книги, но системы знаний не создаётся. Она создаёт «приборы» и «методы» (например, рамки для поиска воды), но, когда их начинают придирчиво проверять и они не работают, создатели заявляют, что у вас плохая аура или сегодня неподходящий день. В псевдонауке не приняты дискуссии и обсуждение результатов. Дело ведь не в том, чтобы разобратся в вопросе, а в том, чтобы сделать себе рекламу. Один из её принципов — запрет на антирекламу: «Живи и дай жить другим».

Для человека, забывшего школьную программу, наука — это прежде всего много непонятных слов (голография, электрон, квантовое поле, вакуум), а также звания (академик, вице-президент и т. д.). Поэтому псевдонаука использует наукообразные рассуждения, перенасыщенные терминологией, часто с многозначительными ссылками на мнения академиков, экспертов, секретные доклады ЦРУ и КГБ (ФСБ), а для придания внушительности она употребляет много громких титулов. Кто, в конце концов, может помешать человеку назвать себя академиком?

А ВДРУГ ТАМ ДЕЙСТВИТЕЛЬНО ЧТО-ТО ЕСТЬ?

В физике часто бывает, что данные новых измерений «не лезут» в старую теорию. Вопрос в том, о какой именно теории идёт речь и насколько велики расхождения. Если это теория относительности, которая многократно подтверждена экспериментально, то говорить не о чем. Если же обнаружено низкое сопротивление образца, изготовленного из окислов меди и лантана, то это странно (ведь керамика — диэлектрик) и требует тщательной проверки. Но зато те, кто не оставил такой факт без внимания, открыли высокотемпературную сверхпроводимость. Неожиданности в науке бывают; более того, в подобных результатах есть особая прелесть. Однако именно тот результат, от которого замирает сердце, должен проверяться особенно тщательно.

Таким образом, физика, как, впрочем, и вся наука, прежде всего долгий, кропотливый труд. Удовольствие знать, как устроен мир, даром не даётся. И особенно не даётся даром то потрясающее ощущение, которое переживает исследователь, только что узнавший о мире нечто действительно новое, не ведомое ещё никому, кроме него самого.

О космическом религиозном чувстве говорил не один Эйнштейн. По мнению немецкого математика Германа Вейля (1885—1955), физика открывает мыслящему человеку путь к Богу, так как она даёт «видение той безупречной гармонии, которая согласуется с возвышенной причиной». Аналогичным образом отзывались о религии Макс Планк, Нильс Бор, Вернер Гейзенберг.

Эйнштейн неоднократно заявлял, что он верует не в того Бога, который «награждает и карает». Эти слова часто истолковывали в том смысле, что гениальный физик не верил в Бога как в личность, т. е. в живое существо. Эйнштейна поэтому относили к пантеистам, отождествлявшим Бога со Вселенной, а пантеизм, как говорят, лишь вежливая форма атеизма. Однако Эйнштейн восставал лишь против антропоморфной идеи Бога.

ВЫСОКАЯ ЦЕЛЬ ФИЗИКИ

Физика, развиваясь уже много столетий, не имела бы смысла своего развития, если бы перед ней не стояла высокая цель — создание единой научной картины мира. Под этим издавна имелась в виду теория (или, как прежде говорили, система), способная описать всё во Вселенной на основе нескольких законов, из которых многообразие физического мира возможно вывести чисто логически. Об этой цели будущей науки мечтал Лейбниц, считавший, что на пути к ней само человеческое познание приближается к Божественному — к высшему совершенству.

Вначале казалось, что эта задача в принципе решена механической (ньютоновской) картиной мира, пока не выяснилось, что ньютоновская парадигма не охватывает всех явлений, например электромагнитных, после чего её сменила иная, квантово-релятивистская, парадигма. Но физики в большинстве своём сейчас не верят,

что в рамках и этой парадигмы возможна единая теория полей (элементарных частиц). Высокая цель отдаляется всё сильнее и сильнее.

Однако такую же цель — описание мира с помощью единого начала вещей — во все времена ставила метафизика, ещё с древности создавшая для её достижения математику и выработавшая принципы логического мышления. Английский философ, логик и математик Бертран Рассел (1872—1970) определил цель метафизики так: это «попытка охватить мир как целое посредством мышления». Может быть, высокая цель постоянно ускользает от взоров физиков, поскольку она недостижима средствами одной только физики, без принципиально иных методов?

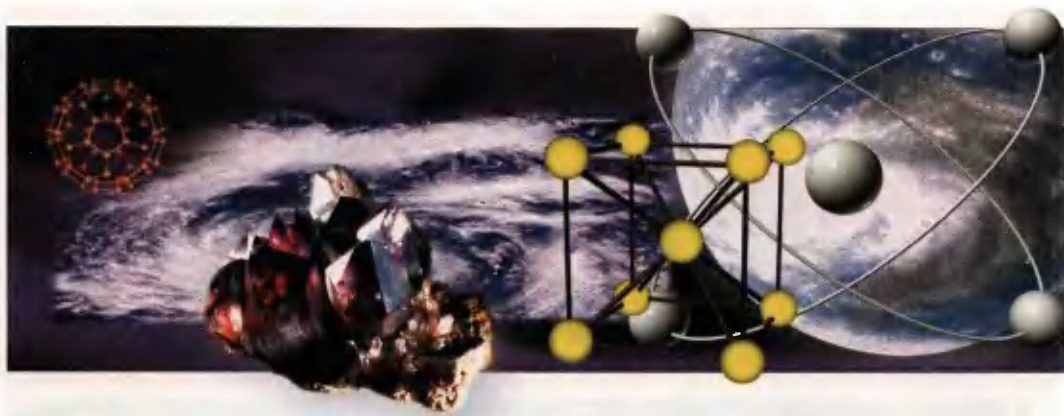
Развитие современной физики свидетельствует, что она уже вступила на путь согласия с метафизикой и религией. Научное понимание мира и религиозное мировоззрение оказались взаимодополняющими и необходимыми друг другу. Возможно, в будущем произойдёт синтез двух глубоких истин — физической и религиозной — во имя создания единой картины мира.

Соединение этих истин приведёт к взаимному обогащению и физики, и религии, о котором говорил знаменитый естествоиспытатель, мыслитель и общественный деятель Владимир Иванович Вернадский (1863—1945): «Рост науки неизбежно вызывает... необычайное расширение границ философского и религиозного сознания... религия и философия, восприняв достигнутые научным мировоззрением данные, всё дальше и дальше расширяют глубокие тайники человеческого сознания».

Так физика и религия, на целые столетия отделённые друг от друга, возвращаются к тому первоначальному состоянию, когда они были неразделимы. Ибо цель у них общая, и она остаётся прежней.

Пантеизм (от *греч.* «пан» — «всё» и «теос» — «бог») — религиозно-философское учение, отождествляющее Бога с природой и рассматривающее природу как воплощение божества.

Антропоморфизм (от *греч.* «антропос» — «человек» и «морфе» — «форма») — представление божества в образе человека.



ПУТЕШЕСТВИЕ В ГЛУБЬ МАТЕРИИ

МИР, В КОТОРОМ МЫ ЖИВЁМ

Стремление постичь тайны времени, пространства и своё место во Вселенной издавна не давало покоя человеку. Вот и сегодня, как отмечает известный писатель-фантаст Е. И. Парнов,



человек снова «стоит на перекрёстке бесконечностей. Одна дорога уводит его в мир галактик, туда, где разлетающееся вещество достигает почти световых скоростей, другая — в микромир с исчезающе малыми масштабами расстояний и длительностей...».

И уже несколько тысячелетий, не зная покоя, человеческая мысль блуждает по этим дорогам. Отправной точкой в её странствиях всегда была Земля. Когда-то и она казалась необозримо большой и граница видимого горизонта считалась краем света. Но в 1521 г. завершилось первое кругосветное плавание португальца Фернана Магеллана, и люди узнали, что их мир измеряется двумя годами путешествия. А ещё через 440 лет российский космонавт Юрий



Алексеевич Гагарин «уменьшил» его до 89 минут! Размеры Земли перестали казаться фантастически большими, и сама она «превратилась» в рядовую планету, обращающуюся вокруг Солнца, путешествующего по бескрайним просторам Вселенной.

РАССТОЯНИЯ

Диаметр нашей планеты составляет около 12 800 км, Солнца — в 109 раз больше. Если представить себе Землю в виде крупинки размером 1 мм, то диаметр Солнца окажется равным примерно 11 см. При этом Земля (в выбранном масштабе) будет двигаться вокруг светила по орбите радиусом чуть меньше 12 м. Диаметр же всей Солнечной системы превысит 900 м!

Выйдем за её пределы. Ближайшая к Солнцу звезда Проксима Кентавра находится от нас на расстоянии, почти в 7 тыс. раз превышающем радиус Солнечной системы. Чтобы преодолеть такой путь, свету требуется более четырёх лет. Если же выразить это расстояние в километрах, получится 14-значное число. В астрономии для измерения столь больших расстояний используется специальная единица, называемая парсеком (пк); $1 \text{ pk} = 3,09 \cdot 10^{13} \text{ км}$. Расстояние до Проксимы Кентавра равно 1,31 pk. Космическая станция, движущаяся с третьей космической скоростью (16,67 км/с), доберётся до неё не ранее чем за 70 тыс. лет! А ведь это наша ближайшая «соседка», остальные звёзды расположены ещё дальше.

В середине XVIII в. первый российский учёный-естествоиспытатель Михаил Васильевич Ломоносов писал:

*Открылась бездна звёзд полна;
Звёздам числа нет, бездне дна.*

Точное количество звёзд во Вселенной действительно не сосчитать. Однако известно, что невооружён-

ным глазом в ясную безлунную ночь над горизонтом можно увидеть около 3 тыс. звёзд. Приблизительно столько же находится под горизонтом. Все они составляют лишь малую часть гигантской звёздной системы, называемой Галактикой. Наша Галактика (Млечный Путь) включает более 200 млрд звёзд, обращающихся вокруг общего центра, находящегося в созвездии Стрельца.

За пределами Млечного Пути простираются триллионы других галактик. Все вместе они образуют Метагалактику. Свет даже ближайшей из них (Малого Магелланова Облака) идёт до нас 170 тыс. лет.

Малое Магелланово Облако — это сравнительно небольшая звёздная система, которая наряду с Большим Магеллановым Облаком относится к спутникам Млечного Пути. Значительно дальше находится Туманность Андромеды — ближайшая из числа похожих на нашу Галактику. Свет от неё идёт до нас около 2 млн лет.

А самые далёкие из известных нам космических объектов находятся от Земли на расстоянии 5000 Мпк. Глядя на них сегодня, мы видим их такими, какими они были около 15 млрд лет назад!

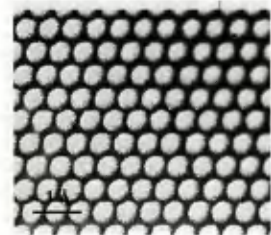
Обратим теперь свой взгляд в обратную сторону — ту, которая уводит нас в глубь материи. «Мир, — писал американский физик Ричард Филлипс Фейнман, — если смотреть на него издали, кажется круглым, гладким, чисто отполированным шариком, но если посмотреть на него вблизи, он оказывается очень сложным: миллиарды крохотных атомов, всевозможные неровности».

Атомы настолько малы, что их нельзя увидеть ни в один оптический микроскоп. По своим размерам (примерно 10^{-10} м) они во столько же раз меньше обыкновенного яблока, во сколько раз яблоко меньше земного шара. А число атомов в яблоке так же велико, как и число звёзд в наблюдаемой Вселенной.



Малое Магелланово облако.

Атомы золота под электронным микроскопом.





Масштабы Вселенной. Сторона каждого последующего квадрата примерно в 10 000 раз больше стороны предыдущего. На последнем квадрате сфера обозначает около 0,01 радиуса наблюдаемой области Вселенной.

Эдвин Пауэлл Хаббл.



Ещё меньше протоны и нейтроны, образующие ядро атома. Если попытаться изобразить атом, в котором ядро имеет вид пятнышка диаметром 1 мм, получится рисунок поперечником 100 м!

Протоны и нейтроны, в свою очередь, тоже имеют сложное строение. Они состоят из частиц, называемых кварками. Кварки, а также лептоны, к которым относится, например, электрон, по сегодняшним представлениям, — самые маленькие частицы материи. Их размеры столь малы, что даже не поддаются определению; известно лишь, что они меньше 10^{-18} м. В теориях, описывающих поведение кварков и лептонов, они рассматриваются как точечные бесструктурные образования.

ВРЕМЕНА

Когда-то Вселенная представлялась людям вечной и неизменной. Одно время так думал даже великий Альберт Эйнштейн. Но в 1929 г. американский астроном Эдвин Пауэлл Хаббл (1889—1953) установил, что Вселенная расширяется: галактики и

их скопления удаляются друг от друга, причём со скоростью, пропорциональной расстоянию между ними. Но если это так, то раньше все галактики располагались ближе друг к другу, чем сейчас. Был, очевидно, и такой момент, когда всё вещество Вселенной находилось в сжатом до бесконечно большой плотности состоянии. Потом оно стало стремительно расширяться, что и происходит до сих пор.

Начало расширения Вселенной в астрономии называется Большим взрывом, а время, прошедшее от Большого взрыва до наших дней, — возрастом Вселенной. По приблизительным оценкам, он составляет около 15 млрд лет.

Что же произошло за это время в нашей Вселенной? Чтобы легче было проследить эволюцию нашего мира во времени, американский астроном Карл Саган (1934 — 1996) придумал любопытный способ изложения космической хронологии. Всю историю Вселенной он описал в масштабе, при котором одной «космической секунде» соответствует 500 реальных земных лет. Продолжительность существования нашего мира «сжалась»



в результате до одного воображаемого «космического года». В соответствии с масштабом, выбранным Саганом, первые люди появились «вечером» последнего дня первого «года» в истории Вселенной. Как ни удивительно, но на тот же день приходится и современные события. Этот день ещё не закончился, до «нового года» осталось около 40 мин. В реальном измерении они истекут через миллион с лишним лет.

Наряду со сверхбольшими интервалами времени, сравнимыми с возрастом Вселенной и даже превышающими его (например, период полураспада изотопа свинца ^{204}Pb составляет $1,4 \cdot 10^{17}$ лет), сегодня наука имеет дело и со сверхмалыми временами, поражающими воображение в не меньшей степени, нежели приведённые выше.

Так, солнечный свет достигает Земли примерно за 8 мин. Период

колебаний напряжения в розетке осветительной сети составляет лишь 0,02 с. Время же, за которое свет от экрана включённого телевизора доходит до человека, расположившегося в 2 м от него, в 3 млн раз меньше! Но и это время, измеряемое миллиардными долями секунды, является огромным по сравнению с периодом жизни элементарных частиц, называемых *резонансами*. Оно составляет порядка 10^{-22} — 10^{-24} с и приблизительно во столько же раз меньше возраста Вселенной, во сколько размер протона уступает размерам наблюдаемой Вселенной.



Карл Саган.

МАССЫ ТЕЛ

Наименьшей массой во Вселенной обладают элементарные частицы. Масса электрона равна $0,9 \cdot 10^{-30}$ кг. Примерно в 1800 раз тяжелее про тон

КОСМИЧЕСКАЯ ХРОНОЛОГИЯ КАРЛА САГАНА

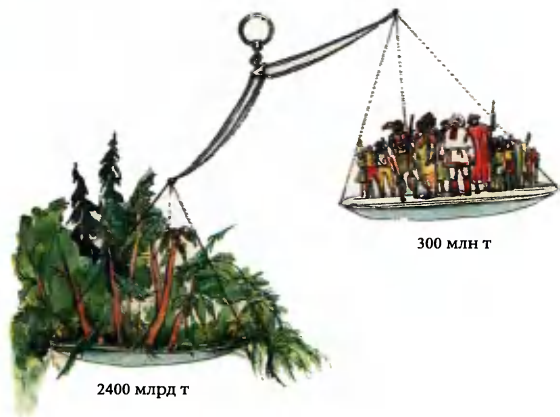
Большой взрыв — 1 января (0^ч 0^{мин} 0^с); образование галактик — 10 января; образование Солнечной системы — 9 сентября; образование Земли — 14 сентября; возникновение жизни на Земле — 25 сентября; появление бактерий и синезелёных водорослей — 9 октября; возникновение фотосинтеза — 12 ноября.

Декабрь

Воскресенье	Понедельник	Вторник	Среда	Четверг	Пятница	Суббота
	1 Возникновение кислородной атмосферы на Земле	2	3	4	5	6
7	8	9	10	11	12	13
14	15 Первые клетки с ядром	16 Первые черви	17	18 Океанический планктон. Трилобиты	19 Первые рыбы	20 Растения колонизируют сушу
21 Первые насекомые. Животные колонизируют сушу	22 Первые амфибии и крылатые насекомые	23 Первые деревья, первые рептилии	24 Первые динозавры	25	26 Первые млекопитающие	27 Первые птицы
28 Первые цветы	29 Первые приматы	30 Первые человекообразные обезьяны	31 Первые люди (22 ч 30 мин) Современные события (23 ч 20 мин)			



Огромный загадочный мир



и нейтрон. В состав Земли входит около $3,5 \cdot 10^{51}$ протонов и нейтронов, а $1,2 \cdot 10^{57}$ этих частиц образуют Солнце. Следовательно, масса Земли приблизительно равна $6 \cdot 10^{24}$ кг, а масса Солнца — $2 \cdot 10^{30}$ кг, т. е. в 300 тыс. раз больше.

Основная масса живого вещества на Земле сосредоточена в растениях — это 2400 млрд т. Что касается людей, их общая масса составляет около 300 млн т.

Масса Галактики равна примерно $1,5 \cdot 10^{11}$ массы Солнца. Чтобы оценить массу всей наблюдаемой Вселенной, следует учесть, что она содержит более 10^{23} звезд. Если считать Солнце типичной звездой средней величины, то масса всего звездного

вещества во Вселенной составит $10^{53} - 10^{54}$ кг.

Приведённые данные стали известны лишь в XX столетии. И хотя они приблизительны, тем не менее, как заметили авторы знаменитого Берклиевского курса физики, «самое замечательное в этих числах — это то, что мы их вообще знаем».

ЧЕЛОВЕК ВО ВСЕЛЕННОЙ

В Средние века люди воспринимали мир как грандиозное представление, главным героем которого был человек. Именно он считался центром Вселенной. «Кто же, — писал французский учёный Анри Пуанкаре, — освободил нас от этой иллюзии? Те, кто показал нам, что Земля есть лишь одна из самых малых планет Солнечной системы и что сама Солнечная система — только незаметная точка в беспредельных пространствах звёздной Вселенной».

Чтобы осознать своё место в ней, человечеству потребовалось не одно тысячелетие. И лишь в XX столетии люди наконец поняли, в каком мире они живут. Открытие пространственно-временной структуры Вселенной явилось величайшим достижением науки.

Ещё в середине XVII в. французский учёный Блез Паскаль писал, что «не огромность мира звёзд вызывает восхищение, а человек, который измерил его». За прошедшие с тех пор столетия наука обогатилась многими новыми открытиями. Однако чем больше мы узнавали о Вселенной, тем скромнее оценивали своё место в ней. Поэтому, когда Альберта Эйнштейна спросили: «Что бы вы ответили на смертном одре на вопрос: успешной или напрасной была прожитая жизнь?» — великий учёный сказал: «Ни на смертном одре, ни до него подобный вопрос не мог меня интересовать... Я ведь только крошечная частица природы».

ФОРМУЛА ЧЕЛОВЕКА

Человек во столько раз больше атома, во сколько раз он сам меньше звезды:

$$\frac{\text{Человек}}{\text{Атом}} = \frac{\text{Звезда}}{\text{Человек}}$$

Отсюда следует, что

$$\text{Человек} = \sqrt{\text{Звезда} \times \text{Атом}}$$

Это и есть формула, определяющая место человека во Вселенной. В соответствии с ней размеры человека представляют собой среднее пропорциональное между размерами звезды и атома.



АТОМЫ. ПОЯВЛЕНИЕ НА СВЕТ

Начала Вселенной — атомы и пустота. Всё же остальное существует лишь во мнении.

Демокрит

«Все люди от природы стремятся к знанию... — писал древнегреческий учёный Аристотель. — Удивление побуждает людей философствовать... Мудрый, насколько это возможно, знает всё, хотя он и не имеет знания о каждом предмете в отдельности... Из наук ближе всего к мудрости та, которая желательна ради неё самой и для познания, нежели та, которая желательна ради извлекаемой из неё пользы... Тот, кто предпочитает знание ради знания, больше всего предпочтёт науку наиболее совершенную, а такова наука о наиболее достойном познания. А наиболее достойны познания первоначала и причины, ибо через них и на их основе познаётся всё остальное».

Родоначальник античной науки, древнегреческий философ Фалёс (около 625 — около 547 до н. э.), такой первоосновой считал воду. Уплотняясь, она образует твёрдые тела, испаряясь — воздух. Всё произошло из воды, говорил Фалес, и Земля плавает на воде, подобно куску дерева.

Впоследствии Эмпедокл из Агригента (около 490 — около 430 до н. э.) довёл количество элементов, являющихся первоначалами мира, до четырёх. При горении дерева, рассуждал он, сначала поднимается дым (воздух), а затем возникает пламя (огонь). При этом на холодной поверхности, оказавшейся рядом с пламенем, образуется влага (вода), а после сгорания дерева остаётся зола (земля). И потому основными элементами мира (или «корнями», как он их называл) следует считать огонь, воздух, воду и землю. К ним Эмпе-

докл добавил два «возбудителя движения» — любовь, стремящуюся соединить разнородные элементы, и вражду, разделяющую их.

Не всех удовлетворяло сведение всего существующего к проявлению четырёх стихий. Является ли образующая мир материя непрерывной? Существует ли пустота, где нет никакой материи? Не состоят ли и эти четыре стихии из каких-то первичных сущностей? Что получится, если делить, например, ту же воду на всё более и более мелкие капли? Будет ли такое деление бесконечным или, дойдя до какой-либо мельчайшей частицы, мы уже не сможем далее продолжить его? Над этими вопросами размышляло не одно поколение философов.

В V в. до н. э. древнегреческим учёным Левкиппом, а затем его учеником из города Абдера (Фракия) Демокритом (около 460 — 371 до н. э.) была выдвинута *атомистическая гипотеза*. В соответствии с ней всё в мире состоит из атомов, различающихся своей формой, порядком и ориентацией в теле; между атомами находится пустота.

По легенде, идея о существовании атомов возникла у её автора, когда он разрезал яблоко. До каких пор можно рассекать яблоко на части? Мысль о том, что существует предел такого деления, и побудила назвать мельчайшие (далее уже неделимые) частицы материи *атомами* (в буквальном переводе с языка древних греков слово «атом» означает «неразрезаемый», «нерассекаемый»).

Развивая атомистические идеи Левкиппа, Демокрит создал всеобъемлющую научную систему, включающую в себя учение о космосе, теорию познания, логику, этику, математику, биологию и психологию. Согласно его учению, в природе существуют лишь два начала —



Левкипп.
Гравюра. XVIII в.

Не телесные силы и не деньги делают людей счастливыми, но правота и многосторонняя мудрость.

Ни искусство, ни мудрость не могут быть достигнуты, если им не учиться.

Если не можешь признать похвалы заслуженными, то считай их лестью.

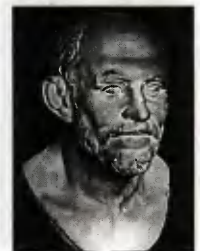
Совершающий несправедливость несчастнее несправедливо страдающего.

Дружба одного разумного человека дороже дружбы всех неразумных.

Лучше изобличать свои собственные ошибки, чем чужие.

Из высказываний Демокрита

Демокрит. Римская копия с греческого оригинала. II в. до н. э.





Эпикур.
Гравюра. XVIII в.

«Но хотя нет у Вселенной конца, но ведь даже мельчайшие вещи из бесконечных частей состоять одинаково будут».

Анаксагор

пустота и атомы. Атомы обладают различными выступами, углублениями и крючками, позволяющими им сцепляться друг с другом и тем самым образовывать устойчивые соединения. Философ был настолько убеждённым атомистом, что даже человеческую душу и богов представлял в виде комбинаций атомов.

Последователем Левкиппа и Демокрита был Эпикур (341—270 до н. э.). Их учение о существовании мельчайших неделимых частиц противоречило другой идее — идее о бесконечной делимости материи философа Анаксагора (около 500—428 до н. э.) из города Клазомены в Малой Азии. Аргументы в пользу атомистического учения можно найти в знаменитой поэме древнеримского поэта и философа Тита Лукреция Кара (I в. до н. э.) «О природе вещей».

Удивительна судьба атомистической гипотезы! Уже через несколько десятилетий после смерти Демокрита она была подвергнута серьёзной критике со стороны Аристотеля из Стагиры (384—322 до н. э.). Если атомы — это мельчайшие и неделимые частицы, то как они могут отличаться друг от друга? Разве можно говорить о форме и ориентации того, что не имеет частей? «У неделимого, — подчёркивает Аристотель, — нет ни края, ни какой-либо другой части». Впрочем, отмечает философ, не правы и те, кто верит в бесконечную делимость материи. Ибо что останется после такого

деления? Не имеющие размеров точки? Но это — «ничто». «Значит, — пишет Аристотель, — ничего не осталось бы и тело уничтожилось бы, превратившись в [нечто] бестелесное. И тогда оно вновь могло бы возникнуть или из точек, или вообще из ничего. Но разве это возможно?.. Ведь хотя бы даже все точки сложились вместе, всё равно они не составили бы никакой величины».

Согласно Аристотелю, основу мира составляет некая первичная материя. Она непрерывна: ни атомов, ни пустоты в ней не существует. Первичная материя может принимать форму какой-либо из четырёх стихий — огня, воздуха, воды или земли. Вступая во всевозможные соединения, они образуют различные вещества.

Впоследствии Католическая церковь превратила учение Аристотеля в догму, в которую следовало лишь слепо верить, не пытаясь что-либо менять. В XI в. кардинал Пётр Дамиани (1007—1072) объявил науку «служанкой теологии». Существование атомов не укладывалось в систему религиозных представлений о мире (если Бог построен из атомов, то кто и когда создал атомы?), и о мельчайших частицах материи надолго забыли.

«Мы были свидетелями гибели учёных, — писал в XI в. персидский и таджикский поэт и естествоиспытатель Омар Хайям (настоящее имя Гиясаддин Абу-ль-Фатх Омар ибн Ибрахим; около 1048 — после





«ВЫСЛУШАЙ ТО, ЧТО СКАЖУ...»

В своей поэме «О природе вещей» Тит Лукреций Кар предсказал не только атомы и их движение, но и брауновское движение частиц.

За основание тут мы берём положение такое:
Из ничего не творится ничто по божественной воле...
Надо добавить ещё: на тела основные природа
Всё разлагает опять и в ничто ничего не приводит.
Ибо, коль вещи во всех частях своих были бы смертны,
То и внезапно из глаз исчезали б они, погибая;
Не было б вовсе нужды и в какой-нибудь силе, могущей
Их по частям разорвать и все связи меж ними расторгнуть...
Если ж в течение всего миновавшего ранее века
Были тела, из каких состоит этот мир, обновляясь,
То, несомненно, они обладают бессмертной природой...
Выслушай то, что скажу, и ты сам, несомненно, признаешь,
Что существуют тела, которых мы видеть не можем.
Ветер, во-первых, морей неистово волны бичует,
Рушит громады судов и небесные тучи разносит...
Мощные валит столбы, неприступные горные выси...
Стало быть, ветры — тела, но только не зримые нами...
Раз и по свойствам они, и по действиям могут сравниться
С водами мощными рек, обладающих видимым телом...
Ведь осязать, как и быть осязаемым, тело лишь может.
И, наконец, на морском берегу, разбивающем волны,
Платье сыреет всегда, а на солнце вися, оно сохнет;
Видеть, однако, нельзя, как влага на нём оседает,
Да и не видно того, как она исчезает от зноя.
Значит, дробится вода на такие мельчайшие части,
Что недоступны они совершенно для нашего глаза.
Так и кольцо изнутри, что долгое время на пальце
Носится, из году в год становится тоньше и тоньше...
Нам очевидно, что вещь от стирания становится меньше,
Но отделение тел, из неё каждый миг уходящих,
Нашим глазам усмотреть запретила природа ревниво...
Но не заполнено всё веществом и не держится тесно
Сплоченным с разных сторон: в вещах пустота существует...
Без пустоты нигде вещам невозможно бы вовсе
Двигаться было...
Значит, везде пустота, очевидно, сменяется телом,
Ибо ни полноты нет совершенной нигде во Вселенной,
Ни пустоты...
Если не будет, затем, ничего наименьшего, будет
Из бесконечных частей состоять и мельчайшее тело:
У половины всегда найдётся своя половина,
И для деления нигде не окажется вовсе предела.
Чем отличишь ты тогда наименьшую вещь от Вселенной?..
Часто имеет ещё большое значение, с какими
И в положении каком войдут в сочетание те же
Первоначала и как они двигаться будут взаимно.
Те же начала собой образуют ведь небо и землю,
Солнце, потоки, моря, деревья, плоды и животных.

Но и смешения их, и движения в разном различны.
Даже и в наших стихах постоянно, как можешь заметить,
Множество слов состоит из множества букв однородных,
Но и стихи, и слова, как ты непременно признаешь,
Разнятся между собой и по смыслу, и также по звуку.
Видишь, как буквы сильны лишь одним изменением порядка.
Что же до первоначал, то они ещё больше имеют
Средств для того, чтоб из них возникали различные вещи...
Здесь не должно вызывать удивленья в тебе, что в то время
Как обретаются все в движении первоначала,
Их совокупность для нас пребывает в полном покое, —
Если того не считать, что движется собственным телом, —
Ибо лежит далеко за пределами нашего чувства
Вся природа начал. Поэтому, раз недоступны
Нашему зренью они, то от нас и движения их скрыты.
Даже и то ведь, что мы способны увидеть, скрывает
Часто движенья свои на далёком от нас расстоянии:
Часто по склону холма густорунные овцы пасутся...
Всё это издали нам представляется слившимся вместе,
Будто бы белым пятном неподвижным на склоне зелёном...
Если же думаешь ты, что стать неподвижно способны
Первоначала вещей и затем возродить в них движенье,
Бродишь от истины ты далеко в заблужденье глубоком.
Ведь, в пустоте находясь и витая по ней, неизбежно
Первоначала вещей уносятся собственным весом
Или толчками других. И часто, в движеньи столкнувшись
Вместе, одни от других они в сторону прядают сразу...
Те, у которых тесней их взаимная сплоченность, мало
И на ничтожные лишь расстояния праядая порознь,
Сложностью самых фигур своих спутаны будучи цепко,
Мощные корни камней и тела образуют железа
Стойкого, так же, как всё остальное подобного рода.
Прочие, в малом числе в пустоте необъятной витая,
Прядают прочь далёко и далёко назад отбегают
На промежуток большой. Из них составляется редкий
Воздух, и солнечный свет они нам доставляют блестящий...
Образ того, что сейчас описано мной, и явленное
Это пред нами всегда и на наших глазах происходит.
Вот посмотри: всякий раз, когда солнечный свет проникает
В наши жилища и мрак прорезает своими лучами,
Множество маленьких тел в пустоте, ты увидишь, мелькая,
Мечутся взад и вперёд в лучистом сиянии света...
Знай же: идёт от начал всеобщее это блужданье.
Первоначала вещей сначала движутся сами,
Следом за ними тела из малейшего их сочетанья,
Близкие, как бы сказать, по силам к началам первичным,
Скрыто от них получая толчки, начинают стремиться,
Сами к движенью затем понуждая тела покружнее.
Так, исходя от начал, движение мало-помалу
Наших касается чувств, и становится видимым также
Нам и в пылинках оно, что движется в солнечном свете,
Хоть незаметны толчки, от которых оно происходит...
Так о великих вещах помогают составить понятие
Малые вещи, пути намечая для их постиженья.



САМОЕ ВАЖНОЕ СООБЩЕНИЕ

Если бы в результате какой-то мировой катастрофы все накопленные научные знания оказались уничтоженными и к грядущим поколениям живых существ перешла бы только одна фраза, то какое утверждение, составленное из наименьшего количества слов, принесло бы наибольшую информацию? Я считаю, что это — атомная гипотеза (можете называть её не гипотезой, а фактом, но это ничего не меняет): все тела состоят из атомов — маленьких телец, которые находятся в непрерывном движении, притягиваются на небольшом расстоянии, но отталкиваются, если одно из них плотнее прижать к другому. В одной этой фразе... содержится невероятное количество информации о мире, стоит лишь приложить к ней немного воображения и чуть соображения.

(Из книги «Фейнмановские лекции по физике».)



Пьер Гассенди.

1122), — от которых осталась малочисленная, но многострадальная кучка людей. Суровость судьбы в эти времена препятствует им всецело отдаться совершенствованию и углублению своей науки. Большая часть из тех, кто в настоящее время имеет вид учёных, одевает истину ложью и, не выходя в науке за пределы подделки и лицемерия, использует тот запас знаний, которыми они обладают, только для низменных, плотских целей».

Лишь в XIII и XIV вв. вновь появляются отдельные сторонники атомизма. Например, французский учёный Никола́ из Отреку́ра (около 1300 — после 1350) считал, что в явлениях природы нет ничего, кроме движения, соединения и разъединения атомов. Но и он в 1347 г. был вынужден публично отречься от своих взглядов, а его сочинение, осуждённое Церковью, было публично сожжено.

Потребовалось ещё 300 лет, прежде чем наконец появился учебник «Наставления физики» (1638 г.) Иоганна Шперлинга (1603—1658), в котором решительно утверждалось: «Учение об атомах не столь ужасно, как это кажется многим. Позорной язвой нашего века являются осмеяние, освистание, осуждение всего, о чём не сразу можно высказать своё

мнение... Ничего не стоит сказать, что Эпикур бредил, что Демокрит безумствовал, что древние были дураки».

В начале XVII в. французский учёный Пьер Гассенди (1592—1655) для обозначения частицы, состоящей из нескольких атомов, впервые вводит термин «молекула» (что в переводе с латинского означает «маленькая масса»). Атомно-молекулярные представления начинают привлекать внимание химиков и физиков. Однако до реабилитации Демокрита было ещё далеко: Церковь упорно придерживалась взглядов Аристотеля и карала каждого инакомыслящего.

Летом 1624 г. группа французских учёных решила организовать в Париже публичный диспут, на котором предполагалось подвергнуть учение Аристотеля резкой критике. 14-й тезис подготовленной программы возрождал атомистическую гипотезу. Однако этому диспуту не суждено было состояться. В назначенный день одного из его устроителей, де Клава, арестовали, а другому, Виллону, пришлось скрыться. Остальным участникам диспута было предписано покинуть Париж в 24 часа. При этом французский парламент принял постановление, по которому организа-



Атомистические идеи развивались и древними мыслителями Индии. Задолго до Демокрита философ Канада (Пожиратель Частиц) в VII в. до н. э. создал учение вайшешика, изложенное в афоризмах «Вайшешика-сутра», в котором основным было понятие атома. Как говорил Канада, «о существовании атомов мы узнаём не восприятием, а рассуждением».



ция подобной полемики и распространение учения об атомах впредь запрещались под страхом смертной казни.

Прошло ещё почти 100 лет, прежде чем идеи о мельчайших частицах вещества стал развивать Михаил Васильевич Ломоносов (1711—1765). Различая два вида «нечувствительных частиц» материи, он даёт им названия «элементы» (равные понятию «атом») и «корпускулы» (равные понятию «молекула»). По Ломоносову, «элемент есть часть тела, не состоящая из каких-либо других меньших и отличных между собою тел»; «корпускула есть собрание элементов в одну небольшую массу».

Но в наибольшей степени вторым рождением атомов человечество обязано английскому учёному Джону Дальтону (1766—1844), который впервые предпринял попытку количественного описания их свойств. Именно им было введено понятие атомного веса и составлена первая таблица атомных весов различных химических элементов.

Но тот же Дальтон ввёл в химию представление о «сложных атомах», а итальянский физик и химик Лоренцо Романо Амедео Карло Авогадро Кваренья эди Черрето (1776—1856) — понятие об «элементарных молекулах». Возникшая путаница в понятиях и отсутствие единой общепринятой терминологии стали затруднять дальнейшее развитие химии. Важную роль в уточнении используемых понятий сыграл Международный химический конгресс в немецком городе Карлсруэ, собравший в 1860 г. 140 учёных из разных стран. После блестящего и «воодушевлённого» (по словам Дмитрия Ивановича Менделеева) доклада итальянского химика Станислао Каничцаро (1826—1910) конгресс путём голосования принял решение о различии понятий «атом» и «молекула», раз и навсегда покончив с существовавшей ранее путаницей.

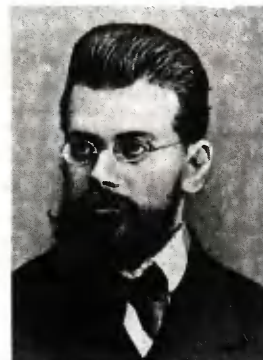


Между тем многие учёные и после этого продолжали считать атомы и молекулы не реально существующими частицами, а лишь рабочими гипотезами, придуманными ради удобства. Например, немецкий физикохимик Вильгельм Фридрих Оствальд (1853—1932) утверждал, что «атомы будут существовать только в пыли библиотек». Другой известный учёный, австрийский физик и философ Эрнст Мах (1838—1916), на все доводы в пользу существования атомов обычно отвечал: «А вы видели хотя бы один атом?».

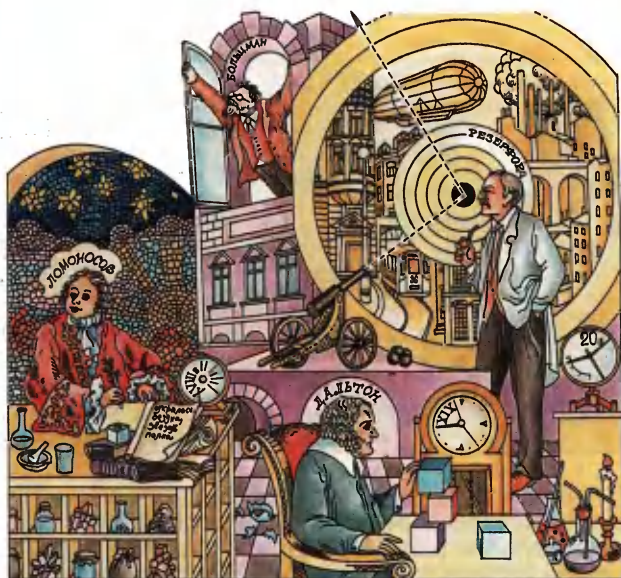
Иной точки зрения придерживался австрийский физик-теоретик Людвиг Больцман (1844—1906). Несмотря на дружбу с Оствальдом и огромное уважение, которое он испытывал к Маху, сам Больцман, в отличие от них, был страстным и убеждённым сторонником атомно-молекулярного учения и много сделал для его развития. Однажды во время обсуждения атомистической теории в Венской академии наук он вдруг услышал, как Мах лаконично заметил: «Я не верю в существование атомов». «От этого высказывания, — вспоминал впоследствии Людвиг Больцман, — у меня голова пошла кругом...»



Вильгельм Фридрих Оствальд.



Людвиг Больцман.



Учёный не дожид до того времени, когда были осуществлены решающие опыты, неопровержимо доказавшие реальность существования атомов. Он тяжело переживал разногласия с

коллегами-современниками и, в частности, поэтому в 1906 г. покончил с собой. «То, на что жалуется поэт, — писал Больцман, — верно и для теоретика: творения его написаны кровью его сердца, и высшая мудрость граничит с высшим безумием».

Сегодня никто уже не сомневается в существовании атомов, однако реально существующие атомы оказались совсем не такими, какими их представлял Демокрит. Уже Больцман по этому поводу писал: «В неделимость атома не верит в настоящее время ни один физик».

Однако установить истинную структуру атома удалось лишь спустя пять лет после его смерти, когда на основе продолжительных и кропотливых экспериментов английский физик Эрнест Резерфорд (1871—1937) пришёл к выводу, что атом представляет собой положительно заряженное ядро, окружённое электронной оболочкой.

Обнаружение этой структуры ознаменовало третье рождение атома. Так из умозрительной гипотезы он превратился в реальную и осязаемую единицу материи.

ОТ АТОМОВ К МОЛЕКУЛАМ

«Атомы бесчисленны по величине и по множеству, носятся же они во Вселенной, кружась в вихре, и таким образом рождается всё сложное: огонь, вода, воздух, земля».

Демокрит

Означает ли многообразие веществ, существующих в природе, что и число различных видов атомов также бесконечно велико?

«В мире существует бесконечное число атомов... Атомы обладают бесконечным числом форм. Число форм бесконечно, потому что в природе нет оснований, чтобы оно было ограничено определённым значением, чтобы оно было таким, а не иным». Так, по свидетельству философа Симплиция (VI в.), отвечал на этот вопрос Левкипп, а вслед за ним его друг и ученик Демокрит.

Однако уже Аристотель заметил, что для объяснения наблюдаемых явлений не обязательно допускать существование бесконечного числа различных атомов, ибо и на основе их «ограниченного числа можно было доказать всё то же самое».

Здесь Аристотель оказался прав. В настоящее время известно, что число различных атомов действительно ограничено, — их лишь немногим более 100. Большинство же веществ построено из молекул — разнообразных сочетаний этих атомов. Например, молекула углекислого



го газа состоит из одного атома углерода и двух атомов кислорода (CO_2), молекула воды — из двух атомов водорода и одного атома кислорода (H_2O) и т. д. Но это мы знаем сейчас. В конце XVIII в., когда английский физик, химик и метеоролог Джон Дальтон приступал к исследованию свойств мельчайших частиц вещества, об атомах и молекулах знали почти столько же, сколько за 2 тыс. лет до этого. Тем не менее учёный не побоялся бросить вызов природе, взявшись «взвесить» то, что увидеть было невозможно.

Немногим ранее французский химик Антуан Лоран Лавуазье (1743—1794) открыл закон сохранения массы в химических реакциях и впервые разделил все вещества на химические элементы и химические соединения. Дальтон пошёл дальше. Он возродил атомистику и в основу своей теории положил следующие постулаты:

1. Все химические элементы состоят из мельчайших частиц, называемых атомами.

2. Атомы данного химического элемента имеют одинаковые массу и химические свойства.

3. Атомы разных элементов имеют различные массу и химические свойства.

4. Атомы могут соединяться в простых целочисленных отношениях, образуя соединения.

Возможно ли определить массу того или иного конкретного атома? Никому раньше в голову не приходило, что такое реально. Да и сами атомы — существуют ли они? У Дальтона на этот счёт сомнений не возникало. Он был настолько убеждён в существовании атомов, что иногда ему казалось: он их видит воочию. Учёный садился за стол и начинал рисовать:

Атом кислорода ○

Атом водорода ●

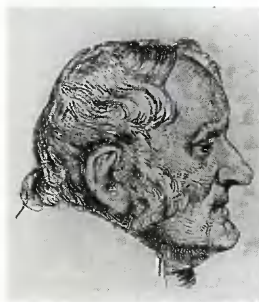
«Взвесить» атомы Дальтон не мог. Тогда он решил определить их относительную массу, т. е. принять, например, массу атома водорода за единицу и посмотреть, чему будут равны массы всех остальных атомов в сравнении с массой атома водорода.

К тому времени уже был известен состав многих химических соединений. Например, удалось установить, что вода состоит из водорода и кислорода. Химический анализ показывал, что при образовании воды 1 г водорода соединяется с 8 г кислорода. Первым, кто попытался объяснить этот факт, был Дальтон. Не имея возможности руководствоваться какими-либо иными соображениями, он решил исходить из «принципа простоты».

Если известно только одно соединение двух данных элементов A и B , то оно должно состоять из двухатомных молекул (которые сам Дальтон называл «сложными атомами») типа AB . Следующими по простоте являются комбинации AB_2 и A_2B ; поэтому, если известны два или три соединения данных элементов, их молекулы должны описываться тремя формулами.

Основываясь на этом принципе, Дальтон предположил, что молекула воды двухатомна и имеет (в современных обозначениях) формулу H_2O . Отсюда следовало, что в 1 г водорода и 8 г кислорода содержится одинаковое число частиц. Но если это верно, значит, каждый атом кислорода в восемь раз тяжелее атома водорода. Так Дальтон впервые получил значение относительной атомной массы кислорода.

Изучение иных химических соединений позволило Дальтону составить целую таблицу относительных атомных масс всевозможных химических элементов. В 1803 г. он обнародовал результаты этих исследований. Учёный сознавал, что является первопроходцем в новой, неизведанной пока области, и потому в своём



Джон Дальтон.



Антуан Лоран Лавуазье.



Знаки химических элементов, предложенные Д. Дальтоном. Из первой публикации.

ELEMENTS					
	Hydrogen.	1 ^{wt}		Strontian	46 ^{wt}
	Azote	5		Barytes	68
	Carbon	5 ^{ff}		Iron	50
	Oxygen	7		Zinc	56
	Phosphorus	9		Copper	56
	Sulphur	13		Lead	90
	Magnesia	20		Silver	190
	Lime	24		Gold	190
	Soda	28		Platina	190
	Potash	42		Mercury	167

сообщении подчеркнул: «Рассмотрение роли относительной тяжести мельчайших частичек тел, насколько я знаю, является совершенно новым предметом исследования. Я начал недавно эти работы и достиг некоторых успехов». Значение его исследований трудно переоценить. Ничего подобного в науке ещё не было. Впервые человек своим разумом проник в микромир и на языке чисел описал то, что невозможно было увидеть.

Однако «принцип простоты», которым руководствовался Дальтон, сильно подвёл его. Позволив в одних случаях получить правильные результаты, во многих других он привёл к неверным выводам. Ошибочной оказалась и формула молекулы воды, предложенная Дальтоном, а вместе с ней и относительная атомная масса кислорода.

Эти ошибки были обнаружены и исправлены итальянским учёным Амедео Авогадро. В 1811 г. вышла его статья под названием «Очерк метода определения относительных масс элементарных молекул тел и пропорций, согласно которым они входят в соединения». В ней указывалось,

что все проблемы, связанные с установлением относительных масс частиц вещества, могут быть легко решены, если предположить, что при одинаковых условиях в равных объёмах любых газов содержится одинаковое число молекул. Теперь это утверждение называют *законом Авогадро*. Из него следует, что отношение масс молекул газов совпадает с отношением их плотностей при одинаковых давлениях и температурах. В самом деле, если $m = \rho V$ — масса газа, состоящего из N молекул, то масса одной молекулы

$$m_0 = \frac{m}{N} = \frac{\rho V}{N}.$$

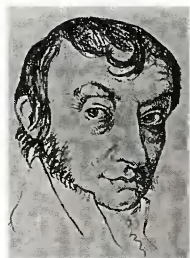
Записав это выражение для двух газов (имеющих один и тот же объём V и находящихся в одинаковых условиях) и разделив одно из них на другое, можно получить:

$$\frac{m_{01}}{m_{02}} = \frac{\rho_1}{\rho_2}.$$

Так Авогадро обнаружил удивительно простое решение задачи о нахождении относительной молекулярной массы. Для этого, оказывается, необходимо знать лишь плотности ρ соответствующих газов. В качестве примера он рассчитал относительную молекулярную массу кислорода. Подставив в свою формулу плотности кислорода и водорода, учёный пришёл к выводу, что масса молекулы кислорода примерно в 15 раз превышает массу молекулы водорода (несколько позднее было получено более точное значение — 16).

Понятие относительной молекулярной массы сохранилось до нашего времени. Только теперь (начиная с 1960 г.) при её расчёте за основу берут не массу атома водорода, а $1/12$ массы атома углерода (её называют атомной единицей массы; а. е. м. = $1,6605655(86) \cdot 10^{-27}$ кг), т. е.

$$M_r = \frac{m_0}{\frac{1}{12} m_c} = \frac{m_0}{\text{а. е. м.}},$$



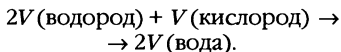
Амедео Авогадро.



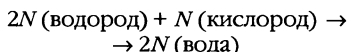
где M_r – относительная молекулярная масса. Последнее соотношение позволяет выразить массу молекулы в атомных единицах массы:

$$m_0 = M_r \cdot a. \text{ е. м.} \quad (1)$$

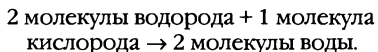
Следующим шагом в развитии молекулярных представлений было определение состава молекул различных соединений, в частности воды. Для этого Авогадро воспользовался экспериментальным фактом, установленным несколькими годами ранее французским химиком и физиком Жозефом Луи Гей-Люссаком (1778–1850). В 1808 г. он обнаружил, что для образования водяного пара объёмом $2V$ нужно, чтобы в реакции участвовали водород такого же объёма и кислород объёма V . Схематически это можно изобразить следующим образом:



До открытия закона Авогадро этот факт мало о чём говорил. Ведь частицы газообразного водорода могли быть расположены вдвое дальше друг от друга, чем атомы газообразного кислорода, и потому обнаруженная разница в объёмах могла не иметь никакого отношения к числу молекул. Однако после того, как закон был установлен, ситуация резко изменилась. Равные объёмы газов (при одинаковых условиях) содержат одинаковые количества молекул. Пусть в объёме V находится N молекул, тогда в объёме $2V$ будет содержаться $2N$ молекул и приведённое выше уравнение примет вид:

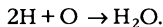


или (после сокращения на N)

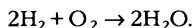


Проанализировав полученное соотношение, Авогадро пришёл к выводу, что молекулы водорода и кис-

лорода двухатомны. Если бы это было не так и молекулы водорода и кислорода были одноатомными, то имело бы место следующее уравнение:



Но здесь образуется лишь одна молекула воды, в то время как на самом деле их должно быть две. Если молекулы водорода и кислорода содержат по два атома, то мы сразу приходим к правильному уравнению:



Так Авогадро впервые установил, из скольких атомов состоят молекулы водорода, кислорода и воды. Впоследствии им, а затем и другими учёными была определена структура всех остальных известных молекул. Оказалось, что число атомов в молекулах может достигать нескольких десятков, а в отдельных случаях даже сотен и тысяч (у некоторых витаминов и белков).

Несмотря на всю важность полученных Авогадро результатов, у многих учёных XIX в. осталось чувство неудовлетворённости. Большинство из них продолжали сомневаться: а существуют ли на самом деле атомы? Ведь их по-прежнему никто не видел. Французский химик Жан Батист Дюма (1800–1884) писал: «Если бы это зависело от меня, я бы искоренил в науке слово *атом*, потому что я убеждён, что оно выходит за пределы проверяемого опытом, а химия никогда не должна выходить за границы проверяемого экспериментом».

Между тем в 1827 г. английский ботаник Роберт Браун (1773–1858) сделал открытие, которому было суждено сыграть очень важную роль в победе атомно-молекулярного учения. Наблюдая в микроскоп взвесь цветочной пыльцы в воде, он обнаружил странное явление: частицы взвеси непрерывно двигались, описывая самые причудливые траектории. Впоследствии беспорядочное движение взвешенных в жидкости мелких

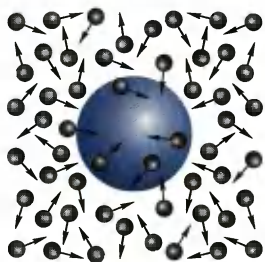


Жозеф Луи Гей-Люссак.



Роберт Браун.

Известный философ А. Шопенгауэр считал атомы «выдумкой невежественных аптекарей»; физик и философ Э. Мах называл последователей атомистики «общими верующими», а в одном из учебников 1885 г. написано: «Твёрдый атом... живёт в виде невероятной, но всё ещё не опровергнутой гипотезы и поднесён... Однако несравненно правдоподобнее теория, по которой материя непрерывна, то есть не состоит из частиц с промежуточными». Противники атомистики утверждали, что атомная гипотеза «является примитивной тенденцией видеть за всеми физическими явлениями механическую модель». «Я последний, кто отрицает возможность построения любой иной картины мира, кроме атомической», — говорил Л. Больцман с горечью.



Брауновская частица под воздействием ударов окружающих молекул.



Жан Батист Перрен.

Рассматривая брауновское движение, А. Эйнштейн писал: «Главной моей целью было найти такие факты, которые возможно надёжнее устанавливали бы существование атомов определённой конечной величины».

частичек другого вещества стали называть *брауновским движением*.

Понимание истинной причины этого движения пришло не сразу. Потребовалось почти полвека, прежде чем бельгийский учёный Иньяс Карбонелль предположил, что брауновское движение частицы вызвано ударами молекул окружающей жидкости.

В ходе изучения брауновского движения было установлено, что это движение универсально (поскольку наблюдалось решительно у всех веществ, взвешенных в расплывлённом состоянии в жидкости), непрерывно (в закрытой со всех сторон колбе его можно наблюдать неделями, месяцами, годами) и хаотично (беспорядочно). Причём движения даже тех брауновских частиц, которые располагались довольно близко друг к другу, были совершенно независимыми, так что не могло быть и речи о том, что их причиной служат какие-либо потоки в самой жидкости. Всё это свидетельствовало о том, что молекулы жидкости находятся в состоянии непрерывного и беспорядочного движения.

Первая количественная теория брауновского движения появилась лишь в 1905 г. Её автором был Альберт Эйнштейн. Составив уравнение, описывающее брауновское движение, и решив его, учёный получил следующее соотношение:

$$\langle x^2 \rangle = b(T/N_A)t, \quad (2)$$



где $\langle x^2 \rangle$ — среднее значение квадрата смещения брауновской частицы вдоль оси X за время t , T — абсолютная температура жидкости, b — коэффициент пропорциональности, зависящий от размеров брауновских частиц и вязкости жидкости, а N_A — универсальная физическая константа, называемая *постоянной Авогадро*. Она показывает, во сколько раз атомная единица массы (а. е. м.) меньше одного грамма (г). Узнав, чему она равна, можно сразу же пересчитать все относительные массы атомов и молекул в граммах и килограммах.

Для определения постоянной Авогадро методом Эйнштейна достаточно измерить значения $\langle x^2 \rangle$, b , T и t и подставить их в формулу (2). «Не перестаёшь удивляться этому результату», — писал известный американский физик-теоретик Абрахам Пайс (родился в 1918 г.), — полученному как бы из ничего: приготовьте взвесь сферических частиц, размер которых довольно велик по сравнению с диаметром простых молекул, возьмите секундомер да микроскоп и, пожалуйста, определяйте постоянную Авогадро!»

Теория Эйнштейна нашла полное подтверждение в экспериментальных исследованиях французского физика Жана Батиста Перрена (1870—1942). Он начал проводить их в 1908 г. и продолжал затем в течение нескольких лет. Через равные промежутки времени ($\Delta t = 30$ с) Перрен отмечал последовательные положения брауновской частицы, видимые в поле зрения микроскопа, и соединял затем эти положения прямолинейными отрезками.

Измерения, проведённые Перреном, показали, что постоянная Авогадро выражается числом $6 \cdot 10^{23}$. Измерения этой постоянной другими методами привели к такому же результату. (Современное значение — $6,022045(31) \cdot 10^{23}$.)

Определение постоянной Авогадро позволило рассчитать массу m_0



отдельных атомов и молекул, а путём деления массы всего тела m на m_0 — и число частиц в этом теле.

Ссылаясь на эксперименты по брауновскому движению, и Вильгельм Фридрих Оствальд был вынужден признать, что они «позволяют даже осторожному учёному говорить об экспериментальном подтверждении атомного строения вещества». Перрен за свои работы по брауновскому движению получил Нобелевскую премию. Подводя итоги в 1912 г., он заявил: «Атомная теория восторжествовала. Некогда многочисленные, её противники отвержены и один за другим отрекаются от своих взглядов, в течение столь долгого времени считавшихся обоснованными и полезными».

Для определения размеров молекул был проведён ряд опытов. В одном из них, осуществлённом в начале XX в. английским физиком Джозефом Уильямом Стреттом, лордом Рэлеем (1842—1919), на поверхность воды поместили каплю масла. Масло стало растекаться, образуя плёнку. По мере растекания масла плёнка становилась всё тоньше и тоньше. Через некоторое время растекание прекратилось. Рэлей предположил, что это произошло, когда все молекулы масла образовали *мономолекулярный слой*, т. е. плёнку толщиной в одну молекулу. Разделив объём капли на площадь образовавшегося пятна, физик нашёл диаметр одной молекулы масла. Он оказался равным примерно $1,6 \cdot 10^{-9}$ м.

Атомы и молекулы нельзя увидеть невооружённым глазом, так как разрешающая способность глаза не лучше 0,1 мм, что существенно больше размеров этих частиц. Оптические микроскопы позволяют достигнуть увеличения до 1500 крат, в результате чего становится возможным различать структуры с расстоянием между элементами до $2 \cdot 10^{-7}$ м. Но даже такое расстояние намного больше атомных размеров.

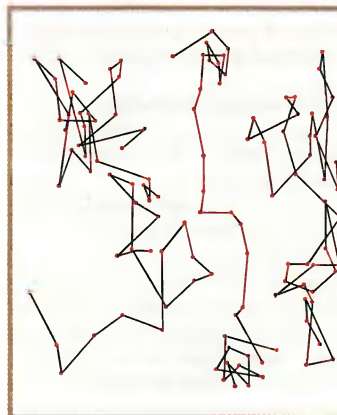


Однако в середине XX в. удалось создать так называемые электронные микроскопы, в которых вместо световых лучей используются ускоренные пучки электронов. Они позволяют наблюдать и фотографировать изображения объектов при увеличении до 10^6 раз.

Разрешающая способность таких микроскопов достигает десятых долей *нанометра* (от греч. «нанос» — «карлик» и «метрео» — «измеряю»; $1 \text{ нм} = 10^{-9} \text{ м}$), благодаря чему стало возможно фотографировать изображения атомарных структур. Человеку удалось увидеть то, что 2,5 тыс. лет казалось принципиально недоступным познанию.



Джон Уильям Стретт, лорд Рэлей.



Здесь воспроизведён один из оригинальных рисунков Жана Батиста Перрена с изображением путей трёх брауновских частиц. Длина 16 клеток на этом рисунке составляет 50 мкм, диаметр же самих брауновских частиц был равен 0,53 мкм. Не следует думать, что приведённый рисунок изображает точную форму действительных траекторий брауновских частиц. На самом деле это лишь отдалённый намёк на истинную картину беспорядочного движения. Если отмечать положения частицы через промежутки времени, в 100 раз меньшие, чем это делал Перрен, то вместо каждого прямолинейного отрезка появилась бы соответствующая зигзагообразная линия, которая была бы столь же сложна, как и весь данный рисунок.



СКОЛЬКО МОЛЕКУЛ В КУСОЧКЕ МЕЛА?

Пусть имеется обыкновенный кусочек мела массой $m = 10$ г. Можно ли определить, сколько в нём молекул? Очень просто. Для этого нужна только периодическая система элементов Д. И. Менделеева, в которой приведены их относительные атомные массы.

Мел — это карбонат кальция (CaCO_3). Сложив относительные атомные массы кальция (40) и углерода (12) с утроенной атомной массой кислорода (16), мы получим 100. Следова-

тельно, масса одной молекулы мела $m_0 = 100$ а. е. м.

Однако атомная единица массы в $N_A = 6 \cdot 10^{23}$ раз меньше 1 г. Поэтому масса той же молекулы в граммах составит

$$m_0 = 100 \cdot \frac{1\text{г}}{6 \cdot 10^{23}} \approx 17 \cdot 10^{-23}\text{г}.$$

Чтобы определить число молекул в кусочке мела, надо, очевидно, узнать, во сколько раз его полная масса превышает массу одной молекулы. Таким образом,

$$N = \frac{10\text{г}}{17 \cdot 10^{-23}\text{г}} \approx 0,6 \cdot 10^{23}.$$

Это число настолько велико, что если вы каждую секунду будете удалять из кусочка мела по миллиарду молекул, то вам хватит этого мела на 2 млн лет!

В действительности, как показывала школьная практика, кусок мела хватает в лучшем случае лишь на несколько дней. Попробуйте теперь оценить, сколько молекул мела останется на классной доске после решения на ней одной задачи.



Крупнейший в СССР электронный микроскоп. Институт металлургии имени А. А. Байкова. 1982 г.

Наука не стоит на месте. Появляются сканирующие микроскопы, в которых датчиком наблюдательного устройства является остро заточенная игла, перемещающаяся над изучаемой поверхностью и реагирующая на изменение силы притяжения к её атомам или молекулам. Их разрешающая способность может составлять уже сотые доли нанометра. Наблюдение структур с масштабами порядка на-

нометра и менее делает возможным конструирование сверхминиатюрных электронных устройств. Роль проводов в подобных структурах выполняют химические связи, а элементами таких «молекулярных компьютеров» становятся соединённые этими связями фрагменты молекул. Нанометрия становится основой будущей технологии — *нанотехнологии XXI столетия*.

АТОМНО-МОЛЕКУЛЯРНЫЙ КОНСТРУКТОР

Замечательный английский поэт и художник Уильям Блейк (1757—1827) в своём стихотворении «Изречения невинности» призывал

*В одном мгновенье видеть
вечность,
Огромный мир — в зерне песка,
В единой горсти —
бесконечность
И небо — в чашечке цветка.*

За 2 тыс. лет до Блейка Демокрит увидел во всём этом лишь атомы и пустоту. Но его взгляду открылось несколько не меньше того, что было нарисовано воображением поэта. Разглядев за каждой из окружающих

нас вещей мириады мельчайших атомов, древнегреческий философ открыл тем самым практически бесконечное количество новых миров. Оказалось, что любая песчинка действительно целая Вселенная, ибо включает в себя почти столько же мельчайших частиц, сколько звёзд содержится во всей Метагалактике!

Из этих частиц состоит и камень, одиноко лежащий на обочине дороги, и маленький цветок, радующий нас своей естественной красотой, и пушистые облака, неторопливо плывущие по голубому небу. Но откуда же тогда такое фантастическое разнообразие мира?



Всё дело, оказывается, в том, как сгруппированы и как расположены эти частицы внутри того или иного тела. Атомы различных химических элементов могут объединиться в молекулы. Различные же комбинации атомов и молекул способны образовывать несколько миллионов веществ!

Но даже одно и то же вещество может выглядеть по-разному. Например, уже Платон указывал, что «у воды имеется прежде всего две разновидности: одна жидкая, другая твёрдая, но способная плавиться». Впоследствии к ним добавили третью (водяной пар), а сами эти «разновидности» стали называть *агрегатными состояниями вещества*.

До того как удалось открыть строение вещества, изучение его различных агрегатных состояний сводилось лишь к описанию внешних признаков. Большинство людей этим довольствовались. Но всегда находились и те, кому этого было мало.

В 1758 г. английский поэт и критик Сэмюэл Джонсон писал: «Неразвитые и ленивые умы путают обыденную осведомлённость со знанием и полагают, что им известна природа вещей, коль скоро они видят их внешние формы и знают их назначение. Мыслитель же, не удовлетворяющийся объяснением существующего сверхъестественными силами, изво-

дит себя бесплодным любопытством, и чем больше он пытается проникнуть в суть вещей, тем яснее осознаёт всю бездну своего непонимания».

Сегодня наше естественное любопытство уже нельзя назвать бесплодным. Как говорил знаменитый французский физик Луи де Бройль, именно благодаря удивлению и любопытству людей родилась современная наука.

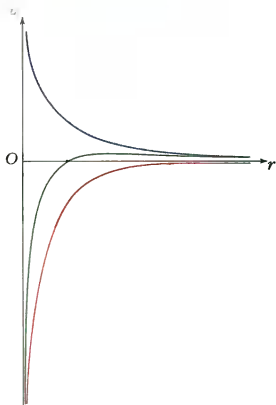
На протяжении многих веков люди, способные удивляться и задавать вопросы, пытались представить разнообразие мира, в котором мы живём, как результат сочетания и взаимодействия неких первичных элементов. Что лежит в основе всех вещей? Если в природе нет ничего, кроме атомов и пустоты, как считал Демокрит, то каким образом из них можно «сконструировать» эти вещи, причём так, что одни из них оказываются твёрдыми, другие — жидкими, а иные — газообразными?

Согласно классификации немецкого учёного Вернера Гильде (в книге «Зеркальный мир»), всех людей можно разделить на следующие четыре группы:

- 1) люди, которые никогда не удивляются;
- 2) люди, которые удивляются, но не задумываются над удивившим их явлением;
- 3) люди, которые, удивившись, спрашивают «а почему?»;
- 4) люди, которые, удивившись, обращаются к числу и мере.

МОЛЕКУЛЯРНЫЕ СИЛЫ

Существование в природе различных тел говорит о том, что их частицы способны взаимодействовать друг с другом. Если бы это было не так, то все предметы тут же рассыпались бы на отдельные частицы. Какие же силы удерживают их внутри тел?



В древности учёные знали лишь о контактных силах, возникающих при непосредственном соприкосновении тел. Поэтому в то время сторонники атомистической теории считали, что атомы твёрдых и жидких тел наделены какими-то крючками или выступами, позволяющими им зацепляться друг за друга. Подобной точки зрения исследователи природы придерживались на протяжении 2 тыс. лет! Даже в XVII столетии английский физик и химик Роберт Бойль всё ещё утверждал, что частицы твёрдых тел «не могут разлетаться вследствие своей разветвлённости, неправильной фигуры, крючковатости и других неудобств формы, которая сцепляет частицы друг с другом». Частицы газов Бойль, однако, представлял себе совершенно иначе. Объясняя упругость воздуха, он предположил, что его частицы напоминают крохотные пружинки.

Другая точка зрения была высказана Исааком Ньютоном. Он впервые допустил, что между частицами вещества могут действовать какие-то особые силы, аналогичные тем, что действуют между наэлектризованными телами. «Притяжения тяготения, магнетизма и электричества, — писал Ньютон, — простираются на весьма заметные расстояния и, таким образом, наблюдались просто глазами, но могут существовать и другие притяжения, простирающиеся на столь малые расстояния, которые до сих пор ускользают от наблюдения, и, быть может, электрическое притяжение распространяется на такие малые расстояния и без возбуждения трением».

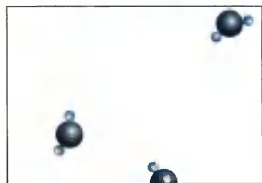
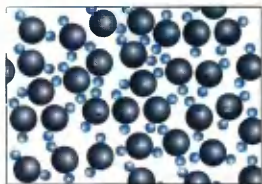
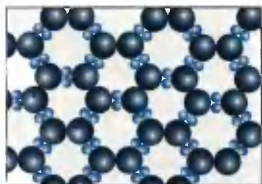
Сегодня мы знаем, что силы взаимодействия атомов и молекул действительно имеют электрическую природу и возникают в результате взаимодействия заряженных частиц (электронов и атомных ядер), входящих в состав атомов и молекул тел. Результирующую силу межмолекулярного взаимодействия можно рас-

сматривать как разность модулей сил притяжения и отталкивания, которые одновременно действуют между составными частями молекул. Исследование этого взаимодействия показывает, что и силы притяжения между молекулами (обусловленные взаимодействием электронов одной молекулы с ядрами другой), и силы отталкивания между ними (обусловленные в первую очередь взаимодействием их ядер) с увеличением расстояния r между центрами молекул очень быстро убывают, стремясь к нулю. Однако у сил притяжения это убывание происходит по закону $1/r^n$, где $n \approx 7$, а у сил отталкивания — по закону $1/r^k$, где $k \geq 9$, т. е. значительно быстрее, чем у сил притяжения. Если расстояние между молекулами, при котором модули сил притяжения и отталкивания совпадают (оно примерно равно сумме радиусов взаимодействующих молекул), обозначить r_0 , то при $r < r_0$ преобладающими оказываются силы отталкивания, а при $r > r_0$ — силы притяжения. Именно этим объясняется такое явление, как сопротивляемость твёрдых и жидких тел сжатию и растяжению.

АГРЕГАТНЫЕ ПРЕВРАЩЕНИЯ

О том, что лёд может превращаться в воду, а вода — в пар, было известно с незапамятных времён. Однако то, что лёд, жидкая вода и водяной пар являются тремя агрегатными состояниями одного и того же вещества — воды, поняли далеко не сразу. Сегодня каждый школьник знает, что и в твёрдом, и в жидком, и в газообразном состоянии вода состоит из одних и тех же молекул (H_2O), а 2 тыс. лет назад такое и в голову никому не приходило. Уж слишком сильно отличаются эти состояния друг от друга!

Вот как описывал превращение воды в лёд древнегреческий философ Эпикур (341—270 до н. э.): «Лёд



Агрегатные состояния воды: твёрдое, жидкое и газообразное.



образуется как вследствие вытеснения из воды частиц круглой формы и соединения находящихся в воде треугольных и остроугольных частиц, так и вследствие прибавления извне таких частиц, которые, скопившись, доставляют замерзание воде, вытеснив некоторое количество круглых частиц». Таким образом, замерзание воды, по Эпикуру, является результатом замены круглых частиц вещества на остроугольные. При обратной замене происходит превращение льда в воду — плавление.

На самом деле частицы вещества при агрегатных превращениях остаются теми же, меняются только их расположение и характер движения. Но чтобы установить это, физика должна была пройти очень длинный и трудный путь. Даже Галилей, живший на 19 столетий позже Эпикура, признавал, что «окончательная истина» в этом вопросе ему ещё неизвестна. Объясняя же процесс плавления, он решился высказать лишь «домысел, связанный с немалыми затруднениями и требующий исследования», а именно: «Это можно объяснить тем, что тончайшие частицы огня, проникая в мельчайшие поры металла... заполняют существующие между ними мельчайшие пустоты и освобождают частицы от действия той силы, которая держала их связанными друг с другом, и тем способствуют их разъединению. Получая таким образом свободу движения, частицы образуют жидкую массу и остаются в таком состоянии, пока между ними находятся частицы огня».

Одним из тех, кто впервые связал агрегатные превращения с характером движения частиц вещества, был Роберт Бойль. Согласно Бойлю, частицы находятся в состоянии теплового движения, причём «его направления чрезвычайно разнообразны, одни частицы движутся направо, другие налево, одни прямо вверх,

другие вниз, третьи вкось и т. д.». При нагревании вещества интенсивность теплового движения возрастает. Частицы холодной воды движутся очень медленно. «Когда же вода становится действительно горячей, движение частиц оказывается явным и соответственно более буйным... и вызывает испарение, поскольку частицы, благодаря испытываемому ими волнению, получают способность подъёма в воздух».

Вот так медленно, с трудом уточнялась картина превращений вещества из одного агрегатного состояния в другое, а пылливый человеческий ум, продираясь через дебри непонимания, шаг за шагом приближался к постижению истины.

Сегодня мы знаем, что не только вода, но и другие вещества могут находиться и в твёрдом, и в жидком, и в газообразном состояниях. Так, железо в обычных условиях твёрдое. Однако при температуре 1535°C оно плавится и превращается в жидкость. В результате её испарения образуется газ — пар из атомов железа. И наоборот, кислород (O_2), входящий в состав воздуха, которым мы дышим, представляет собой газ. Но при температуре -183°C он превращается в жидкость. Если охладить её до $-218,6^{\circ}\text{C}$, получится твёрдый кислород.

Чтобы установить эту общую закономерность, потребовалось не одно столетие. Например, такие вещества, как образующие воздух азот и кислород, в течение долгого времени считались «постоянными» газами, т. е. веществами, которые могут существовать только в газообразном состоянии. Попытки сжижения воздуха оканчивались неудачей вплоть до 1877 г., когда французский учёный Луи Кальете (1832—1913) и швейцарский учёный Рауль Пикте (1846—



Роберт Бойль.



Рауль Пикте.



1929), охладив его под высоким давлением, получили в конце концов жидкий воздух. А такой, например, газ, как гелий, впервые был превращён в жидкость лишь в 1908 г.! Поэтому к выводу о том, что любое вещество может находиться в различных агрегатных состояниях, удалось прийти только в XX столетии.

ГАЗООБРАЗНОЕ СОСТОЯНИЕ ВЕЩЕСТВА

В течение долгого времени единственным газообразным веществом, известным людям, был воздух. Анаксимен из Милета (VI в. до н. э.) называл его «первоматерией», а Эмпедокл из Агригента (V в. до н. э.) считал одним из четырёх элементов, образующих весь мир. Сторонники атомистического учения полагали, что воздух состоит из атомов. Герон Александрийский (около I в. н. э.) писал: «Воздух состоит из крохотных частиц, окружённых вакуумом, подобно тому, как воздух окружает крупинки сухого песка».

Сложный состав воздуха был установлен лишь во второй половине XVIII в. Вскоре после открытия азота (1772 г.) и кислорода (1774 г.) французский химик Антуан Лоран Лавуазье (1743—1794) доказал, что оба газа входят в состав воздуха.

Основное свойство газов заключается в следующем: они не имеют собственной формы и равномерно заполняют весь доступный им объём. Объясняется такое свойство тем, что частицы газа совершают хаотическое и почти свободное движение в пространстве, меняя свою скорость лишь при столкновениях друг с другом или со стенками сосуда, в котором находится газ. Именно это и послужило причиной того, что соответствующее состояние ве-

щества было названо голландским естествоиспытателем Яном Баптистом ван Гельмонтом (1579—1644) «газом» (греч. «хаос»).

При нормальных условиях, а именно при температуре 0°C и давлении 760 мм рт. ст., в 1 см³ любого газа находится примерно 10^{19} молекул и среднее расстояние между ними составляет около 10 нм. Взаимодействие же молекул становится существенным, лишь когда $r < 1$ нм. Поэтому радиус действия межмолекулярных сил в данном случае оказывается в десять раз меньше среднего расстояния между молекулами, а общий объём V_0 , в котором такие силы могут проявляться («собственный объём» всех молекул), в 1000 раз меньше полного объёма V , занимаемого газом.

Таким образом, взаимодействие молекул в газе при обычных условиях играет второстепенную роль. Это делает возможным во многих задачах, решаемых молекулярной физикой, использовать такую модель газа, в которой взаимодействие молекул вообще не учитывают (за исключением сил отталкивания, возникающих при непосредственном столкновении молекул друг с другом). Причём сами молекулы (в промежутках между столкновениями) рассматриваются как не имеющие размеров материальные точки. Эта модель была введена в середине XIX в. немецким физиком Рудольфом Юлиусом Эмануэлем Клаузиусом (1822—1888) и названа «совершенным газом». Несколько позже название было заменено на «идеальный газ», которое и утвердилось в науке.

КОНДЕНСИРОВАННОЕ СОСТОЯНИЕ ВЕЩЕСТВА

При нормальных (или близких к ним) условиях отношение полного объёма, занимаемого газом, к суммарному объёму его молекул $V/V_0 \gg 1$.

Рудольф Юлиус
Эмануэль Клаузиус.





Путём уменьшения объёма V можно достичь такого состояния вещества, когда его частицы станут располагаться почти вплотную друг к другу ($V/V_0 = 1+3$). Это состояние вещества называют *конденсированным* (от лат. *condensatio* — «уплотнение», «сгущение»).

К конденсированным системам относятся жидкости и твёрдые тела. Типичными представителями последних являются кристаллы. Однако существуют и такие состояния вещества, которые занимают промежуточное положение между ними, — аморфы и жидкие кристаллы.

Для твёрдых тел характерно сохранение (в отсутствие внешних воздействий) формы и объёма. При этом движение частиц носит характер малых колебаний около положений равновесия. Однако в аморфных телах атомы колеблются вокруг хаотически расположенных точек, упорядоченность которых наблюдается лишь на расстояниях, сравнимых с межатомными (так называемый *ближний порядок*). В то время как в кристаллах периодичность в расположении этих точек наблюдается для сколь угодно отдалённых атомов (*дальний порядок*).



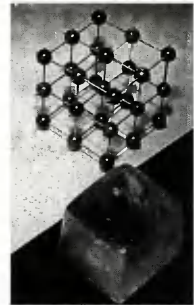
Кристаллы обладают периодической (атомной, молекулярной или ионной) структурой, которая называется кристаллической решёткой, и обычно имеют форму правильного симметричного многогранника.

Одним из первых, кто выдвинул идею существования кристаллической решётки, был Ньютон. «Нельзя ли предположить, — писал он, — что при образовании... кристалла частицы... установились в строй и в ряды?» Его современник, нидерландский физик Христиан Гюйгенс, увидел в этом причину правильной формы кристаллов. «Правильность, обнаруживаемая в этих образованиях, — отмечал он, — по-видимому, происходит от расположения маленьких невидимых и одинаковых частичек, из которых они состоят».

Правда, большинство твёрдых материалов являются поликристаллическими, т. е. состоят из множества отдельных, беспорядочно ориентированных мелких кристаллических зёрен (например, многие горные породы, технические металлы, сплавы), и потому подобной симметричной формой не обладают. В противоположность им крупные одиночные кристаллы называют монокристаллами (кристаллы кварца, флюорита, полевого шпата, алмаза и т. д.). Некоторые из них (например, кварц, берилл) могут достигать огромных размеров (более 1 м) и массы (свыше 1 т).

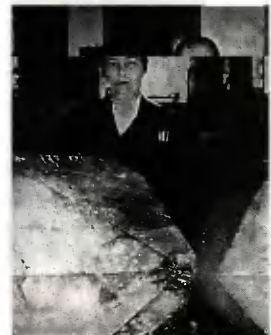
Одна из отличительных особенностей кристаллов — наличие у них определённой температуры плавления. Впервые этот важный факт был установлен зимой 1754/55 гг. шведским физиком Жаном Андре Делюком (1727—1817). Поставив на огонь сосуд со льдом, он заметил, что его температура оставалась равной 0 °С до тех пор, пока лёд полностью не превратился в воду.

Другой особенностью, присущей всем монокристаллам, является их *анизотропия* (от греч. «анизос» —



Модели пространственных решёток кристаллов.

Гигантский кристалл кварца.





МНОГОЛИКИЙ УГЛЕРОД

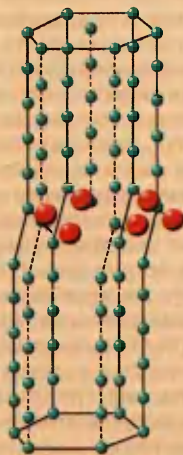
Описывая свойства углерода (С), Дмитрий Иванович Менделеев отмечал: «Углерод встречается в природе как в свободном, так и в соединённом состоянии, в весьма различных формах и видах. В свободном состоянии углерод известен по крайней мере в трёх видах: в виде угля, графита и алмаза. В состоянии соединений углерод входит в состав так называемых органических веществ, т. е. множества веществ, находящихся в теле всякого растения и животного. Он находится в виде углекислого газа в воде и воздухе, а в виде солей углекислоты и органических остатков — в почве и массе земной коры... Воск и масло, скипидар и смола, хлопчатая бумага и белок, клеточная ткань растений и мускульная ткань животных, винная кислота и крахмал — все эти и множество иных веществ, входящих в ткани и соки растений и животных, представляют соединения углеродистые».

В свободном состоянии углерод — твёрдое кристаллическое тело. Но помимо названных Менделеевым алмаза и графита (уголь, как теперь известно, не является чистым углеродом) существуют и другие его модификации: карбин, лонсдейлит и фуллерит. Как же так получается, что одни и те же атомы способны образовывать столь непохожие по своим свойствам тела? Дело в том, что атомы углерода могут соединяться между собой различными способами, образуя различные кристаллические решётки.

Расположив эти атомы так, как показано на рисунке, мы получим графит — чёрно-серый, мягкий, слоистый материал, обладающий металлическим блеском. При нажиге графит легко расслаивается, благодаря чему находит широкое применение в производстве грифелей (от греч. «графо» — «пишу») карандашей.

Перемешав все атомы и создав из них новую конструкцию, получим тот же углерод, но с совершенно иными свойствами. Это будет алмаз — самое твёрдое вещество в природе.

Укладывая линейные цепочки атомов углерода, подобно штабелям брёвен, получим цепи прочного беловатого карбина. Он был открыт в 60-х гг.



Модель карбина.

XX в. В природе карбин встречается редко, но учёные нашли способ получить его в лабораторных условиях.

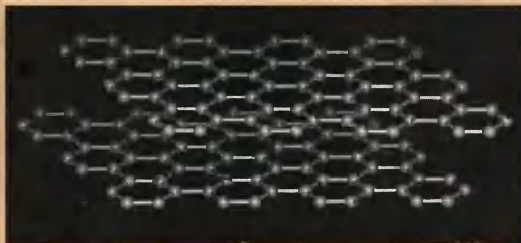
Строительные ряды шестиугольных столбиков атомов углерода образуют лонсдейлит, или гексагональный алмаз. Это вещество сначала получили искусственно и лишь затем обнаружили в виде маленьких кристалликов внутри метеоритов.

Наконец, построив из нескольких десятков атомов углерода молекулу, напоминающую покрывку футбольного мяча, и сложив затем из этих «мячей» кристалл, можно получить фуллерит — вещество чёрного цвета, обладающее металлическим блеском и свойствами полупроводника. Оно названо по имени американского архитектора Ричарда Бакминстера Фуллера, который при конструировании куполов зданий использовал структуры, удивительно похожие на молекулы фуллерита (фуллерены). Первый представитель этой модификации углерода — C_{60} был открыт в 1985 г. Авторы открытия — английский учёный Гарольд Крото и американские учёные Роберт Керл и Ричард Смули в 1996 г. награждены Нобелевской премией по химии.

До сих пор ведётся интенсивное изучение свойств фуллеритов. Оказалось, что их можно использовать для создания запоминающих устройств с очень высокой плотностью информации, сверхпроводящих материалов, новых гальванических элементов, лекарств с противоопухолевой активностью, различных красителей и т. д.



Модель алмаза.



Модель графита.



Модель фуллерена C_{60} .



Модель нанотрубки.

В 1991 г. в процессе получения фуллеренов японские учёные обнаружили на графитовых электродах полые углеродные трубки диаметром от 3—4 до 10—30 нм и назвали их *нанотрубками*. Стенки этих трубок состоят из одного или нескольких атомных слоёв. С одной стороны каждая из трубок оказывается закрытой «крышкой», представляющей собой фрагмент структуры фуллерена.

Изучение нанотрубок показало, что изготовленные из них материалы (наноматериалы) могут быть и диэлектриками, и проводниками, и полупроводниками. При введении внутрь нанотрубок атомов железа материал приобретает особые магнитные свойства — становится ферромагнетиком. Возможно, эти трубки будут использованы и для создания новых сверхпроводников.

Модель фуллерена C_{70} .

«неравный» и «тропос» — «направление»), т. е. зависимость физических свойств от направления внутри кристалла. Например, по разным направлениям в кристалле могут быть неодинаковыми механическая прочность, теплопроводность, электропроводность, тепловое расширение, оптические и другие свойства. Причина анизотропии кристаллов — упорядоченное расположение в них частиц, приводящее к различию расстояний и интенсивности взаимодействия этих частиц по разным направлениям внутри кристаллической решётки. Поликристаллические тела в достаточно больших масштабах изотропны (от *греч.* «изос» — «равный», «одинаковый» и «тропос» — «направление»).

Аморфы (от *греч.* «аморфос» — «бесформенный») бывают как природными (янтарь и другие смолы), так и искусственными (стекло, некоторые виды пластмасс). Последние можно получить путём достаточно быстрого охлаждения жидкого вещества. В отличие от кристаллов аморфные тела изотропны. Кроме того, они не имеют определённой температуры плавления. При повышении температуры они размягчаются и переходят в жидкое состояние постепенно.

Жидкие кристаллы были открыты в 1889 г. австрийским ботаником Ф. Рейницером и немецким физиком Отто Леманом (1855—1922). К веществам, находящимся в таком состоянии, относятся, например, эфиры холестерина.

Жидкие кристаллы получили своё название благодаря тому, что они обладают одновременно и текучестью, характерной для жидкостей, и анизотропией свойств, характерной для твёрдых кристаллов. Образующие их молекулы имеют удлинённую форму и располагаются внутри кристалла параллельно друг другу. Эта параллельность и приводит к наличию анизотропии. Текучесть объясняется



Кристаллы кварца.



МИР ПОЛИМЕРОВ

Полимерами (или высокомолекулярными соединениями) называют вещества, молекулы которых состоят из большого числа повторяющихся групп атомов (полимерных цепей). Среди них существуют как природные (белки, нуклеиновые кислоты, целлюлоза, крахмал, каучук, природные смолы и т. д.), так и искусственные, или синтетические, полимеры (полиэтилен, полипропилен и др.).

Любопытно, что некоторые из них были получены ещё в начале XIX в. Однако химики того времени обычно подавляли процессы, приводящие к «осмолению», т. е. полимеризации продуктов исследуемой химической реакции, и потому прошли мимо целого мира новых соединений.

Но даже после того, как полимеры всё же были открыты, их строение в течение долгого времени оставалось неизвестным. Вначале считалось, что они состоят из малых молекул, которые, попадая в раствор, объединяются в некие комплексы. Принципиально новая теория строения полимеров была создана в 1922 г. немецким химиком Германом Штаудингером (1881—1965). Он впервые стал рассматривать полимеры как вещества, состоящие из макромолекул, име-

ющих цепное строение и обладающих необычайно большой молекулярной массой (у биополимеров, как сейчас известно, она достигает 10^{10} а. е. м.). В 1953 г. за открытия в области химии высокомолекулярных веществ Штаудингер награждён Нобелевской премией.

Полимерные цепи могут содержать от нескольких десятков до миллиарда (в случае ДНК) звеньев. Они бывают как линейными, так и разветвлёнными (в виде гребёнки или звезды). Есть макромолекулы, образующие весьма сложные и запутанные сетки («гели») и достигающие размеров в несколько сантиметров!

Изучение физических свойств полимеров привело к пересмотру считавшегося универсальным положения о существовании для каждого вещества трёх основных агрегатных состояний. Оказалось, что полимеры не могут находиться в газообразном состоянии, поскольку при сильном нагревании разлагаются на низкомолекулярные соединения. Чаше всего полимеры представляют собой вязкотекучую жидкость (полимерный расплав), стеклообразное вещество (например, большинство пластмасс и смол) или жидкие кристаллы.

Образование твёрдого полимерного кристалла осложняется большой

длиной макромолекул, из-за чего возникает состояние, в котором собственно кристаллические области оказываются разделёнными большими аморфными прослойками с перепутанными цепями.

Значение полимеров невозможно переоценить. Биополимеры составляют основу всех живых организмов. Однако и искусственные высокомолекулярные соединения сегодня также являются неотъемлемой частью мира, в котором мы живём. Без полимерных материалов (таких, например, как пластмасса, резина, лаки, краски, клеи и т. д.) теперь немислимы ни производство, ни быт людей.



Герман Штаудингер.

относительной слабостью межмолекулярных сил.

Благодаря особым электрооптическим свойствам жидкие кристаллы находят широкое применение в технике (в частности, в плоских мониторах компьютеров, экранах портативных телевизоров, микрокалькуляторах, электронных часах).

Жидкость по своим свойствам занимает промежуточное место между двумя другими агрегатными состояниями вещества — твёрдым и газообразным. Жидкости присущи некоторые свойства и твёрдого тела (сохраняет свой объём, обладает определённой прочностью на разрыв), и газа (принимает форму со-

суда, в котором находится). Молекулы в жидкости расположены почти вплотную друг к другу, причём упорядоченно, так что можно говорить о существовании в жидкости ближнего порядка.

Основное свойство жидкости — текучесть — древнегреческий философ Эпикур объяснял тем, что она состоит из круглых и гладких частиц, не способных зацепляться друг за друга. Аргументы в пользу этой точки зрения можно найти в поэме римского учёного Тита Лукреция (I в. до н. э.) «О природе вещей». В ней автор объясняет текучесть жидкости, сравнивая её поведение с поведением сыпучих тел:



*...Ибо легко, как вода, растекается
горсточка мака:
Круглые зёрна его не держатся,
вместе сплотившись,
А по наклону бегут
от малейшего их сотрясения.*

В настоящее время известно, что движение частиц в жидкости представляет собой сочетание колебательного движения около некоторых положений равновесия и происходящих время от времени перескоков молекул из одних центров колебаний в другие. Если на жидкость действует внешняя сила, сохраняющая своё направление более длительное время, чем интервалы τ между скачками, жидкость начинает течь. Течение жидкости, таким образом, есть результат преимущественного перескакивания её молекул в направлении действия внешней силы.

Время τ для разных жидкостей принимает значения от 10^{-11} с (для жидкостей с низкой вязкостью) до нескольких часов и даже суток (у стёкол). В тех случаях, когда продолжительность действия силы много меньше τ , жидкость не успевает проявить текучесть и начинает вести себя подобно твёрдому телу: в ней могут появиться деформации сдвига, трещины и т. д. Например, если нанести резкий (со скоростью, превы-

шающей 23 м/с) удар бойком по струе смеси трансформаторного масла с канифолью, то можно будет наблюдать разлом и откалывание отдельных частей струи.

ПЛАЗМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ ВЕЩЕСТВА

Увеличивая температуру газа при фиксированном давлении, можно добиться того, что его молекулы при столкновениях начнут «разбивать» друг друга на ионы и электроны. В результате образуется плазма. Она представляет собой частично или полностью ионизованный газ, характеризующийся практически одинаковой плотностью положительных и отрицательных зарядов.

В состоянии плазмы находится большая часть вещества Вселенной. Плазму с температурой $t < 10^5$ °C называют *низкотемпературной* (плазма газовых разрядов, пламя, верхние слои атмосферы Земли, звёздные атмосферы, межзвёздная среда и галактические туманности), а плазму с температурой $t > 10^6$ °C — *горячей* или *высокотемпературной* (она существует в недрах Солнца и других звёзд). Подобное деление обусловлено тем, что высокотемпературная плазма играет важную роль в связи с

Планетарная туманность M2-9. Снимок космического телескопа им. Э. Хаббла.





проблемой осуществления управляемого термоядерного синтеза (см. статью «Плазма»).

В то время как горячая плазма стала предметом интенсивного изучения лишь во второй половине XX в., низкотемпературная плазма (в виде обычного огня) находится в центре внимания философов уже 2,5 тыс. лет. С тех пор на протяжении нескольких столетий она рассматривалась учёными в качестве одного из четырёх элементов нашего мира. «Пламя, — писал Р. Бойль, — самое горячее тело, какое мы знаем, состоит из частиц, колеблющихся столь бурно, что они постоянно и быстро летают повсюду стаями и рассеивают или разрушают все горючие тела, какие они встречаются на своём пути».

Плазму и сейчас нередко называют четвёртым состоянием вещества. В отличие об обычного (не ионизованного) газа между её частицами существует значительное взаимодействие, обусловленное наличием у них электрических зарядов. Благодаря этому взаимодействию характер движения частиц в плазме резко отличается от того, что свойствен нейтральным молекулам газа.



НЕЙТРОННОЕ СОСТОЯНИЕ ВЕЩЕСТВА

При значительном увеличении давления вещество может перейти в пятое — нейтронное — состояние. Оно возникает в результате «вдавливания» атомных электронов в ядра и последующего «слияния» этих электронов с находящимися там протонами. Так как в результате подобного «слияния» образуются нейтроны, описанный процесс называют нейтронизацией вещества. В земных условиях она никогда не наблюдалась. Однако в 1967 г. учёным удалось открыть космические объекты, имеющие столь высокую плотность (до 10^{18} кг/м³), что вещество в них неминуемо должно было подвергнуться нейтронизации. Эти объекты получили название нейтронных звёзд. Они совсем не похожи на наше Солнце и представляют собой своеобразные гигантские атомные ядра.

Изучив строение тел, можно не только объяснить их свойства, но и создать новые вещества с заданными характеристиками. Работа над созданием новых веществ напоминает игру с детским конструктором. Перед нами множество разных «деталей», и мы пытаемся собрать из них нечто интересное и полезное. Ребёнку легче — он может каждую деталь внимательно рассмотреть и пощупать. Атомы и молекулы невидимы, их не возьмёшь в руки. И всё-таки у нас многое получается. Располагая знанием о микроструктуре вещества, учёным удалось создать твёрдые и прочные сплавы, разнообразные клеи, жароупорные материалы, пластмассу, искусственный каучук, капрон, лавсан и др. Атомно-молекулярный конструктор действует!

Правда, сегодня это мало кого удивляет. Люди быстро привыкают к новым вещам, не задумываясь о том,



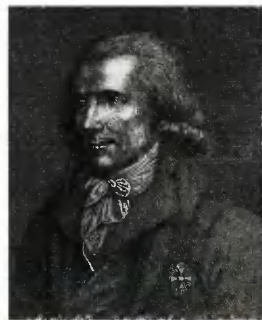
какой титанический труд учёных и конструкторов стоит за ними. А ведь за то, чтобы обладать современным знанием о свойствах атомов и молекул, любой из учёных Древней Греции пожертвовал бы всем, что имел... Сколько раз Демокрит задавал себе вопросы: какие они — мельчайшие частицы материи? не ошибается ли он, веря в их существование? Если бы только знать, как всё обстоит на самом деле! «Я бы предпочёл найти истинную причину хотя бы одного явления, чем стать царём Персии!» — говорил он. Но никто в то время не мог помочь философу. Собственные наблюдения тоже ничего не проясняли. Но если глаза не помогают установить Истину, зачем они? И тогда, согласно легенде, проклиная своё бесполезное зрение, Демокрит выколол себе глаза...

Подобно ребёнку, упрямо пытающемуся узнать, как устроена оказа-

вшаяся в его руках игрушка, люди в течение многих столетий искали ответы на «простые» вопросы о строении мира. «Какими детскими, — писал Людвиг Больцман, — были первые теории Вселенной... Фантазия была тогда слишком продуктивна, а самопроверки посредством эксперимента не доставало. Неудивительно, что эти теории были осмеяны эмпириками и практиками. Но всё-таки они содержали в себе зародыши всех позднейших великих теорий...»

Между тем «детство» закончилось. Человечество вступило в эпоху «зрелости». И сегодня мы не только знаем ответы на многие вопросы, касающиеся строения вещества, но и способны сконструировать целый мир новых вещей, — вещей, сделанных из множества невиданных материалов, которые никогда раньше не существовали в природе и которые своим рождением обязаны людям науки.

Бенджамин Румфорд.



РАЗГАДКА ПРИРОДЫ ТЕПЛОТЫ

В 1620 г. философ Фрэнсис Бэкон (1561—1626) в трактате «Новый органон» впервые высказал идею о том, что тепло есть движение. Придерживаясь аналогичных взглядов, Роберт Бойль в 1675 г. продемонстрировал, что упорядоченное движение трущихся поверхностей порождает тепло. В дальнейшем кинетические представления о теплоте развивали Роберт Гук и Даниил Бернулли. В 1738 г. в работе «Гидродинамика» Бернулли рассматривал газ как множество мельчайших частиц, с движением которых связана теплота, а давление газа на стенки он считал результатом совокупного действия этих частиц. Похожие мысли высказал в 1744 г. Михаил Васильевич Ломоносов в работе «Размышления о причине тепла и холода». Эту причину Ломоносов видел «во взаимном движении нечувствительных физических частичек». Он подверг теорию теплорода едкой критике, указывая на

противоречие ей опытные факты (например, очень быстрое выделение большого количества теплоты при взрыве снаряда, не сопровождающееся охлаждением окружающей среды). Доводы Ломоносова повлияли на Леонарда Эйлера, в 1752 г. написавшего: «То, что теплота заключается в некотором движении малых частиц тела, теперь уже достаточно ясно».

Но во второй половине XVIII столетия вновь стала господствовать субстанциальная (от лат. substantia — «то, что лежит в основе»), или материальная, теория теплоты. Эта теория, основателем которой называют Платона, утверждала существование особого флюида (невесомой жидкости) — теплорода, ответственного за тепловые явления. Теплород считался рассеянным по всей материи, способным проникать в тела, «сочетаться» с ними и превращать твёрдые тела в жидкости, а жидкости — в газы. Теория теплорода объясняла такие опытные факты, как передача тепла солнечным светом, существование теплоты плав-

ления («скрытой теплоты», как её тогда называли), различие удельных теплоёмкостей веществ и др. Кинетическая теория не могла это объяснить, поэтому большинство учёных того времени придерживалось позиций материальной теории теплоты.

И всё же с конца XVIII в. механическая теория теплоты стала постепенно укореняться в физике и химии. Например, в 1798 г. в Мюнхене граф Бенджамин Румфорд (настоящая фамилия Томпсон; 1753—1814), американец по происхождению, рассверлил тупым сверлом орудийный ствол, помещённый в воду, и через 2,5 ч работы сверла вода закипела. Тогда же англичанин Хэмфри Дэви провёл опыты по плавлению льда трением, которые дали возможность связать «скрытую теплоту» с механическим воздействием на тело. Окончательно вопрос о природе теплоты был решён, когда Альберт Эйнштейн и Мариан Смуловский построили теорию брауновского движения, связав его с ударами подвижных молекул жидкости.



ВНУТРИ АТОМА

В начале XX в. атомно-молекулярная гипотеза была экспериментально доказана и уже ни у кого не вызывала сомнений. Но, как говорил Эйнштейн: «К сожалению, законы природы становятся вполне понятными только тогда, когда они уже неверны». К тому времени накопилось большое количество опытных данных, которые неумолимо приводили к заключению, что атом, представляемый как мельчайшая неделимая, т. е. бесструктурная, частица вещества, в природе не существует!

Каковы же факты, лишившие первоначальное понятие «атом» его прежнего смысла?



АТОМ ЭЛЕКТРИЧЕСТВА

Все вещества, как правило, электрически нейтральны, однако при определённых условиях обнаруживаются их электрические свойства. Такие условия обеспечивает, например, явление электролиза (от греч. «электрон» — «янтарь» и «лизис» — «разложение», «растворение», «распад»), при котором происходит разложение электролита на составные части под действием электрического тока. Продукты разложения выделяются на электродах, погружённых в электролит и соединённых с каким-нибудь источником постоянного тока.

Количественные законы электролиза сформулировал английский физик Майкл Фарадей (1791—1867) в 1833—1834 гг. Электролиз объясняется тем, что в растворах электролитов образуются ионы (греч. «идущий»). Термин «ион» был введён Фарадеем для обозначения заряженных атомов, возникающих в результате диссоциации (распада) молекул в растворе. Учёный обнаружил, что если через растворы различных веществ, молекулы которых построены из одновалентных атомов, пропускать одинаковый электрический заряд, то на

электродах всегда выделяется одно и то же количество вещества, т. е. равное число атомов. При прохождении тока через растворы с двухвалентными ионами то же самое количество атомов перенесёт с собой удвоенный заряд Фарадея, в случае трёхвалентных ионов — утроенный и т. д.

Следовательно, различные ионы могут нести на себе заряды e , $2e$, $3e$ и т. д., но никогда не встречаются ионы с дробной частью заряда e . Так была открыта дискретность электрического заряда. По этому поводу немецкий физик, химик и физиолог Герман Людвиг Фердинанд Гельмгольц (1821—1894) в 1881 г. писал: «Если мы признаём существование атомов химических элементов, то мы не можем избежать и дальнейшего заключения, что электричество, как положительное, так и отрицательное, разделено на определённые элементарные количества, которые ведут себя как атомы электричества».

Теоретические представления о носителе элементарного, т. е. наименьшего, электрического заряда высказывались давно. Ещё в 1749 г. Бенджамин Франклин утверждал: «Электрическая субстанция состоит из чрезвычайно малых частиц...». Она

«отличается от обычной материи в том отношении, что частички последней взаимно притягиваются, а частички первой отталкиваются друг от друга».

В 1891 г. наименьшую величину электрического заряда по предположению ирландского физика и математика Джорджа Джонстона Стони (1826—1911) стали называть электрон. Вначале со словом «электрон» не связывали понятия о частице. Это было лишь обозначение элементарного электрического заряда, переносимого одновалентным ионом. Существование электрона как частицы, которая обладает определённой массой и элементарным электрическим зарядом, было доказано совсем другими опытами.



Майкл Фарадей.



КАТОДНЫЕ ЛУЧИ

Наиболее серьёзный удар по привычным представлениям об атомах нанесло открытие *электрона* — частицы, в тысячи раз более лёгкой, чем атом.

История открытия электрона насчитывает не одно десятилетие. В 1858 г. немецкий стеклодув и владелец кустарной мастерской Генрих Гейсслер (1815—1879) изготовил стеклянную трубку с разрежённым газом, в которую были впаяны два электрода (так называемая *гейсслерова трубка*). Если эти электроды присоединить к разным полюсам источника постоянного напряжения, то по цепи пойдёт ток и газ начнёт светиться. Примерно в середине XIX в. газовыми разрядами заинтересовался немецкий физик Юлиус Плюккер (1801—1868). Он установил, что проводимость газа зависит от его плотности в трубке: она возрастает, когда часть газа откачана. При этом оказалось, что каждый газ светится своим характерным цветом. Так Плюккер в 1858 г. изобрёл светящиеся трубки. Теперь они широко используются в рекламе и различных шоу. Когда разрежение в трубке увеличивается, вблизи катода появляются тёмное пространство — «катодное пятно», которое при дальнейшем откачивании газа расширяется и затем заполняет всю трубку. Тогда она перестаёт светиться. Исследования Плюккера (1859 г.) показали, что это тёмное пространство пронизывают какие-то невидимые для глаза «лучи», позднее получившие название *катодных лучей*.

Основные свойства катодных лучей были установлены в серии блестящих опытов английского физика и химика Уильяма Крукса (1832—1919), проведённых им с помощью так называемых *круксовых трубок*. Этим трубкам с большим разрежением он придавал самые разнообразные формы. Если на пути катодных

лучей поставить металлический экран (Крукс использовал мальтийский крест), то за ним на противоположной стороне трубки наблюдается его тень. Следовательно, внутри трубки катодные лучи распространяются прямолинейно. Введя в трубку радиометр (изобретённый им же в 1875 г.), Крукс обнаружил, что тот начинает вращаться, когда оказывается на пути катодных лучей, т. е. они осуществляют механическое воздействие. При поднесении магнита пучок лучей и образуемая им тень смещаются в сторону, — значит, катодные лучи несут электрический заряд. Учёный считал, что катодные лучи — это «лучистая материя», четвертое состояние вещества или «ультрагазообразное состояние, столь же далёкое от газообразного, сколько то далеко от жидкого».

Уильям Крукс и некоторые другие исследователи полагали, что катодные лучи образуются молекулами остаточного газа, содержащегося в трубке после откачивания. Соприкасаясь с катодом, они приобретают отрицательный заряд, после чего отталкиваются от одноимённо заряженного электрода.

Наряду с молекулярной гипотезой Крукса существовала и другая, волновая гипотеза, которую поддерживали немецкие физики Густав Генрих Видеман (1826—1899), Генрих Рудольф Герц (1857—1894) и Филипп Эдуард Антон Ленард (1862—1947). Согласно этой гипотезе, катодные лучи связаны с возмущением эфира — особой невидимой среды, заполняющей всё пространство Вселенной. Однако волновая гипотеза не соответствовала тому, что катодные лучи отклоняются в магнитном поле (на волны это поле не действует). Но и гипотеза Крукса не могла объяснить другого, установленного в 1892 г. факта: катодные лучи проходят сквозь тонкие пластинки алюминия. Было непонятно, как наэлектризованные молекулы «ухитряются»



Юлиус Плюккер.



Уильям Крукс.

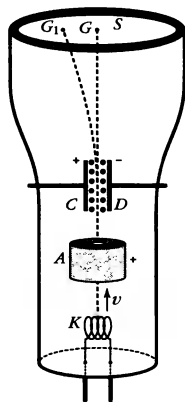


Трубка Крукса.



Джозеф Джон Томсон.

Флуоресценция
(от лат. *fluere* — «фтор»
и *escendere* — «вскочить»,
«подниматься») — свечение
некоторых веществ,
затухающее в течение
короткого времени после
воздействия на них светом.



проходить сквозь твёрдое тело. Между тем опыты французского физика Жана Батиста Перрена, выполненные им в 1895 г., показали следующее: катодные лучи несут отрицательный электрический заряд, так что их материальная природа более вероятна, чем волновая.

ОПЫТЫ ДЖОЗЕФА ДЖОНА ТОМСОНА

Решающую роль в установлении природы катодных лучей сыграли опыты английского физика Джозефа Джона Томсона (1856—1940). Приступая к эксперименту, он писал: «Что это за частицы? Атомы это, или молекулы, или материя в состоянии ещё более тонкого дробления?». Его экспериментальная установка представляет собой вакуумную электронно-лучевую трубку. Накаливаемый катод K является источником катодных лучей, которые ускоряются электрическим полем, существующим между анодом A и катодом K . В центре анода имеется отверстие. Катодные лучи, прошедшие через это отверстие и движущиеся прямолинейно со скоростью v , попадают в точку G на стенке трубки S напротив отверстия в аноде. Если стенка S покрыта флуоресцирующим веществом, то попадание частиц в точку G проявляется как светящееся пятнышко. На пути от A к G частицы проходят между пластинами конденсатора CD , к которым может быть приложено напряжение от батареи.

Если включить эту батарею, то пучок частиц отклоняется её электрическим полем и на экране S возникает пятнышко в положении G_1 . Создавая в области между пластинами конденсатора ещё и однородное магнитное поле, перпендикулярное плоскости рисунка (оно изображено точками), можно вызвать отклонение пятнышка в том же или обратном направлении.

Опыты проводились таким образом, что отклонение катодных частиц (корпускул, согласно терминологии Джозефа Джона Томсона) электрическим полем было скомпенсировано воздействием магнитного поля (пятнышко при этом возникало в точке G). Приравняв действующие на частицы силы, можно найти скорость частиц, а с помощью дополнительных исследований — и их удельный заряд, т. е. отношение e/m заряда частицы к её массе. Он оказался почти в 1840 раз больше, чем удельный заряд самого лёгкого иона водорода, который был определён до этого из других опытов. Если считать, что заряд корпускулы равен по модулю заряду иона водорода ($1,6 \cdot 10^{-19}$ Кл), то масса катодной частицы оказывается почти в 1840 раз меньше массы иона водорода.

Так открыли первую элементарную частицу с массой $m_e = 9,11 \cdot 10^{-31}$ кг и с наименьшей величиной электрического заряда. В дальнейшем она получила название электрон. 30 апреля 1897 г., когда Джозеф Джон Томсон доложил о своих исследованиях, считается «днём рождения» электрона. Эксперименты показали также, что отношение e/m для катодных лучей не зависит от природы газа, заполняющего разрядную трубку. Отсюда следовал вполне естественный вывод: электрон входит в состав всех атомов.

Открытие электрона породило новые проблемы. Что удерживает электроны внутри атома? Сколько их там? Как они движутся и как их движения связаны с излучением атомов? Что внутри атома компенсирует отрицательный заряд электронов (ведь атом в целом нейтрален)?

«ЛУЧИ БЕККЕРЕЛЯ»

Важную роль в развитии физики атома сыграли также и другие открытия конца XIX столетия.



ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЗАРЯДА ЭЛЕКТРОНА

Наиболее точные измерения заряда электрона выполнил начиная с 1910 г. американский физик Роберт Эндрус Милликен (1868—1953). Используемый им метод был основан на определении заряда очень маленьких капелек масла. Такие капельки распылялись между пластинами конденсатора. Проходя через горлышко пульверизатора, капли в результате трения электризуются.

Движение отдельной капли можно наблюдать в микроскоп. Если пластины конденсатора не подключены к батарее, то капля будет свободно падать. Из-за своих малых размеров она довольно быстро станет падать равномерно, когда её сила тяжести с учётом силы Архимеда уравнивается силой сопротивления воздуха.

Включив электрическое поле между пластинами конденсатора, можно заставить каплю двигаться вертикально вверх с некоторой скоростью v . Ионизация воздуха рентгеновскими лучами позволяет изменить заряд капли (при этом она притягивает к себе образующиеся в воздухе ионы противоположного знака) и тем самым скорость её движения.

Такая процедура повторяется несколько раз. Определив скачки скорости Δv , появляющиеся после каждого очередного облучения, можно найти и соответствующие им изменения заряда капли Δq .

Опыты Милликена показали: эти изменения являются целыми кратными одной и той же величины. Так непосредственно было доказано, что электрический заряд складывается из дискретных единиц и что в природе существуют элементарный электри-

ческий заряд $e = 1,602 \cdot 10^{-19}$ Кл и его материальный носитель — электрон.

За свои уникальные по точности и важности эксперименты Милликен в 1923 г. был награждён Нобелевской премией по физике.



Роберт Эндрус Милликен.

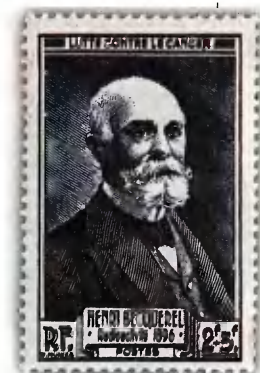
В 1896 г. французский физик Антуан Анри Беккерель (1852—1908) по счастливому стечению обстоятельств открыл совершенно новый тип излучения. Произошло это так. Беккерель изучал вопрос о возможности испускания рентгеновского излучения фосфоресцирующими веществами, подвергшимися длительному облучению солнечным светом. Учёный подготовил опыт, но осуществить его сразу не удалось, потому что погода испортилась и солнце появлялось лишь на короткое время. Установка Беккереля содержала фотопластинку в рамке из чёрной ткани, прикрытую алюминиевой пластинкой. На пластинке находился тонкий медный крест, а над ним располагался препарат с двойным сульфатом калия и урана. Так как погода была плохая, всё это он запер в ящике своего стола.

Погода не улучшалась несколько дней, и Беккерель решил проявить фотопластинку. К его удивлению, на ней проступил весьма чёткий контур креста. Так неожиданно оказалось, что для получения фотографическо-

го эффекта совсем не надо предварительно освещать урановую руду солнечным светом. Изучая открытое явление, физик пришёл к выводу, что все соли урана независимо от своего происхождения испускают излучение одной и той же природы. Его интенсивность зависит только от количества урана, содержащегося в соли, т. е. эта способность является чисто атомным свойством, характерным для элемента урана.

В 1898 г. супруги Мария Склодовская-Кюри (1867—1934) и Пьер Кюри (1859—1906) обнаружили в минералах ещё более активный элемент, чем уран. Его назвали радий (от *lat. radius* — «луч»). В том же году они ввели термин *радиоактивность* для обозначения свойства вещества испускать «лучи Беккереля». По определению Эрнеста Резерфорда, изучавшего явление радиоактивности в знаменитой Кавендишской лаборатории Кембриджского университета, «радиоактивность — это атомное явление, сопровождающееся химическими изменениями, в котором

Фосфоресценция (от греч. «фос» — «свет» и «фос» — «несущий») — свечение, вызванное предвратительным освещением и сохраняющееся после прекращения освещения.



Антуан Анри Беккерель. Марка из международной серии «Борьба против рака».



Пьер Кюри (в центре) и Мария Склодовская-Кюри в лаборатории.

порождаются новые виды вещества. Эти изменения должны происходить внутри атома, а радиоактивные элементы являются, должно быть, спонтанными превращениями атомов... Поэтому радиоактивность нужно рассматривать как проявление внутриатомного химического процесса».

В опытах 1897—1899 гг. Резерфорд установил, что «излучение урана является сложным и состоит по крайней мере из двух различных видов: одно, очень быстро поглощаемое, назовём для удобства α -излучением; другое, более проникающее, назовём β -излучением». В 1900 г. французский учёный Поль Ульриш

НЕВИДИМЫЙ СВЕТ

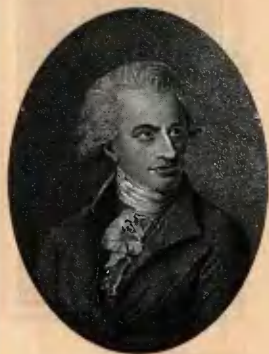
Ещё во времена античности было известно, что солнечные лучи наряду со светом несут тепло, с которым связывали тепловые лучи. В 1800 г. английский астроном и оптик Уильям Гершель (1738—1822) сделал важное открытие. Двигая чувствительный термометр равномерно вдоль солнечного спектра, он обнаружил, что температура, которую показывал прибор, не только непрерывно повышалась при перемещении от фиолетового конца спектра к красному, но её максимум вообще располагался в обла-

сти, лежащей за красной частью спектра и невидимой для глаза. Таким образом было открыто *инфракрасное излучение*.

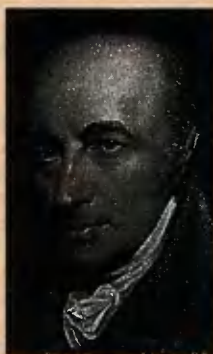
В 1801 г. немецкий физик Иоганн Вильгельм Риттер (1776—1810) исследовал химическое воздействие излучения различных участков светового спектра с помощью хлористого серебра (оно чернеет под влиянием световых лучей). Учёный установил, что химическое воздействие излучения возрастает постепенно от красной части спектра к фиолетовой и достигает максимума за фиолетовой областью — там, где глаз уже не вос-

принимает никаких световых лучей. Так было открыто *ультрафиолетовое излучение*. Независимо от Риттера его обнаружил в 1801 г. английский физик и химик Уильям Хайд Во́лластон (1766—1828).

Впоследствии, когда удалось доказать, что свет — электромагнитные волны, волне определённого цвета стали приписывать физическую величину λ , которая была названа в 1803 г. английским учёным и врачом Томасом Юнгом (1773—1829) *длиной волны*. Самые длинные волны у красного цвета (6500 Å), самые короткие — у фиолетового — (4100 Å).



Уильям Гершель.



Уильям Хайд Во́лластон.



Вильгельм Конрад Рентген.



Виллар (1860—1934) обнаружил, что имеется и третья составляющая излучения, которую раньше не замечали. Она не отклоняется магнитным полем и, следовательно, по своей природе является электромагнитным излучением. Её назвали *гамма-лучами*.

Исследуя бета-лучи, испускаемые разными радиоактивными веществами, Беккерель показал, что они имеют неодинаковые скорости и отклоняются электрическим полем, а супруги Кюри установили наличие у лучей отрицательного заряда. Выполненное же Беккерелем измерение удельного заряда бета-частиц

позволило определить, что этими частицами являются электроны.

Для выяснения природы альфа-лучей Эрнесту Резерфорду понадобилось несколько лет трудоёмких экспериментов. В 1903 г. по отклонению этих лучей в электрических и магнитных полях учёный доказал, что они состоят из положительно заряженных частиц. Окончательные опыты, проделанные им в 1909 г., позволили установить: альфа-частицы представляют собой двукратно ионизированные атомы гелия. Вылет из атомов альфа- и бета-частиц не оставлял сомнений в том, что атомы имеют сложное строение.



Пьер и Мария Кюри. Международная серия марок «Борьба против рака».

В 1895 г. немецкий физик-экспериментатор из Вюрцбургского университета Вильгельм Конрад Рентген (1845—1923), как и многие другие в то время, проводил исследования катодных лучей. Однажды он обратил внимание, что полоска бумаги, покрытая флуоресцирующей солью бария и лежащая в стороне от работающей трубки Крукса, светится. После долгого и напряжённого труда Рентген пришёл к выводу, что он смог открыть новый вид излучения — *Х-лучи* (или *рентгеновские*), — которое возникало в том месте, куда попадали катодные лучи.

Рентген сфотографировал закрытый деревянный футляр с гирьками, и на фотографии чётко проступили

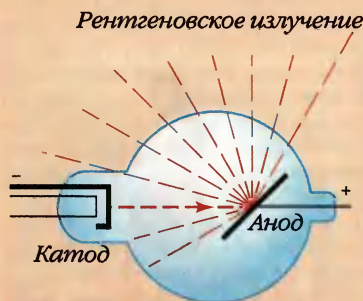


Схема рентгеновского аппарата.

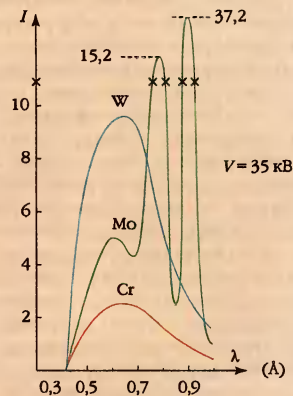
изображения гирек. Он же получил первую рентгенограмму руки, на которой ясно видны её кости. Всё это было продемонстрировано широкой публике и вызвало огромный интерес общественности, особенно в связи с перспективами использования в медицине. Свойства излучения поражали воображение: оно легко пронизывало человеческое тело и проникало даже сквозь закрытые дверцы мощных стальных сейфов.

Исследования Рентгена показали, что Х-лучи в магнитном поле не отклоняются и, следовательно, не являются потоком частиц. Лишь спустя два десятилетия после целого ряда экспериментов было установлено, что рентгеновское излучение, так же как и свет, имеет электромагнитную природу. Только в отличие от света оно характеризуется гораздо меньшими длинами волн — около 10^{-8} — 10^{-9} см. При этом рентгеновское излучение делится на *жёсткое* и *мягкое*. Жёсткое (коротковолновое) обладает большой проникающей способностью, мягкое же сильно поглощается почти всеми веществами.

В ходе исследований удалось выявить два типа рентгеновского излучения — *тормозное* и *характеристическое*. Первое возникает при замедлении электронов в мишени и не зависит от

её вещества. Со стороны коротких длин волн интенсивность тормозного излучения резко обрывается.

Когда энергия электронов, сталкивающихся с мишенью, достигает некоторого критического значения, обусловленного веществом мишени, на фоне сплошного спектра возникают резкие максимумы. Они определяют характеристическое излучение, состоящее из отдельных, дискретных линий, разных для различных веществ. Это излучение свидетельствовало о сложном строении атома.



Рентгеновский спектр.



«ПОРТРЕТ» АТОМОВ

В 1666 г., пропустив белый луч света через стеклянную призму, Исаак Ньютон получил на экране цветную полосу, содержащую все цвета радуги. Учёный назвал её *спектром* (от *лат.* spectrum — «видимое», «представление»). В 1801 г. английский физик Томас Юнг (1773—1829) установил, что цвет, воспринимаемый человеком, определяется частотой колебаний в световой волне. Другими словами, световые волны разной частоты вызывают у человека ощущения разного цвета.

Семь цветов радуги являются лишь основными. На самом деле между ними существуют промежуточные цвета, которые плавно переходят друг в друга. Поэтому говорят, что солнечный свет имеет *непрерывный (сплошной) спектр*.

Иной характер у спектров излучения веществ, находящихся в газообразном атомарном состоянии. Эти спектры включают в себя только отдельные частоты, которыми на экране

соответствуют цветные (спектральные) линии, разделённые тёмными промежутками. Такие спектры стали называть *линейчатыми*.

В 1834 г. английский физик и химик Уильям Генри Фокс Талбот (1800—1877), изобретатель фотографии на бумаге, высказал идею, что каждая светлая линия в спектре излучения является характерной для излучающего её элемента. Иначе говоря, спектр излучения у каждого химического элемента свой, не совпадающий со спектром ни одного другого химического элемента. Эта идея позволила впоследствии немецким химикам Густаву Роберту Кирхгофу (1824—1887) и Роберту Вильгельму Бунзену (1811—1899) разработать *спектральный анализ* — метод определения химического состава вещества по его спектру.

Линейчатые спектры излучения оказались своего рода портретами атомов. По ним, как по отпечаткам пальцев подозреваемого в криминалистике, можно узнать, что за атомы образуют данное вещество.



Типы спектров:
1 — непрерывный спектр,
2 — 4 — линейчатые эмиссионные спектры.

ОПАСНОСТЬ НАУКИ

В 1903 г. Пьер Кюри обнаружил, что соли урана непрерывно выделяют тепло, причём очень большое, если учесть малую массу радиоактивного препарата. По этому поводу Резерфорд писал: «...теперь точно установлено, что атомы некоторых элементов подвержены спонтанному распаду, сопровождающемуся излучением энергии в количествах, огромных по сравнению с энергией, освобождающейся при обычных молекулярных видоизменениях». В своей книге «Современное развитие физики» (1904 г.) английский учёный Ветгем писал: «Профессор Резерфорд в шутку передавал автору этой книги тревожную мысль, что если бы удалось открыть надлежащий детонатор, то можно было бы вызвать волну взрыва атомического разложения во всём веществе, кото-

рое произвело бы превращение всей массы нашего земного шара и оставило бы от него только клуб гелия».

В то же время обнаружилось смертоносное воздействие радиоактивного излучения на живые организмы. Это известие взбудоражило общественность, и был поставлен вопрос о том, целесообразно ли продолжать научные исследования радиоактивных веществ. Пьер Кюри после присуждения ему в 1903 г. Нобелевской премии говорил: «В преступных руках радий может стать весьма опасным, и мы можем теперь задать себе вопрос, выигрывает ли человечество от знания секретов природы, достаточно ли оно созрело, чтобы пользоваться ими, не принесёт ли ему вред это знание. Пример открытия Нобеля весьма характерен. Наличие мощных взрывчатых веществ сделало возможным проведение грандиозных работ. Но вместе с тем взрыв-

чатые вещества являются страшным средством разрушения в руках преступников, вовлекающих народы в войну. Я склонен придерживаться точки зрения Нобеля, что человечество извлечёт из новых открытий больше хорошего, чем плохого».





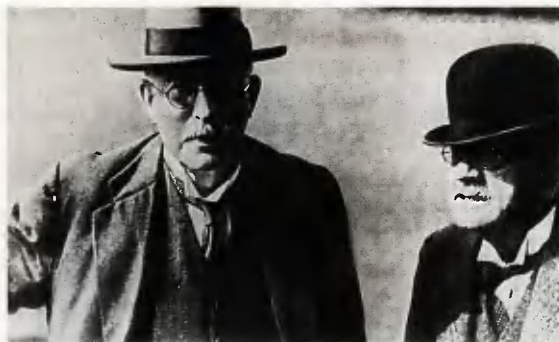
МОДЕЛИ АТОМА

Обнаруженные спектральные закономерности наряду с открытием электрона и радиоактивности неизбежно подводили к мысли, что атом не неделим, что он как-то устроен. И тогда различные учёные стали предлагать модели строения атома, призванные объяснить все эти явления.

Одной из первых таких моделей была теория «вихревого атома», предложенная Уильямом Томсоном (лордом Кельвином с 1892 г.; 1824—1907). В соответствии с ней атом устроен подобно кольцам дыма, выпускаемым изо рта опытным курильщиком. Густав Роберт Кирхгоф говорил: «Это прекрасная теория, потому что она исключает любую другую». Некоторые верили, что «атом кислорода имеет форму кольца, а атом серы — форму лепёшки» и т. д. Но были и другие мнения.

Жан Батист Перрен в 1901 г. рассматривал «нуклеарно-планетарную структуру атома». Он считал, что в центре атома находится положительно заряженная частица, которая окружена определённым количеством электронов, компенсирующих такой заряд. Предполагалось, что эта система зарядов из-за действия внутренних электромагнитных сил является динамически стабильной, а периоды обращения системы связывались с соответствующими частотами (длинами волн) спектра излучающего атома.

Аналогичные соображения высказал в 1904 г. японский физик Хантаро Нагаока (1865—1950), предложивший ещё одну модель атома («атом типа Сатурна»). Он считал, что центральная, положительно заряженная частица окружена электронами, находящимися на равных расстояниях друг от друга и вращающимися с одинаковой угловой скоростью. При этом возникновение линий излучения атома связывалось с малыми поперечными колебаниями электронов.



Джозеф Джон Томсон (справа) и Эрнест Резерфорд.

А в 1908 г. французский физик, математик и философ Жюль Анри Пуанкаре (1854—1912) писал: «Все опыты над проводимостью газов... дают нам основание рассматривать атом как состоящий из положительно заряженного центра, по массе равного приблизительно самому атому, причём вокруг этого центра вращаются, тяготея к нему, электроны».

Однако подобные соображения не были подкреплены экспериментально, носили умозрительный характер и не привели к положительным результатам. В 1903 г. Джозеф Джон Томсон, развивая идеи лорда Кельвина, предложил «капельную» модель атома, или модель «пудинга», которая в своё время широко использовалась. Согласно этой модели, атом — «сфера однородной положительной электризации», внутри которой вкраплено (как изюминки в пудинге) определённое количество электронов, нейтрализующих положительный заряд. То, что атом испускает свет, рассматривалось как результат колебаний электронов около их положений равновесия.

Но модель Джозефа Джона Томсона также оказалась неудачной, прежде всего потому, что электростатическая система зарядов не может быть устойчивой. Кроме того, было совершенно непонятно, как при непрерывно распределённом положительном заряде могут возникать

Ещё, быть может, каждый атом — Вселенная, где сто планет: Там всё, что здесь в объёме сжатом, Но также то, чего здесь нет.

В. Я. Брюсов



Эрнест Марсден.



Ханс Гейгер.

альфа-частицы, имеющие дискретный заряд.

Первые опыты по изучению строения атома проводил Ленард в 1903 г. с помощью катодных лучей — пучка электронов. Если бы атомы представляли собой массивные непроницаемые шарики, то в результате столкновений с ними электроны очень скоро остановились бы. Однако опыты Ленарда показали, что быстрые электроны почти не тормозятся атомами. Отсюда можно было сделать вывод: внутри атома имеется «пустое» пространство. Предложенная Ленардом «динамидная» теория атома также не удовлетворила учёных. Лишь Эрнесту Резерфорду в 1911 г. удалось сформулировать и обосновать экспериментально модель атома, которую называют *ядерной* или *планетарной*. Эта модель привела затем к современным представлениям о строении атома.

ОТКРЫТИЕ ЯДРА

В 1909 г. в кабинет Резерфорда заглянул его ассистент Ханс Гейгер (1882—1945). «Не кажется ли Вам, — обратился он к учёному, — что молодой Марсден, которого я обучаю методам исследования радиоактивности, дол-

жен начать небольшое самостоятельное исследование?» Резерфорд согласился и предложил поручить ему понаблюдать, не рассеиваются ли какие-нибудь альфа-частицы, проходящие через тонкую металлическую фольгу, на большие углы.

Впоследствии Резерфорд признался, что не верил тогда, что из этого может что-либо получиться. «Ведь мы знали, — писал он, — что альфа-частица — это очень быстро движущаяся массивная частица с огромным запасом энергии, и можно было без труда показать, что если рассеяние представляет собой эффект накопления ряда рассеяний на малые углы, то вероятность того, что альфа-частица может претерпеть рассеяние в обратном направлении, ничтожно мала».

Между тем Гейгер и Эрнест Марсден (1889—1970) приступили к экспериментам. В используемой ими установке выпускаемый радиоактивным препаратом узкий пучок альфа-частиц проходил через тонкую фольгу, после чего попадал на экран, покрытый сернистым цинком. При ударе об экран частицы вызывали слабые вспышки света — *сцинтилляции* (от лат. *scintillatio* — «мерцание»), которые можно было наблюдать в темноте через микроскоп. Конструкция прибора позволяла поворачивать микроскоп вместе с экраном вокруг вертикальной оси, проходящей через центр установки, и подсчитывать число альфа-частиц, рассеянных под разными углами θ .

По данным Марсдена и Гейгера, наиболее вероятный угол, на который рассеиваются альфа-частицы при прохождении через тонкую золотую фольгу (её толщина равнялась всего лишь 0,0004 мм), составляет 0,87°. Значит, эти частицы способны проходить через фольгу практически беспрепятственно. Каково же было удивление экспериментаторов, когда они обнаружили, что примерно одна из каждых 20 тыс. альфа-



частиц рассеивается назад, т. е. на угол $\theta > 90^\circ$!

Такой результат потряс Резерфорда. Впоследствии он вспоминал: «Помню... ко мне пришёл весьма возбуждённый Гейгер и сказал: „Нам удалось наблюдать альфа-частицы, возвращающиеся назад“... Это было почти столь же неправдоподобно, как если бы вы произвели выстрел по обрывку папиросной бумаги 15-дюймовым снарядом, а он бы вернулся назад и угодил в вас».

Что же оттолкнуло альфа-частицу назад? Может быть, это результат многократных столкновений частицы с атомами фольги? Вряд ли. Ведь двигаясь сквозь вещество, она испытывала бы в таком случае попеременные отклонения то в одну, то в другую сторону, что в среднем давало бы значение угла рассеяния, близкое к нулю. Вероятность же её отклонения на угол $\theta > 90^\circ$, как показывают расчёты, составила бы при этом чудовищно малую величину $3 \cdot 10^{-2174}$!

После продолжительных размышлений Резерфорд пришёл к выводу: «Поскольку масса, импульс и кинетическая энергия альфа-частицы очень велики по сравнению с соответствующими величинами для электрона, представляется невозможным, чтобы альфа-частица могла отклониться на

большой угол при сближении с электроном. По-видимому, проще всего предположить, что атом содержит центральный заряд, распределённый в очень малом объёме». Этот центральный заряд в 1912 г. Резерфорд назвал *ядром*.

В ходе опытов большинство альфа-частиц проходило вдали от ядра и поэтому слабо отклонялось от первоначального направления движения, а те немногие частицы, которые подходили близко к ядру, испытывали довольно сильное электрическое отталкивание от него и отклонялись на большие углы. Траектории разных альфа-частиц схематично изображены на рисунке (ядро — в виде шарика, b — расстояние между ядром атома и направлением первоначального движения частицы, θ — угол отклонения).

Итак, Резерфорд и его сотрудники установили существование у атома положительно заряженного ядра. Это ядро имеет ничтожно малые размеры — всего лишь 10^{-13} см, что на пять порядков меньше размеров самого атома (10^{-8} см).

На основании проведённых опытов Резерфорд в 1911 г. пришёл к заключению, что строение атома похоже на Солнечную систему. Ядро выполняет роль Солнца, а электроны — планет. Однако, несмотря на экспериментальное подтверждение, работа английского учёного была встречена физиками того времени весьма настороженно.

Строение атома только внешне напоминает Солнечную систему, и эта аналогия довольно обманчива. В противоположность планетам, связанным силами взаимного притяжения, электроны отталкиваются друг от друга. Притяжение Солнцем внешних планет усиливается притяжением внутренних, тогда как в атоме внутренние электроны ослабляют воздействие ядра на внешние, т. е. экранируют его заряд. Планеты сильно отличаются друг от друга по

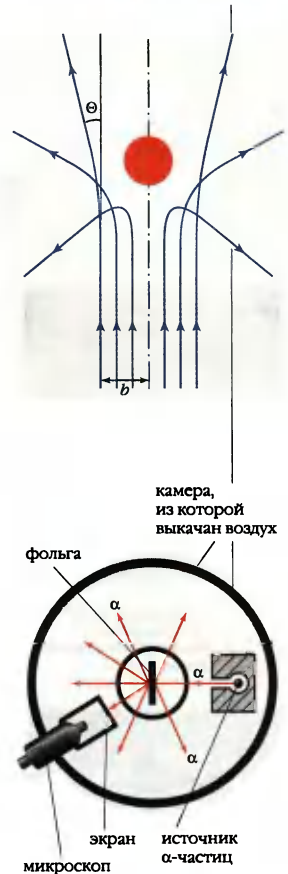
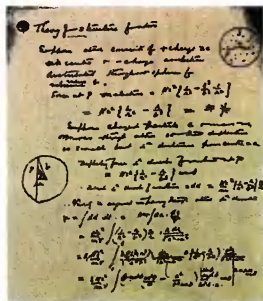


Схема опытов Резерфорда, Гейгера и Марсдена.



Эрнест Резерфорда.



Страница из рукописи Э. Резерфорда, посвящённой строению атома. 1910 г.



«Атомиум». Памятник атомной теории. Брюссель.

многим своим свойствам, а все электроны имеют одинаковые массу и заряд и являются неразличимыми, тождественными частицами.

Однако самый главный недостаток идеи о планетарном строении атома заключается в следующем: система, состоящая из положительно заряженного ядра и обращающихся вокруг него электронов, с точки зрения классической электродинамики неустойчива и, следовательно, существовать не может. В самом деле, по законам электродинамики ускоренно движущийся заряд должен терять свою энергию на излучение, а электрон, вращающийся вокруг ядра, как раз движется с центростремительным ускорением. Поскольку энергия вращающегося электрона связана с радиусом его орбиты, то с уменьшением энергии (вследствие излучения) уменьшается также и радиус орбиты электрона. Процесс излучения происходит непрерывно, и электрон в конце концов должен упасть на положительный центр притяжения. Как

впервые рассчитал немецкий учёный Фридрих Отто Шотт (1851—1935) ещё в 1904 г., это должно произойти практически мгновенно, за время порядка 10^{-11} с. Между тем хорошо известно, что атом является устойчивой системой.

Таким образом, эксперименты Резерфорда создали тупиковую ситуацию. Надо было отказаться либо от электродинамики, либо от планетарной модели. Большинство физиков того времени считали, что не следует отказываться от электродинамики, которая подтверждена многочисленными экспериментами и нашла практическое применение. Поэтому на 1-м Сольвеевском конгрессе в 1911 г., где присутствовали выдающиеся физики Альберт Эйнштейн, Макс Планк, Мария Склодовская-Кюри, Поль Ланжевен и другие исследователи, никто даже не упомянул об идее Резерфорда. Несмотря на обречённость планетарной модели, Резерфорд (которого Пётр Леонидович Капица впоследствии прозвал Крокодилком за то, что он, как грозный крокодил, никогда не поворачивает назад) был убеждён в своей правоте. Он говорил тогда: «Вопрос об устойчивости предложенного атома на этой стадии не нуждается в рассмотрении, потому что, очевидно, устойчивость будет зависеть от тонкой структуры атома и от движения образующих его заряженных частиц». Выход из тупика был найден лишь с помощью квантовой теории атома, первый вариант которой разработал в 1913 г. датский физик Нильс Бор.

АТОМНЫЕ ЯДРА И ИХ ОБИТАТЕЛИ

В 1914 г., спустя три года после открытия атомного ядра, ассистент Эрнеста Резерфорда Эрнест Марсден, пропуская альфа-частицы через воздух, обнаружил в нём отсутствова-

вшие прежде ионы водорода. Марсден предположил, что эти ионы вылетают из радиоактивного препарата вместе с альфа-частицами. Чтобы проверить гипотезу, требовались



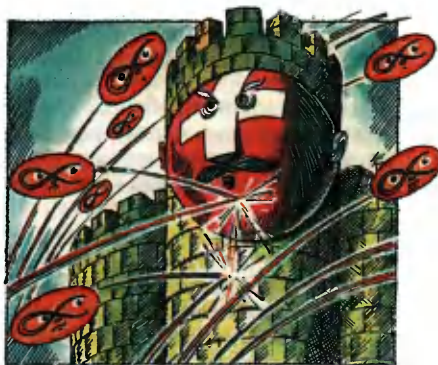
дополнительные исследования. Однако времени на новые опыты уже не оказалось: летом началась Первая мировая война (1914—1918 гг.). Эксперименты проводились нерегулярно, «а в некоторых случаях, — как потом вспоминал Резерфорд, — опыты на длительное время совершенно прекращались».

Через несколько месяцев, получив должность профессора в Веллингтонском колледже, Марсден уехал в Новую Зеландию. Вскоре ему пришло письмо от Резерфорда. «Дорогой Эрн! — писал английский учёный. — Так как явление, которое Вы наблюдали при бомбардировке азота альфа-частицами, чрезвычайно интересно, мне очень хотелось бы, если Вы не возражаете, продолжить эти исследования без Вас». Эрнест Марсден не возражал, и Резерфорд с головой ушёл в работу.

ОТКРЫТИЕ ПРОТОНА

Стремление во что бы то ни стало открыть тайну возникновения ионов водорода настолько овладело Резерфордом, что однажды он даже опоздал на заседание Комитета по военным исследованиям. Нарушение дисциплины в военное время считалось серьёзным проступком. Однако, выслушав замечание, учёный решительно заявил: «Я был занят исследованиями, которые, как мне кажется, могут привести к искусственному расщеплению атома. Если это действительно так, то подобное исследование неизмеримо важнее, чем война!».

В 1919 г. опыты были завершены. Резерфорд оказался прав. При столкновении альфа-частиц с атомными ядрами содержащегося в воздухе азота действительно происходило искусственное расщепление атома азота. «Мы должны сделать вывод, — писал учёный, — что атом азота распадается под действием громадных сил, развивающихся при близком



столкновении с быстрой альфа-частицей»; освобождающееся при этом ядро водорода «образует составную часть ядра азота».

Чтобы получить такой результат, потребовалось несколько лет. Будучи одноимённо заряженными, альфа-частица и ядро азота отталкиваются друг от друга. В итоге соответствующие превращения, как заметил Резерфорд, «происходят в ничтожных масштабах, ибо всего одна α -частица из 50 тысяч приближается к ядру достаточно близко, чтобы быть им захваченной».

Эти и последующие эксперименты привели Резерфорда к убеждению, что ядра водорода являются теми частицами, которые входят в состав ядер всех атомов. Сначала было предложено назвать их «баронами» (от *греч.* «барос» — «тяжёлый»), однако это название не прижилось. Резерфорд предпочёл остановиться на термине «протон», происходящем от *греч.* «протос» («первый», «первичный») и одновременно напоминающем фамилию английского врача Уильяма Праута, ещё в 1815 г. выдвинувшего гипотезу о том, что атомы водорода входят в состав всех остальных атомов.

В атоме водорода (порядковый номер которого $Z = 1$) вокруг ядра, т. е. протона, обращается один электрон. Поскольку в целом атом



Джеймс Чедвик.

нейтрален, значит, электрический заряд протона должен по модулю совпадать с зарядом электрона:

$$q_{\text{протона}} = e.$$

Массы же этих частиц различаются весьма существенно: протон примерно в 1836 раз тяжелее электрона.

Ядра более сложных, чем водород, элементов не могут состоять из одних протонов. Попытаемся, например, «сконструировать» ядро гелия. В атоме гелия ($Z = 2$) вокруг ядра обращаются два электрона. Для компенсации их отрицательного заряда ядро гелия должно содержать два протона. Однако масса атома гелия не в два, а в четыре раза превышает массу атома водорода. Естественно предположить, что число протонов в ядре гелия равно не двум, а четырём. Появившийся при этом излишний положительный заряд можно нейтрализовать двумя электронами, добавив их к протонам, находящимся внутри ядра.

Так возникла протонно-электронная модель строения ядра. Наряду с ней появились и другие. Например, Резерфорд начиная с 1927 г. отстаивал модель, согласно которой в центре ядра тяжёлого элемента находится компактная, положительно заряженная сердцевина (состоящая, по-видимому, из протонов). Вокруг неё (но внутри ядра!) обращаются электроны. Внешнюю часть ядра, по Резерфорду, образуют альфа-частицы, присоединившие к себе по два электрона и обращающиеся вокруг центра атома. Другие учёные предлагали иные схемы распределения составных частей атомного ядра. Общепризнанной картины строения ядра долгое время не существовало. Это дало повод известному российскому физико-академику Оресту Даниловичу Хвольсону (1852—1934) в книге «Физика наших дней» (1930 г.) отметить, что в вопросе о строении атомного ядра «наука в настоящее время ещё далека от его решения».

ОТКРЫТИЕ НЕЙТРОНА

Когда Хвольсон писал эти строки, он и не подозревал, что до важнейших экспериментов, которые в корне изменят представления о строении ядра, оставались считанные месяцы. В том же 1930 г. немецкие физики Вальтер Боте (1891—1937) и Г. Бекер сообщили, что в результате облучения альфа-частицами определённых элементов, в частности бериллия, возникает какое-то излучение, способное проникать через свинцовую пластинку толщиной в несколько сантиметров. Примерно через год французские физики Ирен Кюри (1897—1956) и Фредерик Жолио (1900—1958) (с 1934 г. супруги Жолио-Кюри) показали, что возникающее излучение не обладает электрическим зарядом и, кроме того, способно выбивать из парафина быстро движущиеся протоны. Сообщив о результатах своих исследований, они предположили, что «бериллиевые лучи» представляют собой электромагнитное излучение высокой частоты (гамма-лучи).

Узнав о выводах французских учёных, Резерфорд воскликнул: «Я не верю этому!». Находившийся тогда рядом Джеймс Чедвик (1891—1974) решил выяснить истину и занялся исследованием природы бериллиевого излучения. «Я был уверен, — вспоминал он впоследствии, — что здесь нечто новое и неизвестное. Несколько дней напряжённой работы оказалось достаточно, чтобы показать, что эти странные эффекты обязаны своим происхождением нейтральной частице; мне удалось также измерить её массу».

Масса новой частицы была примерно такой же, как и у протона (она оказалась тяжелее протона лишь на две с половиной электронные массы). Открытая Чедвиком частица не обладала электрическим зарядом, поэтому он предложил назвать её «нейтроном» (от *lat.* *neutrum* — «ни то, ни



другое»), что и утвердилось в науке. За это открытие Чедвик был награждён Нобелевской премией (1935 г.).

ПРОТОННО-НЕЙТРОННАЯ МОДЕЛЬ ЯДРА

Статья с результатами исследований Чедвика была опубликована в феврале 1932 г. Сразу после этого физики Дмитрий Дмитриевич Иваненко (1904—1994) и Е. Н. Гапон в России, а также Вернер Гейзенберг (1901—1976) в Германии почти одновременно предложили протонно-нейтронную модель строения ядра.

Любопытно, что первая верная интерпретация опытов Жоллио и Кюри была дана ещё до выхода в свет работы Чедвика. Её автор — молодой итальянский теоретик Этторе Майорана. Услышав о проведённых опытах, он, обращаясь к стоящему рядом коллеге, воскликнул: «Нет, ты только посмотри на этих идиотов: они открыли нейтральный протон и даже не поняли этого». Первым предложив правильную модель строения ядра, он тем не менее отказался от её публикации (считая свои результаты достаточно очевидными и не совсем полными), и слава первооткрывателя нейтрона и структуры ядра досталась другим. Через шесть лет после этих событий Майорана погиб при таинственных обстоятельствах.

Согласно новой модели, атомное ядро состоит из протонов и нейтронов; электроны же в его состав не входят. Общее число частиц в ядре обозначают буквой A и называют *массовым числом* атомного ядра. По современным представлениям, протон и нейтрон можно рассматривать как два состояния одной и той же частицы, которую называют *нуклоном* (от лат. *nucleus* — «ядро»). И потому можно сказать, что массовое число — это число нуклонов в ядре. Для наиболее распространённых

в природе атомов оно, как правило, приблизительно совпадает с относительной атомной массой соответствующего химического элемента.

Массовое число иначе называют *барионным зарядом* ядра. У протона и нейтрона этот заряд по определению равен 1, у электрона — 0. Введение данного понятия основано на том, что, подобно электрическому, барионный заряд также обладает свойством сохранения. Но на этом сходство и заканчивается.

Число протонов в ядре совпадает с атомным номером Z соответствующего химического элемента. Чтобы найти число нейтронов N в ядре, надо из общего числа A всех частиц в ядре вычесть количество протонов Z в нём:

$$N = A - Z.$$

В отличие от электрона нуклоны не являются точечными частицами: их масса распределена приблизительно равномерно внутри объёма поперечником около 10^{-15} м. Протон стабилен, а свободный нейтрон — нет: его среднее время жизни составляет 900 с.

На первый взгляд вполне может показаться, что с созданием протонно-нейтронной модели все проблемы устройства атомных ядер удалось решить. Но по сути всё обстоит не так. Более того, если бы в ядрах атомов были лишь нуклоны, то ядра не могли бы существовать.

Дело в том, что между одноимённо заряженными протонами внутри ядер действуют значительные силы электрического отталкивания, которые должны были бы «взорвать» все ядра. В действительности такого не происходит. Да и нейтроны, вообще не обладающие электрическим зарядом, почему-то не «вываливаются» из ядер. Может быть, тому препятствуют силы гравитационного притяжения? Нет, простейшие расчёты показывают, что они для этого слишком слабы (гравитационные силы в 10^{36} раз слабее

Этторе Майорана.





сил электрического отталкивания между протонами).

Современная физика объясняет существование атомных ядер действием внутри них особых *ядерных сил*, отличающихся по своей природе и от электрических сил, и от гравитационных. Эти силы уже никак не связаны с электрическими зарядами и при взаимодействии протона с протоном, нейтрона с нейтроном и нейтрона с протоном оказываются одинаковыми.

Ядерные силы есть проявление так называемого *сильного взаимодействия*, на два-три порядка интенсивнее электромагнитного. Но чтобы сильное взаимодействие могло возникнуть, необходимы переносчики этого взаимодействия (кванты ядерного поля) — частицы, из-за обмена которыми и возникает притяжение между нуклонами.

МЕЗОНЫ

Представление об этих частицах было введено в 1935 г. японским физиком Хидоки Юкавой (1907—1981). Используя квантово-механическое соотношение, согласно которому радиус R любого взаимодействия и масса m соответствующего кванта-переносчика обратно пропорциональны друг другу, и принимая R равным размеру атомного ядра, он пришёл к выводу, что масса этих частиц должна примерно в 200—300 раз превышать массу электрона m_e и быть в 10 раз меньше массы протона m_p .

Существование новой, никому не известной частицы в то время казалось настолько маловероятным, что даже сам Юкава, изложив свою теорию, написал: «Так как квант с такой большой массой в эксперименте никогда не наблюдался, то вышеизложенная теория, кажется, находится на ложном пути».

Но спустя три года частицы примерно такой массы ($207 m_e$) действи-

тельно были обнаружены. Это открытие вызвало сенсацию среди физиков. Для новых частиц стали предлагать самые разные названия: «тяжёлый электрон», «лёгкий протон», «юкон», «мезотрон» и, наконец, просто «мезон» (от *греч.* «мезос» — «средний»), оно-то и утвердилось в науке.

Однако дальнейшие исследования показали, что обнаруженные частицы не участвуют в ядерных взаимодействиях и потому к предсказанным Юкавой квантам никакого отношения не имеют. Теперь эти частицы называют *мюонами* (от «мю-мезон»), а название «мезон» (точнее, «пи-мезон» или просто «пион») оставили за квантами ядерного поля.

Настоящие мезоны были открыты значительно позже. Сначала, в 1947 г., удалось обнаружить заряженные пионы π^+ и π^- (массой $273 m_e$), а затем, в 1950 г., был найден и нейтральный пион π^0 (массой $264 m_e$).

Согласно принципам квантовой механики, эти частицы, то и дело возникая и тут же исчезая, образуют вокруг «голого» нуклона что-то вроде облака, называемого мезонной «шубой». Когда два нуклона, окружённые такими «шубами», оказываются на расстоянии 10^{-15} м, происходит обмен пионами и между нуклонами возникает притяжение. И наоборот, при увеличении расстояния между нуклонами обмен пионами прекращается, и ядерные силы быстро убывают до нуля. Имея в виду малый радиус



Хидоки Юкава.
Почтовый блок
государства Сент-Винсент и Гренадины.





действия ядерных сил ($R \approx 10^{-15}$ м), принято говорить, что эти силы являются *короткодействующими*.

Пи-мезоны нестабильны: у заряженных пионов среднее время жизни составляет примерно 10^{-8} с, а у нейтральных — 10^{-16} с. Тем не менее такого, казалось бы, ничтожного времени вполне хватает для выполнения ими связующей роли между нуклонами в ядре. Ведь для этого пи-мезонам достаточно прожить хотя бы время

$$t \approx \frac{R}{c} \approx \frac{10^{-15}(\text{м})}{3 \cdot 10^8(\text{м/с})} \approx 10^{-23}(\text{с})!$$

Открытие ядерных сил позволило объяснить, почему атомные ядра не «взрываются». Но если эти силы такие мощные, то возникает другой вопрос: почему же тогда они не заставляют ядра беспрестанно сжиматься?

Дело в том, что ядерные силы, как показало их последующее изучение, не всегда являются силами притяжения; выяснилось, что у них имеется «отталкивательная сердцевина», или «кор» (англ. core — «сердцевина»). При расстоянии между нуклонами $r < 0,7 \cdot 10^{-15}$ м начинается обмен новыми частицами — так называемыми ω - и ρ -мезонами, вследствие чего между нуклонами возникает не притяжение, а короткодействующее отталкивание.

Кроме того, и протоны, и нейтроны подчиняются *принципу Паули*. (Подробно об этом законе квантовой механики будет рассказано в главе «Основы квантовой физики» в томе «Физика», часть 2, «Энциклопедии для детей».) Отметим, что, согласно данному закону, любые попытки сблизить вплотную описываемые им (одинаковые) частицы и перевести их в одно и то же состояние сопровождаются возникновением сильно-го отталкивания между ними. Оптимальным оказывается «разбавленное» состояние, при котором протоны перемешаны с нейтронами и образуются ядро определённых размеров.

ТАБЛИЦА Д. И. МЕНДЕЛЕЕВА И ИЗОТОПЫ

Как заметил Хвольсон, до 1913 г. таблица Д. И. Менделеева «в физике никакой заметной роли не играла. Это была чистейшая химия». Ситуация изменилась после того, как датский физик Нильс Хенрик Давид Бор (1885—1962) создал квантовую теорию атома, а нидерландский физик Антониус Ван ден Брук (1870—1926) установил физический смысл порядкового номера элемента в этой таблице. (Он оказался равным заряду атомного ядра, выраженному в элементарных зарядах e .)

В 1913 г. было сделано ещё одно важнейшее открытие. Оказалось, что атомы одного и того же химического элемента, ранее считавшиеся абсолютно тождественными, на самом деле могут быть разными, отличаясь друг от друга атомной массой. По предложению английского радиохимика Фредерика Содди (1877—1956) атомы (а также ядра) с одинаковым порядковым номером Z , но разными массовыми числами A стали называть *изотопами* (от греч. «изос» — «равный», «одинаковый», «подобный» и «топос» — «место»).

Изотопы имеются у каждого химического элемента. Например, изотопов водорода три: протий (H), дейтерий (D) и тритий (T). После открытия строения ядра стало ясно, что различные изотопы данного элемента отличаются друг от друга количеством нейтронов в их ядрах. Так, наиболее лёгкий изотоп водорода — протий — вообще не содержит нейтронов, его тяжёлый изотоп — дейтерий — содержит в ядре (помимо протона) один нейтрон, а сверхтяжёлый изотоп водорода — тритий — уже два нейтрона.

Изотопы распространены в природе неодинаково. Например, дейтерий встречается почти в 7 тыс. раз реже, чем обычный водород



Антониус Ван ден Брук.



Фредерик Содди.



«ИСЧЕЗНУВШАЯ» МАССА

Если взвесить картофелину, а затем положить её в мешок с картофелем, станет ли она там легче? Опыт показывает, что нет. Между тем внутри атомного ядра всё происходит иначе. Масса нуклона в нём действительно меньше, чем масса свободного нуклона. Объясняется это тем, что для удаления нуклона из ядра необходимо затратить энергию E на преодоление ядерных сил притяжения. Энергия передаётся удаляемой частице. Но, согласно теории относительности Эйнштейна, энергия связана с массой по закону: $E = mc^2$ (где c — скорость света в вакууме). Поэтому при увеличении энергии частицы возрастает и её масса. Таким образом, масса нуклона «на свободе» оказывается больше, чем внутри ядра, а масса самого ядра M — меньше суммы масс $\sum m_i$ соответствующих свободных нуклонов. Разность $\Delta M = \sum m_i - M$ называется **дефектом массы** атомного ядра. Соответствующее уменьшение массы ядра, правда, невелико: оно не превышает 1 %.



(протий), а тритий самопроизвольно распадается, так что в естественных условиях его просто нет.

Открытие изотопов позволило объяснить, почему относительные атомные массы химических элементов отличаются от целых чисел, причём иногда весьма существенно. Дело в том, что их значения, которые можно найти в таблице Д. И. Менделеева, представляют собой усреднённую атомную массу всех изотопов данного элемента с учётом того, как часто тот или иной изотоп встречается в природе. Например, атомная масса хлора равна 35,45, поскольку при-

родный хлор состоит из двух изотопов с массовыми числами 35 (76 %) и 37 (24 %).

Следующий после водорода элемент — гелий (He). Существует два его изотопа с массовыми числами 3 (0,00014 %) и 4 (99,99986 %). Ядро наиболее распространённого изотопа гелия состоит из двух протонов и двух нейтронов. Оно как раз и является той самой альфа-частицей, с чьей помощью началось проникновение исследователей микромира внутрь атомного ядра.

Затем идёт литий (Li), 92,5 % которого составляет изотоп с массовым числом 7. В его ядре уже 3 протона и 4 нейтрона и т. д.

Каждое атомное ядро характеризуется определённым оптимальным соотношением между числом протонов Z и числом нейтронов N . Между нейтронами существуют лишь короткодействующие ядерные силы, а между протонами — ещё и дальнodayствующее электрическое отталкивание. У лёгких ядер энергия ядерного притяжения нуклонов значительно превышает энергию их электрического взаимодействия. Например, для ядра атома гелия **энергия связи** (минимальная энергия, необходимая для его полного расщепления на отдельные нуклоны) составляет 28 МэВ, в то время как энергия электрического отталкивания протонов равна всего лишь 0,3 МэВ. По этой причине лёгкие ядра не «нуждаются» в избыточном количестве нейтронов, и в большинстве случаев у таких ядер оказывается $N \approx Z$. Однако по мере перехода к более тяжёлым ядрам, где много протонов, энергия электрического взаимодействия непрерывно увеличивается (причём быстрее, чем энергия ядерного притяжения) и его роль внутри ядра возрастает. При этом энергетически более выгодным становится превышение числа нейтронов над количеством протонов, поскольку, внедряясь между протонами, нейтроны ослабляют их взаимное





ЯДЕРНАЯ «АЛХИМИЯ»

Протон был открыт Резерфордом при осуществлении реакции $\alpha + N \rightarrow O + p$. Таким образом, впервые воплотилась мечта средневековых алхимиков: один элемент (в данном случае азот) был превращён в другой (кислород). Впоследствии подобные преобразования стали привычными. Недаром одну из своих лекций Резерфорд так и назвал — «Современная алхимия». И теперь даже золото можно получить искусственным путём (правда, оно будет стоить баснословно дорого).

Основой «современной алхимии» является столкновение ядер различных химических элементов друг с другом. В результате их взаимодействия и образуются новые элементы. Это могут быть осколки сталкивающихся ядер, ядро, получившееся в результате их слияния, и даже осколки ядра, возникшего в ходе слияния.

Процессы, при которых из каждого ядра образуются два-три более лёгких ядра, называются *реакциями деления*, а процессы, при которых новые ядра образуются в результате слияния более лёгких ядер, — *реакциями синтеза*. Реакции деления протекают в ядерных реакторах на атомных электростанциях, а также при взрывах атомных бомб; реакции синтеза — при взрывах водородных бомб и в недрах большинства звёзд (включая Солнце), благодаря чему они способны в течение миллиардов лет излучать свет.

Для осуществления ядерных превращений в лабораторных условиях нужны достаточно большие энергии налетающих частиц. Этого добиваются с помощью электри-

ческих полей, которые разгоняют заряженные частицы в специальных установках — *ускорителях*. Чтобы использовать действие таких полей многократно, ядра обычно заставляют двигаться по окружности (или раскручивающейся спирали) с помощью сильного магнитного поля, направленного перпендикулярно плоскости движения частиц. В самых мощных современных ускорителях наибольший радиус такой окружности достигает нескольких километров, а ядра ускоряются до энергии в сотни ГэВ на каждый нуклон.

Используя эту уникальную технику, физики научились искусственно синтезировать даже такие тяжёлые ядра (вплоть до 118-го элемента), которые в естественном виде в природе не встречаются, поскольку они нестабильны и очень быстро распадаются на более лёгкие ядра.



отгалкивание. Например, в ядре атома золота $Z = 79$, а $N = 118$; в ядре атома урана $Z = 92$, а $N = 146$.

Но с дальнейшим увеличением избытка нейтронов становится существенным то, что сами нейтроны в силу принципа Паули не испытывают «желания» скапливаться вплотную друг к другу. Поэтому очень тяжёлые

ядра (их называют *трансурановыми*, так как в таблице Менделеева они расположены за ураном) не могут быть стабильными ни при каком соотношении между числом протонов и нейтронов. Для них становится энергетически выгодно, испустив альфа- или бета-частицу, превратиться в другие, более устойчивые ядра.

ВЕЧНЫЕ «ПЛЕННИКИ»

Первая половина XX столетия ознаменовалась открытием строения вещества. Оказалось, что молекулы состоят из атомов, в центре атомов находятся ядра, внутри ядер — нуклоны. Означало ли это, что найден наконец предел деления материи?

Или нуклоны тоже имеют сложное строение?

Поиски ответов на эти вопросы заняли несколько десятилетий. К середине 60-х гг. было открыто много новых частиц. Причём оказалось, что каждой из них соответствует своя



ЗООПАРК ЭЛЕМЕНТАРНЫХ ЧАСТИЦ

В начале 30-х гг. XX в. казалось, что мир построен лишь из четырёх «элементов»: света (фотонов), протонов, нейтронов и электронов. Из протонов, нейтронов и электронов можно было сконструировать любой атом, а из атомов — всё остальное.

Однако эта простота была иллюзорной. Чтобы объяснить ядерные силы, потребовались пи-мезоны, а чтобы объяснить радиоактивность (так называемый бета-распад ядер) — нейтрино. К тому же после открытия позитронов с мюонами число известных элементарных частиц с четырёх выросло до десяти. Через некоторое время обнаружили ещё столько же, а потом новые частицы посыпались как из рога изобилия!

Открытие частицы требовалось как-то систематизировать. С этой целью их разделили на два класса: те, которые способны участвовать в сильных (ядерных) взаимодействиях, и все остальные. Первые по предложению российского физика-теоретика Льва Борисовича Окуня были названы *адронами* (от греч. «адрос» — «большой», «сильный»). Именно они составляют наиболее многочисленную группу частиц. Правда, большинство из них — так называемые *резонансы* (лат. *resonans* — «дающий отзвук») — живут ничтожно малое время (порядка 10^{-23} с), после чего распадаются на другие частицы, среднее время жизни которых существенно больше.

Ко второму классу частиц относятся *лептоны* (от греч. «лептос» — «тонкий», «лёгкий»), типичным представителем которых является электрон (e^-). Помимо электрона сюда входят ещё пять частиц: мюон (μ^-), тау-лептон (τ^-) и три типа нейтрино (электронное ν_e , мюонное ν_μ и таонное ν_τ).

Отдельные элементарные частицы отличаются друг от друга массой, электрическим зарядом, средним временем жизни и рядом других характеристик. Одной из них является так называемый *спин* (англ. *spin* — «вращаться», «вертеться») — собственный вращательный момент частицы. Классического аналога у спина нет. Его природа — квантовая, поэтому для каждой частицы он имеет определённое постоянное значение.

Спин частицы выражается через фундаментальную константу квантовой теории — постоянную Планка $\hbar$. Частицы с полуцелым спином (в единицах $\hbar$) называют *фермионами*, по имени итальянского физика Энрико Ферми (1901—1954), а частицы с целым спином (включая нуль) — *бозонами*, по имени индийского учёного Шатъендраната Бозе (1894—1974).

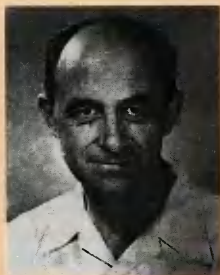
В то время как все лептоны являются фермионами, среди адронов есть как те, так и другие. Адроны, имеющие полуцелый спин, называются *барионами*, остальные — *мезонами*. К барионам, например, относятся протоны и нейтроны (спин $1/2$); к мезонам — пионы (спин 0).

По образному выражению Льва Окуня, «фермионы — „индивидуали-

сты“, бозоны — „коллективисты“: на данном энергетическом уровне может находиться не более одного фермиона с данной проекцией спина. Именно этим объясняется то, что электроны в атомах не сидят все на самом нижнем энергетическом уровне, а по мере роста заряда ядра заполняют всё более далёкие от ядра оболочки, формируя таким образом таблицу Менделеева. Бозоны, наоборот, все стремятся попасть в одно и то же состояние».

Закон, согласно которому два (и более) одинаковых (тождественных) фермиона не могут одновременно находиться в одном и том же состоянии, получил название *принципа Паули*, по имени установившего его выдающегося швейцарского физика-теоретика Вольфганга Паули (1900—1958).

Объяснить многообразие частиц, которых с каждым годом становилось всё больше и больше, оказалось очень сложно. По сравнению с законченными пропорциями механики Ньютона и изящными арками электродинамики Максвелла физика элементарных частиц, по словам американского учёного-теоретика Леона Купера (родился в 1930 г.), стала напоминать беспорядочную мастерскую: «здесь колонна, тут незаконченный фриз, и везде хаос битых и разбросанных камней». Постепенно, однако, эти груды камней сложились в прочный и надёжный фундамент, и взору естествоиспытателей открылись глубинные основы нашего мира.



Энрико Ферми.



Шатъендранат Бозе.



Вольфганг Паули.



античастица, т. е. частица с точно такой же массой, но с противоположным по знаку зарядом. Например, наряду с отрицательно заряженным электроном e^- существует положительно заряженный антиэлектрон (позитрон) e^+ , открытый ещё в 1932 г. американским физиком Карлом Дэвидом Андерсоном (1905—1991). Помимо положительно заряженного протона p имеется отрицательно заряженный антипротон $\bar{p}$ и т. д.

Общее число открытых частиц приблизилось к двум сотням. Некоторые из них были предсказаны существующими теориями, иные же, по словам американского физика-теоретика Мюррея Гелл-Манна (родился в 1929 г.), оказались «подкидышами, найденными на пороге дома». Мир элементарных частиц стал напоминать своеобразный зоопарк, в котором царит полный беспорядок. Было непонятно, какая закономерность организует жизнь этого зоопарка. Почему та или иная частица имеет именно такую, а не другую массу, почему частица распадается очень медленно или, наоборот, быстро и при этом охотно распадается на одни частицы и неохотно — на другие?

Обилие разных частиц порождало чувство неудовлетворённости: их уже трудно было считать просто элементарными частицами. Требовалась новая идея, которая позволила бы навести в этом зоопарке хотя бы какой-то порядок. И такая идея появилась. В 1964 г. Мюррей Гелл-Манн и независимо от него Джордж Цвейг (родился в 1937 г. в Москве, с 1938 г. живёт в США) выдвинули гипотезу, согласно которой все адроны построены из трёх фундаментальных частиц с дробным электрическим зарядом. По предложению Гелл-Манна они были названы *кварками* (Цвейг называл их «тузами», однако этот термин не прижился).

Впоследствии число кварков пришлось увеличить с трёх до шести. Такого количества оказалось доста-



точно, чтобы просто и естественно привести многообразие адронов в стройную систему, объяснить все наблюдаемые в этом многообразии симметрии, а также предсказать существование и массы ещё многих частиц, которые были позднее обнаружены экспериментально. В результате то, что недавно казалось каким-то неблагоустроенным зоопарком, объединилось теперь в стройные ряды, где каждой частице отведено строго определённое место и указано, в каких отношениях она должна находиться со всеми остальными частицами. Уже одного этого было более чем достаточно, чтобы поверить в реальность гипотезы о кварковой структуре адронов. Становилось очевидно: достигнутая с помощью кварков превосходная систематика в мире частиц не может быть случайной и непременно должна обладать глубоким смыслом.

Мюррей Гелл-Манн.



АРОМАТЫ И ЦВЕТА КВАРКОВ

Итак, все адроны построены из кварков. Их характеристики представлены в таблице. Всего различают шесть видов кварков (и столько же антикварков). Барионный заряд



каждого из них равен $+1/3$. Электрические заряды кварков тоже являются дробными (по отношению к элементарному заряду, равному заряду протона e): кварки u , c и t имеют заряд $+2/3$, а кварки d , s и b — за-

ряд $-1/3$. Обозначения кварков произошли от английских слов *up* («верхний»), *down* («нижний»), *strangeness* («странность»), *charm* («очарование»), *beauty* («красота»), *truth* («истинность»). Эти слова играют роль при-

ТРИ КВАРКА ДЛЯ МАСТЕРА МАРКА

В своей статье, где вводилось понятие кварков (англ. quark), Мюррей Гелл-Манн сослался на роман ирландского писателя Джеймса Джойса (1882—1941) «Поминки по Финнегану». В 1964 г. думали, что кварков только три (u , d , s), а в романе Джойса в одном-единственном месте есть фраза: «Three quarks for Master Mark!» (англ. «Три кварка для мастера Марка!»). По мнению Гелл-Манна, который был известен не только как выдающийся физик, но и как великолепный лингвист, знаток многих языков, она и соответствовала смыслу понятия «кварк». Дело здесь не только в непосредственном упоминании числа «три». За этой фразой в романе кроется многое...

Джойс писал роман 17 лет, с 1922 по 1939 г. Роман целиком построен на словотворчестве, и читать его чрезвычайно трудно даже англичанам. Тем более невозможен его перевод на другие языки (даже перевод на русский язык значительно более «лёгкого» романа Джойса «Улисс» потребовал титанических усилий со стороны Сергея Хоружего, кстати говоря физик-теоретик, специалиста по квантовой теории поля). В Англии существуют общества любителей книги «Поминки по Финнегану», которые получают особое удовольствие, расшифровывая содержащиеся в ней бесчисленные словесные ребусы и спрятанный в них юмор. Объём комментариев к книге намного превышает объём самого романа, и в них скрупулёзно рассматривается возможный смысл каждого слова. Одним из ребусов (сравнительно лёгких) является песенка, где упоминаются кварки.

Своё название роман получил благодаря вошедшей в ирландский фольк-



лор шуточной истории о том, как некий пьяница Финнеган свалился с лестницы. Друзья сочли его мёртвым, собрались вокруг него и стали поминать. Кто-то из друзей сбрызнул Финнегана виски, после чего тот ожил, и вся компания снова начала веселиться.

Таким образом, уже в этой истории звучит мотив возрождения, пере-

рождения, который становится основным в книге. Главный герой романа Хэмфри по ходу действия перевоплощается во множество лиц, в том числе в трёх своих детей — сыновей Шема и Шауна и дочь Изольду (здесь возникает аналогия с протоном, состоящим из трёх кварков). Приведённое начало песенки относится к тому месту романа, где главный герой засыпает и ему чудится, что он — король Марк, пославший за своей невестой Изольдой свадебный корабль, на борту которого находился его племянник — рыцарь Тристан. Тристан и Изольда полюбили друг друга. Чайки, выющиеся над кораблём, издеваются над обманутым королём Марком, поют шуточную и довольно двусмысленную песенку. Судя по дальнейшим её строкам, слова «три кварка» означают, что король Марк был обманут на корабле трижды.

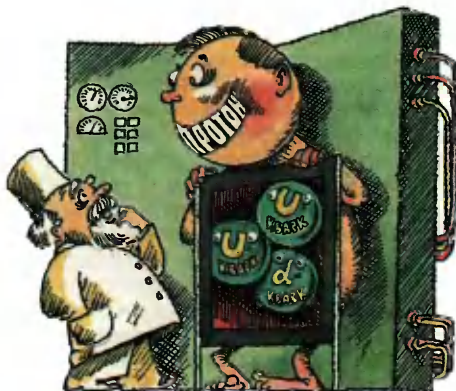
На самом деле в английском языке слова quark нет, но оно есть в немецком языке, в котором означает буквально «творог», а в переносном смысле — «чепуха», «ерунда». Конечно, сейчас многие уже забыли, откуда взялось слово «кварк». Этот термин стал совершенно привычным, вошёл в обиход физиков всего мира, упоминается в школьных учебниках. Однако и в настоящее время кварки ещё таят много загадок, что вполне соответствует таинственности самого слова, придуманного Джойсом и столь удачно использованного Гелл-Манном.



сущего данному кварку специфического квантового числа, которое принято называть *ароматом*, хотя к парфюмерии он, разумеется, никакого отношения не имеет. В отличие от электрического заряда аромат всех кварков, кроме *u* и *d*, не сохраняется (можно сказать, улетучивается с течением времени), но является весьма стойким по отношению к типичному ядерному времени 10^{-23} с. Этим объясняется постепенный, но неизбежный переход последних четырёх кварков в первые два.

«Конструирование» адронов из кварков осуществляется следующим образом. Каждый барион (антибарион) состоит из трёх кварков (антикварков), а все мезоны — из кварк-антикварковых пар. Например, протон состоит из двух *u*-кварков и одного *d*-кварка, нейтрон — из одного *u*-кварка и двух *d*-кварков, π^+ -мезон — из *u*-кварка и $\bar{d}$ -антикварка и т. д. Коротко это записывают так: $p = uud$, $n = udd$, $\pi^+ = u\bar{d}$...

Конечно, это был огромный, но всё-таки довольно формальный успех. Вскоре, однако, он наполнился физическим содержанием — реальность кварков была подтверждена экспериментально. Метод, который для этого использован, по сути своей тот же, что и в опытах Резерфорда, — изучение столкновений частиц. Ключевыми здесь стали два процесса: столкновение электрона с позитроном, в результате которого эти частицы исчезают (аннигилируют) и вместо них возникают адроны, и так называемое глубоконеупругое рассеяние электронов на протонах. Последнее по существу представляет собой не что иное, как прямое «просвечивание» протонов электронами высокой энергии. Такие эксперименты показали, что внутри адронов действительно имеются некие точечные (бесструктурные) образования. Вначале их называли *партонами* (от *англ.* part — «часть»), а впоследствии отождествили с кварками.



ЦВЕТНЫЕ КВАРКИ И ПРИНЦИП ПАУЛИ

Нуклоны обладают спином, равным $1/2$. Чтобы получить данное значение как результат суммирования спинов отдельных кварков, следует признать, что у последних он тоже равен $1/2$. (При сложении спинов необходимо учитывать, что у одного из трёх кварков, образующих нуклон, он антипараллелен спинам двух других кварков.) Но если это так, значит, кварки являются фермионами и потому подчиняются принципу Паули. Между тем при попытках построения барионов со спином $3/2$ приходится допустить: некоторые из них (например, Ω^- -гиперон) состоят из трёх одинаковых кварков с параллельными спинами ($1/2 + 1/2 + 1/2 = 3/2$), что явно противоречило такому принципу.

Чтобы устранить это противоречие, в 1965 г. японские физики Йонитиро Намбу (родился в 1921 г., с 1971 г. работает в США) и его ученик М. Хан, а также российские учёные Николай Николаевич Боголюбов (1909—1992), Борис Владимирович Струминский (родился в 1939 г.) и Альберт Никифорович Тавхелидзе (родился в 1930 г.) высказали предположение: каждый из кварков характеризуется ещё одним квантовым числом, которое может принимать три разных значения. По предложению Гелл-Манна новую величину назвали «цветом». Причём в качестве отдельных значений цвета иногда выбирают красный *R* (*англ.* red), зелёный *G* (*англ.* green) и синий *B* (*англ.* blue), а иногда красный *R*, синий *B* и жёлтый *Y* (*англ.* yellow). Выбор цветов не случаен: в оптике они считаются взаимно независимыми и образующими при сложении белый цвет. Цвет антикварков тоже выбирают таким, чтобы при «смешении» с цветом соответствующего кварка снова получился белый цвет.

После этих нововведений кварковая теория пополнилась тремя новыми правилами.

1. Каждый барион состоит из трёх кварков, различающихся по цвету.
2. Каждый мезон состоит из всевозможных цветных пар кварков и антикварков.
3. Все реально наблюдаемые адроны должны быть белыми (бесцветными).

Мы живём в бесцветном мире — таков неожиданный вывод, который был сделан на основе кварковой теории строения адронов.



Помимо аромата каждый кварк должен обладать ещё и совершенно особым зарядом. Причин его введения много, но главная заключается в том, что необходимо понять, какие же силы удерживают кварки внутри адронов. Оказалось, этот заряд нельзя обозначить знаками «+» и «-», так как он может принимать не два, а три значения. Раньше с чем-то подобным приходилось встречаться только в оптике, где, как известно, есть три основных цвета, из которых соответствующим подбором можно составить все остальные (на этом основана система цветного телевидения). И потому новый заряд решено было назвать *цветом*. Тем самым кварки как бы «покрасили»: каждый из них может выступать в трёх ипостасях — быть красным, жёлтым или синим. Такие названия, конечно, условны и к обычным (оптическим) цветам никакого отношения не имеют.

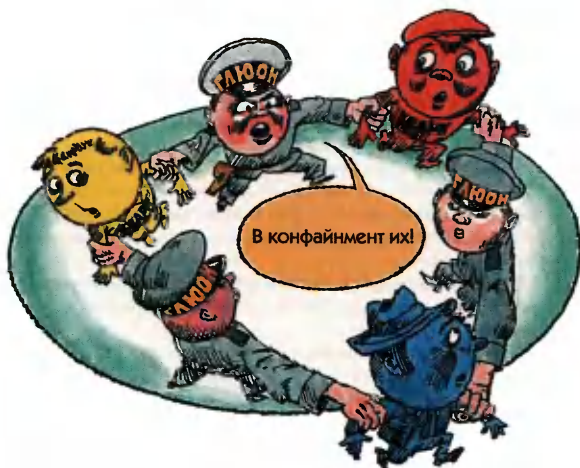
«ТЮРЕМНОЕ ЗАКЛЮЧЕНИЕ»

Так как у кварков есть цветовые заряды, должны быть и соответствующие агенты — частицы, которые осуществляли бы взаимодействие

между ними, подобно тому как это делают фотоны в электромагнитных взаимодействиях. Они должны обеспечивать рассеяние кварков и их всевозможные переходы друг в друга. Оказалось, что для осуществления этих процессов нужно восемь новых частиц. Новые частицы были названы *глюонами* (от *англ.* glue — «клей»). Стало быть, глюоны — это своего рода клей, которым скреплены кварки. Подобно фотонам, глюоны электронейтральны, не имеют массы и обладают спином, равным 1. Но есть у них и особенность: они несут цветовой заряд и, следовательно, в отличие от фотонов могут непосредственно взаимодействовать друг с другом. Цветовые заряды глюонов весьма своеобразны: они всегда являются комбинациями зарядов кварка и антикварка.

Сильное взаимодействие глюонов между собой приводит к эффекту невылетания кварков из адронов. Иначе его называют английским словом *конфайнмент* (confinement переводится как «пленение», «тюремное заключение»). Оказалось, на очень малых расстояниях друг от друга ни один из кварков «не замечает» соседей, и они ведут себя как свободные, невзаимодействующие частицы. При удалении кварков друг от друга между ними возникает притяжение, которое с увеличением расстояния не ослабевает (как у обычных сил), а, наоборот, возрастает. Согласно расчётам, на расстоянии $r = 10^{-15}$ м энергия взаимодействия кварков составляет примерно 1 ГэВ, при $r = 10^{-14}$ м она равна уже 10 ГэВ, а при $r = 1$ см энергия достигает 10^{13} ГэВ!

Таким образом, чтобы разделить адроны на отдельные изолированные кварки, потребовалась бы бесконечно большая энергия. Поскольку такой энергией располагать невозможно, кварки оказываются вечными «пленниками»: им суждено навсегда оставаться «запертыми» внутри адронов.





Но если адроны невозможно разделить на составные части, то имеет ли смысл говорить об их сложном строении? Повседневный опыт свидетельствует, что если предмет из чего-нибудь состоит, то его всегда можно разделить на части и каждую рассмотреть и исследовать по отдельности. Сруб можно разобрать на брёвна, дом — на кирпичи, и даже атомные ядра, как известно, разбиваются на составляющие их нуклоны.

Однако, дойдя до нуклонов, мы сталкиваемся с удивительной и парадоксальной ситуацией. Нуклоны (и вообще адроны) оказались далее неделимыми и в то же время имеющими сложный состав.

Кварки удерживаются внутри адронов глюонным полем. Если удалять кварки друг от друга, это поле сжимается в тонкую трубку (струну). При дальнейшем разлетании кварков она натягивается, а при расстоянии около 10^{-15} м между ними рвётся. В месте разрыва возникает кварк-антикварковая пара, образующая совместно с начальными кварками два бесцветных адрона. В результате разъединения кварков, образующих адроны, снова образуются адроны, а не отдельные свободные кварки.

Например, когда электрон сталкивается с протоном и испытывает сильную отдачу, то переданный им импульс часто воспринимается не целым протоном, а лишь его частью — одним из кварков. Он начинает удаляться от остальных. Но его взаимодействие с другими кварками при этом возрастает настолько, что происходит рождение кварк-антикварковых пар, т. е. новых адронов, летящих струей в направлении переданного импульса. Если импульс достаточно велик, кварк иногда может по дороге испустить глюон, который, будучи цветным, тоже сам по себе нежизнеспособен и превращается ещё в одну струю адронов. Таким образом глюон доказывает, что и он тоже не миф, а реальная частица.



СВОБОДНЫЕ КВАРКИ?

Занятие наукой обязывает всё подвергать сомнению. И если 1000 экспериментов подтверждают гипотезу, которая вполне прижилась и уже стала считаться теорией, это ещё не значит, что в 1001-м эксперименте всё пройдет так же гладко. Особенно это относится к бесконечно далёким от повседневного опыта фундаментальным первоосновам строения материи. И потому физики по-прежнему ищут свободные кварки. Поскольку когда-то, «на заре туманной юности» Вселенной, материя была фантастически плотной и горячей, в ней бушевали такие энергии, каких мы никогда не получим в лабораторных условиях. И если тогда неким кваркам всё же удалось избежать «железных объятий» конфайнмента, то они почти наверняка где-нибудь существуют до сих пор. Ведь каждый из них может навсегда утратить свободу, только встретив такой же «реликтовый» антикварк (или сразу два подходящих по заряду кварка). Однако вероятность подобных событий слишком мала.

Так существуют ли свободные кварки? Это неизвестно. Сегодня с уверенностью можно только сказать, что число свободных кварков, если они есть, не превышает 10^{-28} от числа существующих протонов.



ЧЕТЫРЕ «СТИХИИ» ПРИРОДЫ

В одной из своих лекций лауреат Нобелевской премии по физике пакистанец Абдус Салам (1926—1995) заметил: «Издавна человек стремился познать и понять окружающий его физический мир. На протяжении долгой истории этого познания он всегда верил, что окончательное решение будет законченным и лаконичным в своих исходных принципах. Исследования развивались в двух направлениях: с одной стороны — поиски элементарных составляющих, из которых образовано всё вещество, а с другой — разработка идей, которые позволили бы унифицировать наши представления о силах, действующих между этими элементарными составляющими». В первом случае, по образному выражению американского физика-теоретика Ричарда Фейнмана (1918—1988), речь идёт «о колёсиках внутри колёс», а во втором — о силах, которые «крутят и связывают колёсики друг с другом».

Избрав второй путь, учёные пришли к такому удивительному выводу: оказывается, всё бесконечное разнообразие физических процессов, про-

исходящих в нашем мире, можно объяснить существованием в природе очень малого количества фундаментальных взаимодействий. Это гравитационное, электромагнитное, сильное и слабое взаимодействия. Именно они являются теми «стихиями», которые движут небесными телами, порождают свет и делают возможной саму жизнь.

ГРАВИТАЦИОННОЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ

Это взаимодействие является наиболее всеобъемлющим. Ему подвержены все материальные объекты без исключения — и микрочастицы, и макротела. Проявляется оно в виде всемирного тяготения. Согласно закону, открытому в 1687 г. великим английским учёным Исааком Ньютоном, все тела притягиваются друг к другу с силой, пропорциональной их массам и обратно пропорциональной квадрату расстояния между ними. Масса при этом играет роль гравитационного заряда, который оказывается всегда положительным.

Гравитация (от *лат.* *gravitas* — «тяжесть») управляет наиболее глобальными процессами во Вселенной, в частности обеспечивая строение и стабильность нашей Солнечной системы. Приближённой теорией этого взаимодействия (в случае медленного движения тел и не слишком большой интенсивности взаимодействия) является ньютоновская теория тяготения, а более точной — общая теория относительности, созданная Альбертом Эйнштейном в 1916 г.

Согласно современным представлениям, каждое из взаимодействий возникает в результате обмена частицами, называемыми переносчиками этого взаимодействия. Гравитационное взаимодействие осуществляется





посредством обмена *гравитонами*. Это не имеющие массы частицы со спином, равным 2, которые не способны находиться в покое и распространяются всегда с максимальной возможной скоростью — скоростью света в вакууме.

Хотя гравитоны ищут уже давно, они пока не проявились непосредственно при эксперименте. Причина заключается в том, что при обычных плотностях материи, типичных для земных условий, гравитационное взаимодействие чрезвычайно слабо, и от эксперимента требуется ювелирная точность, которая ещё не достигнута.



ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ

Электромагнитное взаимодействие, как и гравитационное, по своей природе длиннодействующее: соответствующие силы могут проявляться на очень значительных расстояниях. Как установил в 1785 г. французский инженер и физик Шарль Огюстен Кулон (1736—1806), эти силы убывают обратно пропорционально квадрату расстояния между частицами.

Электромагнитное взаимодействие описывается зарядами одного типа (электрическими), но эти заряды уже могут иметь два знака — положительный и отрицательный. В отличие от тяготения электромагнитные силы способны быть как силами притяжения, так и силами отталкивания.

От взаимодействия между электрически заряженными частицами зависит структура атомов и молекул, а значит, в конечном счёте и то, что окружающий мир таков, каков он есть. Физические и химические свойства разнообразных веществ, материалов и самой живой ткани обусловлены именно этим взаимодействием. Оно же приводит в действие всю электрическую и электронную аппаратуру.

Теория электромагнитного взаимодействия в макромире называется классической электродинамикой. В её разработке принимали участие многие учёные XVIII—XIX вв., однако решающий вклад в её создание внёс выдающийся английский физик Джеймс Кларк Максвелл (1831—1879). Именно он объединил электричество, магнетизм и свет в рамках единой концепции электромагнитного поля.

И всё же механизм электромагнитных процессов стал понятен лишь с возникновением квантовой электродинамики — теории, объясняющей эти процессы на уровне микромира. За её разработку японский физик-теоретик Синъитиро Томонага (1906—1979), а также американские учёные Юлиан Сеймор Швингер (1918—1994) и Ричард Филлипс Фейнман в 1965 г. были награждены Нобелевской премией.

Согласно квантовой электродинамике, переносчиками электромагнитного взаимодействия являются кванты электромагнитного поля — фотоны. Это не имеющие массы частицы со спином 1, которые движутся со скоростью света c . В результате обмена этими частицами и возникает электромагнитное взаимодействие между заряженными телами.

Шарль Огюстен Кулон.





СИЛЬНОЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ

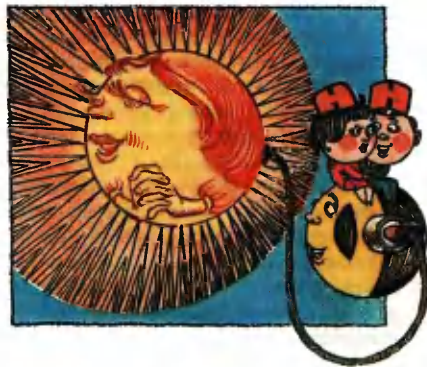
Сильное взаимодействие — самое мощное из всех остальных (чем и объясняется его название). *Ядерные силы*, действующие между нуклонами в атомном ядре, — проявление этого взаимодействия. Здесь оно примерно в 100 раз сильнее электромагнитного. В отличие от последнего (а также гравитационного) сильное взаимодействие, во-первых, короткодействующее — соответствующие силы очень быстро убывают по мере увеличения расстояния между частицами. Радиус действия сильных взаимодействий порядка размеров нуклона — 10^{-13} см. Во-вторых, его удаётся удовлетворительно описать только посредством трёх зарядов (цветов), образующих сложные комбинации. Частицы, которым оно присуще, называют адронами.

Переносчики сильного взаимодействия — восемь «цветных» глюонов, обладающих спином 1 и нулевой массой покоя.

Теория сильного взаимодействия называется квантовой *хромодинамикой* (от греч. «хрома» — «цвет», «краска» и «динамис» — «сила»). В частности, именно эта теория объясняет взаимодействие кварков и глюонов внутри нуклонов.

СЛАБОЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ

Слабое взаимодействие менее известно за пределами узкого круга физиков и астрономов, но это никоим образом не умаляет его значения. Достаточно сказать, что, если бы его не было, погасли бы Солнце и другие звёзды, ибо в реакциях, обеспечивающих их свечение, слабое взаимодействие играет очень важную роль. Одной из таких реакций является «сгорание протонов» с образованием дейтрона d (ядра тяжёлого изо-



топа водорода), позитрона e^+ и электронного нейтрино ν_e :

$$p + p \rightarrow d + e^+ + \nu_e.$$

Для последней частицы именно слабое взаимодействие является родной стихией, так как помимо гравитационного (которое, как уже упоминалось выше, обязательно для всех частиц) нейтрино участвует только в этом взаимодействии.

Взаимодействие нейтрино с веществом столь слабо, что даже Земля, встретившаяся на пути таких частиц, оказывается для них более прозрачной, чем тонкое оконное стекло — для видимого света! Именно поэтому они были открыты лишь спустя два десятилетия с момента их предсказания.

Нейтрино является фермионом — частицей со спином $1/2$. Ни электрического, ни барионного, ни цветового заряда у нейтрино нет.

Известны три типа нейтрино: электронное (ν_e), мюонное (ν_μ) и таонное (ν_τ). Все они (наряду с соответствующими им электроном, мюоном и таоном) принадлежат к классу лептонов. Поэтому, подобно остальным лептонам, нейтрино обладают лептонным зарядом. Данный заряд может принимать лишь два значения: +1 для лептонов и -1 для антилептонов. Статус лептонного заряда такой же, как и у барионно-



го заряда, — во всех известных взаимодействиях он всегда сохраняется (хотя у физиков нет полной уверенности, что так должно быть всегда).

До сих пор нельзя сказать определённо, есть ли у нейтрино масса. Согласно экспериментальным данным, у электронного нейтрино её скорее всего нет; с меньшей уверенностью это можно утверждать относительно мюонного и таонного нейтрино. Если же нейтрино не имеет массы, то ориентация направлений его спина и импульса связаны: у нейтрино они противоположны, а у антинейтрино — совпадают.

Слабое взаимодействие относится к короткодействующим: его радиус примерно в 1000 раз меньше, чем у ядерных сил. Очень важно, что, в отличие от адронов, лептоны ни в одном эксперименте не проявляют ни малейших признаков внутренней структуры. Пока ничто не указывает, что они из чего-то состоят. В этом смысле их принято называть *точечными* (или *фундаментальными*) *частицами*.

Переносчики слабого взаимодействия были открыты в 1983 г. Это так называемые промежуточные бозоны: W^+ , W^- и Z^0 . Подобно фотонам и глюонам, они имеют спин, равный 1, но, в отличие от последних, обладают массой (которая примерно в 600 раз превышает массу пи-мезонов). Новые частицы оказались чрезвычайно нестабильными — они распадаются примерно за 10^{-24} с.

Экспериментальное обнаружение промежуточных бозонов (а о масштабах соответствующих экспериментов можно судить хотя бы по тому, что первую публикацию об их открытии подписало 138 авторов!) подтвердило правильность теории, которая была предложена ещё за 15 лет до этого и которая, без преувеличения можно сказать, открыла новые горизонты во всей фундаментальной физике.

ЭЛЕКТРОСЛАБОЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ

В 1979 г. мир узнал о том, что очередная Нобелевская премия по физике присуждается американцам Стивену Вайнбергу (1933—1996), Шелдону Глэшуу (родился в 1932 г.) и Абдусу Саламу (1926—1995). В формулировке Нобелевского комитета говорилось: премия вручается «за фундаментальный вклад в создание теории, объединяющей слабое и электромагнитное взаимодействие».

Первый вариант этой теории Салам и Вайнберг предложили ещё в 1967 г., однако она не сразу была принята физиками. Всеобщее признание их теория получила лишь после того, как в ходе экспериментов удалось подтвердить её различные предсказания (включая существование «очарованного» кварка). В рамках той же теории были предсказаны и промежуточные бозоны.

Оказалось, что электромагнитные и слабые взаимодействия глубоко «родственны». В единой теории данные взаимодействия выступают как «потомки» одного «родителя» — более универсального взаимодействия, разветвившегося на две части в результате так называемого спонтанного нарушения некоторой внутренней симметрии.

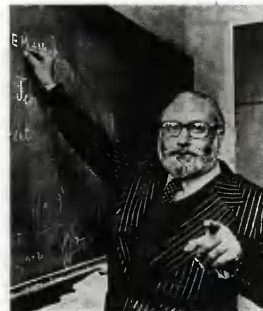
Теория электрослабого взаимодействия позволила установить важнейшие соотношения между величинами, которые раньше считались независимыми, в частности между электрическим и слабым зарядами, определяющими силу этих взаимодействий. В результате резко возросла предсказательная сила теории, и сейчас все её выводы либо согласуются с экспериментом, либо опережают его. Но с эвристической точки зрения самое важное то, что триумф этой теории вывел исследования на качественно новый уровень. Он развернул их в сторону синтеза — поиска тех



Стивен Вайнберг.



Шелдон Глэшуу.



Абдус Салам.



общих законов, которые объединяют все взаимодействия и лежат в их основе. По своему значению для понимания фундаментальных законов природы теория оказалась в одном ряду с электродинамикой Максвелла, объединившей электричество и магнетизм в общее электромагнитное взаимодействие.

ВЕЛИКОЕ ОБЪЕДИНЕНИЕ

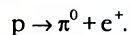
Различие между слабым и электромагнитным взаимодействиями стирается при энергиях $E \approx m_W c^2 \approx 100$ ГэВ (m_W — масса W-бозона). Некоторые физики, в частности Г. Джорджи и Шелдон Глэшоу, предположили, что при переходе к более высоким энергиям должно произойти ещё одно слияние — объединение электрослабого взаимодействия с сильным. Соответствующие теоретические схемы получили название *Великого объединения*.

Во всех этих теориях три взаимодействия (сильное, слабое и электромагнитное) рассматриваются как частные проявления одной «стихии» — некоторого универсального («электроядерного») взаимодействия.

Однако эйфория от ожидания подобного объединения легко может смениться тихим разочарованием, если только обратить внимание на величину энергии (10^{14} – 10^{15} ГэВ),

при которой оно должно произойти. Она не только на 10 – 11 порядков больше доступной ускорителям обозримого будущего, но и в миллионы раз больше энергии, которую можно было бы получить в земных условиях даже при самом буйном воображении (если допустить, что когда-нибудь будет построен ускоритель, опоясывающий земной шар). Приходящие из глубин Вселенной космические лучи, к сожалению, тоже бессильны помочь в этом деле, поскольку энергия частиц, в них встречающихся, не превосходит 10^6 ГэВ.

Одним из решающих подтверждений теорий Великого объединения могло бы стать экспериментальное обнаружение предсказанного ими распада протона. Ранее протон считался абсолютно стабильной частицей (его распад на более лёгкие частицы запрещается законом сохранения барионного и лептонного зарядов). Однако все схемы Великого объединения предсказывают существование 12 новых частиц — массивных X- и Y-бозонов («лептокварков»), обладающих одновременно и барионным, и лептонным зарядами. При взаимодействиях с участием таких частиц эти заряды уже могут и не сохраниться. Например, протон может превратиться в позитрон и нейтральный пион:



►► Синхрофазотрон. Объединённый институт ядерных исследований. Дубна. 1997 г.

Кольцо подземного канала инъекции ускорителя. Длина 2,7 км. Институт физики высоких энергий. Протвино.





Простые варианты Великого объединения предсказывают, что среднее время жизни протона должно быть чудовищно велико — 10^{30} лет, что на 20 порядков превышает возраст нашей Вселенной! Однако для регистрации распада протона не нужно ждать все 10^{30} лет. Это ведь лишь среднее время жизни. Кроме того, протонов в окружающем нас веществе очень много. Например, в 16 т воды их насчитывается около 10^{31} . Значит, наблюдая за этой водой в течение одного года (при среднем времени жизни протона 10^{30} лет), можно обнаружить десять таких распадов.

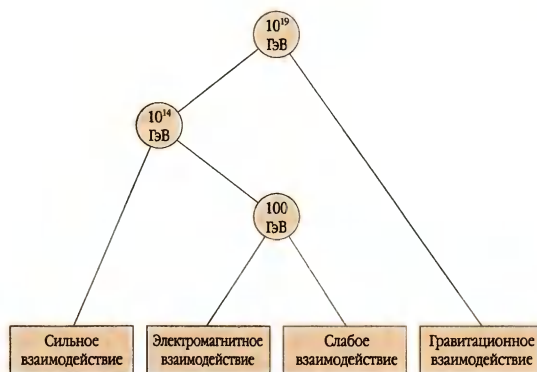
Проводимые в разных странах эксперименты показывают, что протон живёт ещё дольше, во всяком случае дольше, чем 10^{32} лет. Это означает, что простейшие модели Великого объединения несправедливы. Впрочем, говорят, что правильная теория обязательно должна быть красивой, но обратное неверно — не любая красивая теория правильна!

Более сложные варианты Великого объединения, предсказывающие большие значения времени жизни протона, в настоящее время, к сожалению, недоступны экспериментальной проверке. Таким образом, очередную крепость, воздвигнутую Природой на пути теоретиков, пока взять не удалось — этот орешек оказался нам не по зубам.

СУПЕРОБЪЕДИНЕНИЕ

Если крепость не удаётся взять лобовой атакой, то, вероятно, можно её обойти? И физики стали думать об объединении всех четырёх взаимодействий, включая гравитационное.

На первый взгляд такое кажется невозможным. Уж слишком велика разница в интенсивностях этих взаимодействий. Например, сила гравитационного притяжения электрона к протону внутри атома водорода в 10^{39} раз слабее силы их электриче-



ского притяжения. Однако по мере увеличения энергии частиц и уменьшения расстояния между ними слабое вначале гравитационное взаимодействие начинает быстро набирать силу. При энергии 10^{19} ГэВ и расстоянии между взаимодействующими частицами порядка 10^{-33} см интенсивности всех четырёх взаимодействий сравниваются и происходит то, что принято называть *суперобъединением*.

По современным представлениям, именно при таких энергиях и расстояниях (которые называют планковскими в честь немецкого учёного Макса Планка), по всей вероятности, разыгрывается основная драма природы. Именно здесь, по словам Льва Борисовича Окуня, «находится та кузница, где выковываются основные закономерности физического мира».

К сожалению, совершенно ясно: у нас нет никаких шансов, что когда-нибудь удастся «поиграть» с такими масштабами в лаборатории, — там нет и не будет подобных энергий, не будет и «микроскопа» для изучения процессов на столь малых расстояниях.

Как заметил известный американский физик Д. Шремм, «установка ускорителя типа Стэнфордского линейного ускорителя, но только на энергию 10^{19} ГэВ, протянулась бы отсюда до звезды α Кентавра. При



этом, конечно, будет легче с поддержанием требуемого вакуума, однако будет труднее анализировать данные, не говоря уже о проблемах с национальным (мировым) валовым доходом».

Остаётся надежда только на естественную лабораторию, каковой является Вселенная, если посмотреть на неё в космологическом плане. Она-то в процессе своего расшире-

ния несомненно проходила (правда, невероятно быстро) стадии, на которых все необходимые для «эксперимента» условия были налицо. Может быть, от тех времён всё-таки остались какие-нибудь следы? Если да, то предстоит их обнаружить и найти ключи к расшифровке.

Сейчас, однако, начинают разрабатывать и другой подход к решению этой проблемы. С помощью совре-

ВАКУУМ

Достаточно ли знаком
ты с пустотой?

И. В. Гёте. «Фауст»

Ещё 23 века назад Аристотель сказал: «Дело физика — рассмотреть вопрос о пустоте, существует она или нет, и в каком виде существует, или что она такое...». С тех пор эта проблема не давала покоя учёным, пытавшимся понять устройство Вселенной. Разные её решения лежали в основе физических концепций Галилея, Декарта, Ньютона, Эйнштейна.

Древние греки называли пустоту «кенон». Однако впоследствии оно было вытеснено латинским словом «вакуум» (*vacuum*). И хотя оно по-прежнему переводится как «пустота», сегодня под **физическим вакуумом** понимается совсем не то, что имели в виду древние.

С точки зрения современной физики вакуум представляет собой основное (невозбуждённое) состояние поля. Такое состояние характеризуется минимальной энергией и отсутствием каких-либо реальных частиц. Однако это не означает, что вакуум «пустой».

Одним из главных принципов квантовой механики является *соотношение неопределённостей* между точностью, с которой можно измерить энергию частицы, и временем, затраченным на её измерение: $\Delta E \cdot \Delta t \approx \hbar$, где $\hbar = 1,05 \cdot 10^{-34}$ Дж·с — постоянная Планка. Согласно этому соот-

ношению, возможно как бы нарушение закона сохранения энергии: из вакуума возникнет частица с энергией ΔE , но лишь на время, не превышающее $\Delta t \approx \hbar/\Delta E$. Продолжительность «существования» таких частиц (их называют **виртуальными**) оказывается чрезвычайно малой. Их нельзя непосредственно обнаружить ни одним прибором. Однако, то и дело возникая и сразу же исчезая, они заполняют вакуум и при помещении в него какой-либо реальной частицы начинают косвенным образом проявлять себя.

Например, вокруг оказавшегося в вакууме электрона образуется облако из виртуальных электронов и позитронов (данное явление называют **поляризацией вакуума**). При этом виртуальные позитроны притягиваются к нему, а виртуальные электроны, напротив, отталкиваются. Заряд электрона, если изучать его издали, оказывается частично экранированным, с увеличением расстояния он уменьшается. Наоборот, по мере проникновения в глубь виртуального облака экранирование ослабевает и заряд электрона возрастает.

Электрический заряд, таким образом, оказывается величиной переменной, или, как принято говорить, **бегущей константой**. Подобно ему, «бегущими» являются и константы слабого и сильного взаимодействий, только с увеличением расстояния они не убывают (как электрический заряд), а возрастают.

С другой стороны, согласно тому же принципу неопределённости (но в несколько иной форме), чем ближе

оказываются две взаимодействующие частицы, тем большим импульсом они обмениваются: $\Delta x \cdot \Delta p = \hbar$. Поэтому константы, характеризующие фундаментальные взаимодействия, зависят не только от расстояния, но и от передаваемого импульса. Электрический заряд возрастает вместе с этим импульсом, а два других — сильный и слабый — убывают. При определённом значении импульса и соответствующей энергии (10^{15} ГэВ) бегущие константы оказываются равными и три фундаментальных взаимодействия объединяются в одно.

На ещё более глубоком уровне, на невообразимо малых расстояниях порядка 10^{-35} м, начинают изменяться свойства уже самого пространства-времени. Хаотически возникающие и исчезающие виртуальные частицы высоких энергий искривляют его поблизости от себя. Образуется сложная пенообразная структура, заполненная флуктуациями (от лат. *fluctuatio* — «колебание») расстояний и промежутков времени, появляющимися и сразу же исчезающими «кротовыми норами» и «мостиками» в пространстве-времени. Их размеры примерно во столько же раз меньше радиуса протона, во сколько раз протон меньше Солнца.

Именно здесь стирается грань между гравитационным и всеми остальными взаимодействиями, и становится понятно, что основой нашего мира, которая определяет все остальные его надстройки, самым главным физическим объектом является не что иное, как вакуум.



менных суперкомпьютеров учёные пытаются смоделировать эволюцию Вселенной с самого момента её рождения (Большого взрыва) и до наших дней. В компьютер закладывают как уже твёрдо установленные закономерности, так и начальные условия — догадки учёных о том, что представляла собой материя в момент Большого взрыва и какие процессы должны были происходить сразу после него. Если удастся предложить компьютеру такой вариант начальных условий, при котором он «скажет», что к настоящему времени Вселенная должна стать именно такой, какой она является на самом деле, то можно надеяться: догадки правильны.

Но даже если это получится, всё равно останется много вопросов. Упомянем сейчас только один из них — нужно будет доказать, что ни при каких других начальных условиях не произойдёт то же самое. Конечно, строго доказать такую «теорему единственности» невозможно, и потому нам придётся ограничиться рассмотрением лишь различных правдоподобных альтернатив.

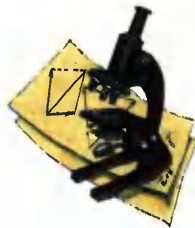
Когда-то Ньютон сравнивал себя с мальчиком, нашедшим несколько разноцветных камешков или ракушек на берегу безбрежного океана неизведанного. Затем были другие выдающиеся открытия, и через два столетия некоторым учёным стало казаться, что физика как фундаментальная наука уже почти завершена.

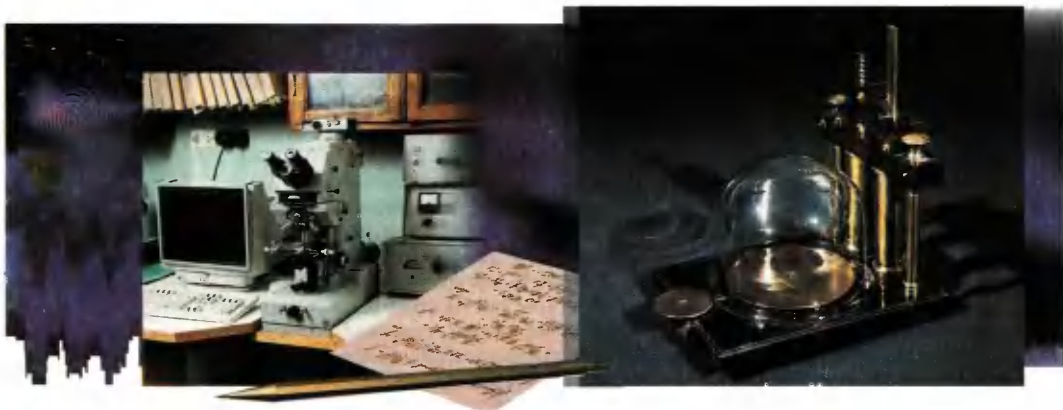
На горизонте осталось всего каких-нибудь два небольших облачка пока ещё непонятого, которые скоро прояснятся, и можно будет почтить на лаврах. Теперь известно, что эти «облачка» породили теорию относительности и квантовую механику.

С тех пор наш кругозор значительно расширился и пополнился новыми (и немалыми!) знаниями и опытом. И мы отчётливо видим на горизонте уже не облачка, а свинцовые тучи, только горизонт отодвинулся так далеко, что совсем неясно, сможем ли мы когда-нибудь и как-нибудь за него заглянуть. Перед лицом поставленных выше проблем учёные-физики сегодня оказались в положении художника, который пытается написать портрет Чеширского Кота, видя перед собой лишь оставленную им загадочную улыбку.



Современный суперкомпьютер Cray. Фирма Cray Research, США.





НАЧАЛА И МЕТОДЫ ФИЗИКИ

ИЗМЕРЯЙ ВСЁ ДОСТУПНОЕ...

Измеряй всё доступное
измерению и делай
недоступное измерению
доступным.

Галилео Галилей

ИЗМЕРЕНИЯ И ЭТАЛОНЫ

Человек постоянно всё сравнивает: до реки идти дольше, чем до леса, это дерево выше, чем следующее... Но приходится говорить и о том, чего нет перед глазами, — например, до города добираться столько-то, нужна палка такой-то длины. Причём о размере (длительности, глубине и т. д.) искомого предмета или объекта нужно сказать так, чтобы все поняли. И тогда его сравнивают с некоторой всем известной вещью: время удобно сравнивать с длительностью суток,

длину — с какой-то частью тела человека. Например, в древности единицей длины служил локоть — расстояние «от локтя до конца среднего перста», что составляет около 46 см.

Так возникло понятие *измерения* — то, без чего не было бы физики, техники, современной цивилизации. Провести измерение — значит установить, сколько раз в измеряемой величине укладывается единица измерения. Сначала в каждой стране, а иногда и в разных регионах одной страны эти единицы различались. В Древнем Египте для измерения длины использовались царский локоть (около 52,5 см) и малый локоть (около 45 см), а в Вавилонии локоть составлял примерно 54 см. Вавилонская ступня (единица длины) была около 32,5 см, а современный английский фут (*англ. foot* — «ступня») равен

Царь наблюдает
за взвешиванием
товара.
Блюдо из Лаконии.
Около 560 г. до н. э.





30,48 см. Даже сегодня единицы измерения со сходными названиями не всегда совпадают друг с другом, — например, международная морская миля равна 1852 м, а в Великобритании — 1853 м.

В конце XVIII в. в странах Европы существовало около ста разных «фут», несколько десятков различных «миль», более сотни «фунтов», что очень мешало торговле. И в 1789 г. торговые центры Франции обратились в правительство с ходатайством о введении в законодательном порядке одинаковых для страны единиц измерения. Правительство поручило рассмотреть этот вопрос специальной комиссии, в которой работали математики, астрономы и физики. Среди них были Пьер Симон Лаплас, Гаспар Монж, Жан Антуан Никола Кондорсэ. В качестве эталона Христиан Гюйгенс предложил принять длину нити маятника, период колебаний которого равен 1 с. Но тогда эталон длины зависел бы от ускорения свободного падения, а оно на разной широте разное (на экваторе $9,780 \text{ м/с}^2$, на полюсах $9,833 \text{ м/с}^2$). Поэтому комиссия постановила принять за единицу измерения длины метр, определяемый как 1/40-миллионная длины меридиана, на котором расположен Париж. Для измерения длины меридиана была организована экспедиция под руководством астрономов и геодезистов, и в течение нескольких лет (с 1792 по 1799 г.) проводились угловые замеры

участка меридиана между Дюнкерком и Барселоной (около 1000 км). Затем на основании полученных результатов был изготовлен платиновый эталон метра.

За единицу массы (килограмм) комиссия приняла массу 1 дм^3 (понятие метра уже было введено) дистиллированной воды при температуре 4°C . Взвешивание проводилось в вакууме. Оба эталона Лаплас представил Национальному собранию, которое и утвердило их 10 декабря 1799 г. Единицей времени, секундой, было решено считать $1/86\,400$ часть средних солнечных суток. Эталон секунды, разумеется, на стол поставить нельзя, и физикам поверили на слово. Через год начиналось новое, XIX столетие, и человечество вошло в него с новой системой единиц, правда пока не общепринятой.

Для расширения торговли, поддержания контактов учёных и инженеров разных стран требовалась общая система единиц. И в 1875 г. 17 стран, в том числе Россия, подписали Метрическую конвенцию. В соответствии с этим документом они вводили у себя метрическую систему мер и принимали за эталоны метра и килограмма прототипы, хранящиеся в Международном бюро мер и весов в Севре, близ Парижа. Кратные и дольные единицы решили образовывать так, чтобы они составляли десятую, сотую, тысячную и ещё меньшую долю от основной единицы или были в десять, сто раз больше и т. д.

Чтобы провести измерения и изготовить измерительные приборы, нужны эталоны. Но эталон метра имеется один. По нему делают вторичные эталоны, по ним — третьичные и т. д., вплоть до школьных линеек. Система не очень удобная. С развитием физики появилась возможность ввести единицу измерения длины, не связанную с уникальным эталоном. По решению, принятому Генеральной конференцией по мерам и весам



Верстовый столб.
Москва.



Ж. Деламбр.
«Аналитические
методы определения
длины дуги
меридиана».
Париж. 1799.
Отчёт о результатах
астрономо-
геодезической
экспедиции 1795 г.



Оптический стандарт времени, созданный в лаборатории физики газовых лазеров Института теплотехники. Новосибирск. 1982 г.



в 1983 г., за 1 метр принимается расстояние, которое проходит электромагнитное излучение в вакууме за 1/299 792 458 долю секунды. Такое определение даёт возможность не только обойтись без промежуточных эталонов, но и намного увеличить точность измерений.

За основную единицу измерения времени теперь принята секунда, определяемая как продолжительность 9 192 631 770 периодов излучения между определёнными уровнями атомов цезия с массовым числом 133. За единицу массы (килограмм) принимается масса гири из платиноиридиевого сплава, хранящейся в Международном бюро мер и весов.

СИСТЕМЫ ЕДИНИЦ ФИЗИЧЕСКИХ ВЕЛИЧИН

Принятие единых мер длины (следовательно, площади и объёма) и веса решило многие проблемы в торговле, строительстве, геодезии. Но для науки и техники нужны были единицы измерения механических, тепловых, электромагнитных и оптических величин. Можно, конечно, ввести независимые эталоны для всех величин: скорости, силы, энергии, коэффициента теплопроводности, напряжённости электрического поля и т. д.

Но тогда зависимость пройденного пути от времени пришлось бы писать в виде $S = k_1 vt$, второй закон Ньютона — в виде $F = k_2 ma$, т. е. во всех формулах появились бы размерные коэффициенты. Чтобы избежать этого неудобства, в 30-х гг. XIX в. Карл Фридрих Гаусс (1777—1855) предложил принять за основные единицы длину L , массу M и время T .

Используя основные единицы, можно образовать производные. Например, единицей скорости является такая скорость, при которой равномерно движущееся тело за единицу времени проходит единицу длины. Аналогично определяется единица ускорения, а единица силы на основании второго закона Ньютона определяется как сила, сообщаемая телу единичной массы одну единицу ускорения. По этому принципу построены практически все системы отсчёта.

Многим производным единицам присваиваются имена учёных. В системе СИ, например, ньютон — единица силы, джоуль — единица работы, паскаль — единица давления.



КАК МЫ ИЗМЕРЯЕМ

История физики — это в значительной мере придумывание и реализация новых способов измерений. Вот несколько примеров измерения длин, расстояний и размеров.

Представьте, что вы стоите у основания высокой мачты, на которой подвешен фонарь. Далеко ли до

«Вольфганг Паули был стопроцентным теоретиком. Его неспособность общаться с любым экспериментальным оборудованием вошла у друзей в поговорку. Утверждали даже, что ему достаточно просто войти в лабораторию, чтобы в ней что-нибудь сразу же переставало работать. Это мистическое явление окрестили «эффектом Паули» (в отличие от знаменитого «принципа Паули» в квантовой теории).

Из документально зарегистрированных проявлений эффекта Паули самым поразительным, несомненно, является следующий. Однажды в лаборатории Джеймса Франка в Гёттингене произошёл настоящий взрыв, разрушивший дорожку установку. Время этого ЧП было точно зафиксировано. Как потом оказалось, взрыв произошёл именно в тот момент, когда поезд, в котором Паули следовал из Цюриха в Копенгаген, остановился на 8 минут в Гёттингене».

Из книги «Физики шутят»



фонаря? Сделайте несколько шагов в сторону — угол между горизонталью и направлением на фонарь изменится. Если измерить расстояние, на которое вы сместились (оно называется базой), и углы, под которыми виден фонарь из начальной и конечной точек, то, решив треугольник (известны его сторона и два угла), вы найдёте расстояние до фонаря.

Именно так поступают при измерении расстояний до звёзд. Но поскольку эти расстояния велики, приходится использовать максимально возможную базу (разные точки орбиты Земли), а также внесистемные единицы длины — а. е., парсек и световой год. За *астрономическую единицу длины* (а. е.) принимается размер большой полуоси земной орбиты — $1,496 \cdot 10^8$ км. Угол α , под которым со звезды видна большая полуось R земной орбиты, называется годичным параллаксом (тригонометрическим параллаксом). Если угол α равен $1''$, то расстояние до звезды составляет $3,086 \cdot 10^{13}$ км. Это расстояние называется *парсеком* (сокращённое от «параллакс» и «секунда»). Один парсек (пк) равен 3,26 светового года (световой год — расстояние, которое проходит свет в вакууме за один земной год). Парсек, световой год и а. е. широко используются в астрономии.

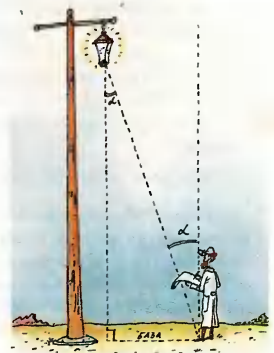
Хотя метод параллакса принципиально прост и известен с давних времён, первые измерения расстояний до ближайших звёзд удалось выполнить только в 1837 г. Василию Яковлевичу Струве в городе Дерпт (ныне Тарту) и в 1838 г. Фридриху Вильгельму Бесселю в Кёнигсберге (ныне Калининград). Оказалось, что ближайшая к Солнечной системе звезда Проксима Центавра имеет параллакс $0,762''$ и, следовательно, удалена от нас на 1,31 пк. Если рассматривать сантиметровую монетку с расстояния 2 км, угловой размер диска будет приблизительно равен $1''$. Даже современные методы измерения углов, дающие точность

СИСТЕМА СГС

Основные единицы этой системы — сантиметр, грамм, секунда. Единицы скорости, ускорения, силы, работы строятся так же, как и в СИ. Но, в отличие от системы СИ, электрические единицы здесь вводятся как производные. За единицу заряда принимается величина каждого из двух одинаковых точечных зарядов, которые в вакууме взаимодействуют с силой 1 дин, находясь друг от друга на расстоянии 1 см. Единица температуры (кельвин), единица светового потока (люмен) и единица количества вещества (моль) являются в системе СГС основными. Эта система почти не используется в технике, но применяется в физике и особенно удобна при описании электромагнитных явлений.

около $0,01''$, позволяют достаточно надёжно измерить расстояния лишь до звёзд, которые удалены от нас на несколько десятков парсеков (относительная погрешность при измерении расстояний порядка 100 пк достигает 50 %). А поскольку диаметр нашей Галактики примерно 30 кпк, ясно, что методом параллакса можно измерить расстояния только до небольшой части звёзд.

Для измерения расстояний, больших, чем 100 пк, применяется фотометрический метод. Исследования близких к нам звёзд показали: спектр



МЕЖДУНАРОДНАЯ СИСТЕМА СИ

Международная система единиц физических величин СИ (фр. *Système international, SI*) принята 11-й Генеральной конференцией по мерам и весам (1960 г.). В ней семь основных единиц. Три единицы — времени (секунда), длины (метр) и массы (килограмм) — определены выше. Четыре другие — это единицы силы тока (ампер), температуры (кельвин), количества вещества (моль) и силы света (кандела).

Как при определении метра, так и при определении ампера численные коэффициенты введены для того, чтобы максимально приблизить применяемые в СИ единицы к широко используемым в практике, и это её сильная сторона. Предлагалось, в частности, изменить единицы времени, сделав в часе 100 мин, в минуте — 100 с и т. д. Но даже представить трудно, что это такое — переделать все часы в мире! Платой за принятые удобства стали неприятности, возникающие, например, в теории электромагнетизма. Здесь приходится вводить электрическую и магнитную постоянные, которые иногда совершенно напрасно называют диэлектрической и магнитной проницаемостью вакуума. Электрическая индукция и напряжённость электрического поля, совпадающие в вакууме, в системе СИ имеют не только разные величины, но и разные размерности. Такая же ситуация с напряжённостью магнитного поля и магнитной индукцией.



АНАЛИЗ РАЗМЕРНОСТЕЙ

Международная система единиц (СИ) содержит кроме семи *основных* единиц множество *производных*. Последние образуются из основных единиц с помощью формул и уравнений, связывающих соответствующие величины.

Единицы физических величин обозначаются с помощью квадратных скобок, например: $[s] = 1 \text{ м}$ — единица длины, $[m] = 1 \text{ кг}$ — единица массы.

Соотношение, выражающее единицу физической величины через основные единицы, определяет *размерность* данной величины. При установлении размерности пользуются простым правилом: размерность произведения (отношения) величин равна произведению (отношению) их размерностей. Так, размерность силы оказывается равной

$$[F] = [ma] = [m] \cdot [a] = \text{кг} \cdot \text{м} \cdot \text{с}^{-2}.$$

Физические величины, у которых размерность равна 1, называются *безразмерными*. Например, безразмерной величиной является абсолютный показатель преломления среды, определяемый отношением скоростей света в вакууме и в данной среде

$$[n] = [c/v] = [c]/[v] = (\text{м}/\text{с})/(\text{м}/\text{с}) = 1.$$

Складывать и вычитать можно только величины одинаковой размерности. Не имеет смысла, например, сумма $3 \text{ кг} + 2 \text{ Н}$. Столь же бессмысленно и равенство $5 \text{ м} = 5 \text{ Дж}$. Размерности обеих частей любого равенства в физике должны быть одинаковыми. Это требование лежит в основе *метода анализа размерностей*, применяемого, во-первых, для быстрой проверки правильности получаемых при решении задач формул и, во-вторых, для установления вида ранее неизвестных зависимостей между различными величинами.

Проиллюстрируем изложенное на простых примерах. Предположим, что в результате исследования равномерного движения по окружности для модуля центростремительного ускорения было получено выражение $a = v^3 R$.

Верно ли оно? Чтобы установить это, проверим формулу на условие равенства размерностей обеих её частей

$$[a] = \text{м} \cdot \text{с}^{-2}, [v^3 R] = (\text{м} \cdot \text{с}^{-1})^3 \cdot \text{м} = \text{м}^2 \cdot \text{с}^{-3}.$$

Эти размерности не совпадают, значит, формула $a = v^3 R$ неверна.

Попытаемся теперь установить правильную зависимость центростремительного ускорения от скорости движения и радиуса окружности, по которой движется тело. Для этого представим ускорение в виде

$$a = v^x R^y, \quad (1)$$

где x и y — неизвестные показатели степени, которые требуется определить. Значения $x = 3$, $y = 1$, как мы видели выше, являются неверными. Чему же равны их истинные значения? Для ответа на этот вопрос приравняем размерности обеих частей равенства (1)

$$\text{м} \cdot \text{с}^{-2} = (\text{м} \cdot \text{с}^{-1})^x (\text{м})^y$$

или

$$\text{м} \cdot \text{с}^{-2} = \text{м}^{x+y} \cdot \text{с}^{-x}.$$

Приравнявая далее показатели степени у метров (м) и секунд (с) слева и справа, получаем систему уравнений

$$1 = x + y, \quad -2 = -x.$$

Решая её, находим: $x = 2$, $y = -1$. Подстановка полученных значений в формулу (1) даёт

$$a = \frac{v^2}{R}. \quad (2)$$

Это и есть правильная формула. Заметим, правда, что мы определили зависимость a от v и R лишь с точностью до постоянного безразмерного коэффициента. Ведь если домножить правую часть равенства (2) на какое-либо безразмерное число k , то равенство размерностей обеих его частей по-прежнему сохранится. Следовательно, в действительности нами установлено, что $a = kv^2/R$, где значение k методом анализа размерностей определить невозможно. Строгие расчёты, однако, показывают, что

в данном случае $k = 1$, и потому формула (2) точна.

Рассмотрим ещё один пример. Воспользуемся методом анализа размерностей для установления зависимости периода свободных колебаний математического маятника от его параметров. Такими являются масса маятника m , длина нити l , а также ускорение свободного падения g , характеризующее поле тяжести, в котором маятник совершает колебания.

Представим период колебаний в виде

$$T \sim m^x l^y g^z.$$

Размерности левой и правой частей этого выражения должны быть равны

$$c = (\text{кг})^x \cdot (\text{м})^y \cdot (\text{м} \cdot \text{с}^{-2})^z$$

или

$$(\text{кг})^0 \cdot (\text{м})^0 \cdot \text{с}^1 = (\text{кг})^x \cdot (\text{м})^{y+z} \cdot (\text{с})^{-2z}.$$

Приравнявая показатели степени при килограммах, метрах и секундах, получаем систему уравнений

$$0 = x, \quad 0 = y + z, \quad 1 = -2z$$

Решив её, находим: $x = 0$, $y = 1/2$, $z = -1/2$. Таким образом,

$$T \sim \sqrt{\frac{l}{g}}.$$

Коэффициент пропорциональности в данном выражении методом анализа размерностей установить нельзя (согласно расчётам, он равен 2π). Но зато мы обнаружили, что период колебаний математического маятника не зависит от его массы! Замечательно, что столь неожиданный результат (ведь, например, у пружинного маятника период колебаний зависит от массы) мы получили, не используя каких бы то ни было законов физики.

Именно эта предсказательная сила делает метод анализа размерностей мощным средством изучения различных физических явлений, особенно в тех случаях, когда точный расчёт либо измерение каких-либо физических величин сделать очень трудно или даже невозможно.



ЧЕМ МЕНЬШЕ, ТЕМ ЛУЧШЕ?

Какое минимальное количество единиц необходимо принять за основные, чтобы описать результаты разнообразных физических опытов? Может показаться, что набор единиц, предложенный Гауссом, и есть минимальный. Однако их число легко уменьшить.

Выберем в качестве основной единицы времени секунду. Поскольку есть скорость, которая всегда постоянна, — скорость света в вакууме, за единицу длины логично принять расстояние, проходимое светом в вакууме за единицу времени. Тем самым единица длины стала производной (скорость света при этом равна единице — по определению) и количество основных единиц свелось к двум (время и масса).

Из числа основных единиц можно исключить и массу. Для этого используем второй закон Ньютона и закон всемирного тяготения. Поскольку единицу времени мы приняли за основную и ввели как производную единицу длины,

то единица ускорения тоже определяется как производная (ускорение равно единице, если за единицу времени скорость тела при равноускоренном движении меняется на одну единицу скорости). Используя это соотношение, можно дать определение единице массы: тело единичной массы сообщает ускорение, равное единице ускорения, любому маленькому телу, находящемуся от него на расстоянии в одну единицу длины. Таким образом, мы уже могли бы построить систему единиц, в которой основная единица одна — время.

Какими оказались бы эти единицы в сравнении с привычными? Единица длины составила бы примерно $3 \cdot 10^8$ м, единица ускорения — $3 \cdot 10^8$ м/с², единица массы — $4,5 \cdot 10^{18}$ кг. Использовать подобную систему в быту и технике неудобно, и это очевидно. При построении системы единиц надо найти оптимальное количество основных единиц. Чем их больше, тем больше коэффициентов появится в формулах, но зато эти единицы можно сделать более удобными в использовании.

излучения звезды, определяемый температурой её поверхности, и количество излучаемой ею энергии (светимость) закономерно связаны. По спектру излучения звёзд находят их светимость. Сравнивая её с видимой яркостью звезды, обратно пропорциональной квадрату расстояния до звезды, получают оценку этого расстояния. Фотометрическим методом измеряют расстояния не только до ярких звёзд нашей Галактики, но и до ярчайших звёзд других галактик, удалённых от нас на миллионы парсеков.

Оценки расстояний до ещё более удалённых галактик и квазаров основаны на эффекте Доплера. Если источник, излучающий свет с частотой ν_0 , удаляется от нас со скоростью v , то частота воспринимаемого нами света такова:

$$\nu = \nu_0 \sqrt{\frac{1-\beta}{1+\beta}},$$

где $\beta = \frac{v}{c}$ — отношение скорости движения источника к скорости света.

Если источник света и приёмник сближаются, то наблюдаемая длина волны становится меньше, фотоны «синют» (изменение частоты даётся

приведённой формулой, в которой надо поменять знак скорости).

Зная частоты, на которых атомы излучают свет (спектр излучения индивидуален для каждого элемента), и частоты, воспринимаемые наблюдателем на Земле от атомов удалённой галактики, можно определить скорость её движения.

Исследования ближайших галактик, расстояние до которых можно определить фотометрическим методом, показали, что они удаляются от



Эффект Доплера — изменение частоты волны, наблюдаемое при движении источника волн относительно их приёмника. Это явление обнаружил в 1842 г. австрийский физик и астроном Кристиан Доплер.

Квазары — космические объекты малых угловых размеров, имеющие значительные красные смещения линий в спектрах. Это указывает на их большую удалённость от Солнечной системы (несколько тысяч мегапарсеков).

Сверхновая звезда в Малом Магеллановом облаке. Снимок Космического телескопа им. Э. Хаббла. 1999 г.





Взаимодействующие галактики. Снимок Космического телескопа им. Э. Хаббла. 1999 г.

■ На тему эффекта Доплера в фольклоре физиков есть следующая история. Однажды физика Роберта Уильямса Вуда остановил полицейский за то, что Вуд пересек перекрёсток на красный свет. Вуд сослался на эффект Доплера и сказал, что свет казался ему зелёным. Выяснив у Вуда, в чём заключается суть эффекта и с какой скоростью должен двигаться автомобиль (около 90 000 км/с), полицейский оштрафовал Вуда за превышение скорости.

■ Закономерность «разлёта» галактик установил в 1929 г. американский астроном Эдвин Пауэлл Хаббл (1889—1953). Тем самым была подтверждена концепция расширяющейся Вселенной российского учёного Александра Александровича Фридмана (1888—1925). В 1922 г. он нашёл нестационарное решение гравитационного уравнения Эйнштейна, доказав возможность существования расширяющейся Вселенной.

нас (наблюдаемые частоты уменьшаются, а длины волн увеличиваются, «краснеют») со скоростями, пропорциональными расстоянию до них. Коэффициент пропорциональности называется *постоянной Хаббла*. Если предположить, что эта закономерность справедлива и для более далёких галактик, то расстояние до них можно найти по красному смещению. Расстояния, измеренные с помощью такого метода, для наиболее удалённых объектов Вселенной составляют миллиарды световых лет. В 1999 г. американские астрономы зарегистрировали очень далёкий объект. Если предположить, что всё красное смещение обусловлено эффектом Доплера, то скорость этого объекта должна быть примерно равна 0,967 скорости света. А свет, который мы сейчас наблюдаем, испущен объектом, когда возраст Вселенной был в 20 раз меньше нынешнего.

Итак, все методы измерений больших расстояний так или иначе связаны со светом. Но и в условиях Земли применяются методы измерения, использующие электромагнитное излучение. Радиолокаторы и лазерные дальномеры позволяют по времени прохождения электромагнитного сигнала измерить расстояние до объ-

екта. Этот метод применим и для больших расстояний, если использовать мощные лазеры и высокочувствительную регистрирующую аппаратуру.

Все видели разноцветные разводы в лужах, по поверхности которых растёкся тонкий слой масла. Усиление одного цвета и ослабление другого происходят из-за интерференции лучей, отражённых от верхней и нижней поверхностей масляной плёнки. Если отражённые от этих поверхностей лучи имеют одинаковую фазу, то интенсивность луча с такой длиной волны увеличивается; если лучи сдвинуты по фазе на половину длины волны, они гасят друг друга. Этим же объясняется и радужная окраска мыльных пузырей. Зная, какой цвет усиливается, а какой ослабляется, можно точно измерить толщину плёнки, оказывающуюся обычно порядка 1 мкм, т. е. порядка длины волны видимого света. Тот же принцип помогает измерить расстояния порядка 1 Å между плоскостями, в которых расположены атомы кристаллов. Однако для этого надо использовать электромагнитное излучение с длиной волны порядка измеряемых расстояний, т. е. рентгеновское излучение.

С ещё меньшими расстояниями приходится сталкиваться при изучении атомных ядер и элементарных частиц. Если частицы проходят через вещество, то вероятность рассеивания зависит от размеров частиц и атомов. Если бы все они были точками, рассеивания бы не наблюдалось. Но оно происходит, причём так, как будто радиусы протонов и нейтронов примерно одинаковы и равны около 10^{-15} м. Радиусы атомных ядер находятся в интервале 10^{-15} — 10^{-14} м. Таким образом, различные методы измерения позволяют находить расстояния, отличающиеся друг от друга приблизительно на 40 порядков.

Кроме измерения больших и малых расстояний и времён огромную



ИЗМЕРЕНИЕ ВРЕМЕНИ

Важной характеристикой атомных ядер и элементарных частиц является время жизни. Объекты микромира не знают своей истории. Ядро урана-238, образовавшееся несколько миллиардов лет назад и дожившее до наших времён, имеет точно такие же шансы распасться в течение ближайших дней, как и ядро, только вчера синтезированное в лаборатории. В отличие от биологических объектов «старая» элементарная частица не имеет принципиальных отличий от «юной».

Отсюда следует простой закон, описывающий распад ядер и элементарных частиц: $N = N_0 e^{-\frac{t}{\tau}}$, где N_0 — число частиц или ядер в момент времени $t = 0$, N — число выживших к моменту времени t , а τ — среднее время жизни данного ядра или элементарной частицы. За время τ количество нестабильных объектов уменьшается в e раз ($e \approx 2,718$).

Когда речь идёт о распаде атомных ядер, то вместо времени жизни τ обычно используют понятие периода полураспада $T_{1/2} = \ln 2 \cdot \tau \approx 0,693 \tau$. За время, равное периоду полураспада, число радиоактивных ядер уменьшается в два раза.

Если период полураспада какого-нибудь ядра составляет несколько часов, дней или месяцев, определить период полураспада в принципе нетрудно. Но, когда время жизни изотопа исчисляется миллионами и миллиардами лет, этот способ измерения непригоден, и период полураспада долгоживущих изотопов определяют,

подсчитывая число распадов в единицу времени образца, содержащего известное количество ядер N . Количество ядер в образце можно найти, зная его вес, атомную массу и число Авогадро. Из закона радиоактивного распада следует, что число распадов в единицу времени равно

$$\frac{\ln 2}{T_{1/2}} N.$$

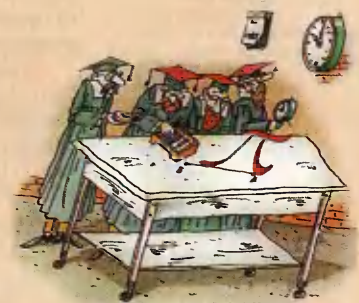
Таким способом были измерены периоды полураспада многих долгоживущих изотопов. Чувствительность метода настолько высока, что удалось измерить даже период полураспада германия-76, оказавшийся равным $1,5 \cdot 10^{21}$ лет.

При измерении больших времён изотоп с известным периодом полураспада сам может использоваться как часы (причём такие часы в состоянии выдерживать колоссальные температуры, давления и ускорения, практически не меняя «скорости хода»). Так, урановый хронометр даёт ценнейшую информацию об истории Вселенной. Доля урана-235 в природном уране всего 0,72 %, а более 99 % составляет уран-238. Их периоды полураспада соответственно равны $7 \cdot 10^8$ и $4,47 \cdot 10^9$ лет. Во времена, когда шёл процесс образования тяжёлых элементов, концентрации обоих изотопов были примерно одинаковыми. Решив простое уравнение, обнаружим, что это время отделено от нашего промежутком около 5 млрд лет.

Красивый способ применяется при измерении малых времён жизни элементарных частиц. Если нестабильная

частица прожила время t и двигалась со скоростью v , много меньшей скорости света, то она пролетит до распада расстояние, равное vt . Измеряя скорость частиц и расстояние, которое каждая из них пролетела до точки распада, и усредняя эти величины, можно найти среднее время жизни частиц данного вида.

В 1985 г. физикам, работавшим на ускорителе заряженных частиц в Женеве, удалось по длине пробега установить время жизни π^0 (пи-нуль) мезона, оказавшееся равным $0,9 \cdot 10^{-16}$ с. Средняя скорость мезонов, с которыми имели дело экспериментаторы, составляла 0,999998 от скорости света в вакууме. Время в системе отсчёта, связанной с такими пи-мезонами, текло за счёт релятивистского эффекта примерно в 1800 раз медленнее, чем в лабораторной системе. Если бы не эффект замедления времени в движущейся системе отсчёта, исследуемые частицы за время жизни пролетали бы расстояние около $3 \cdot 10^{-5}$ мм.



роль в физике играют измерения универсальных констант: заряда e и массы m электрона, гравитационной постоянной G , скорости распространения электромагнитного излучения в свободном пространстве c и постоянной Планка $\hbar$. Особенно важны измерения значения комбинации этих констант, так называемой *постоянной Ридберга* R :

$$R = \frac{2\pi^2 m e^4}{\hbar^3 c}.$$

Как следует из современных теорий, описывающих происхождение Вселенной, малейшие изменения R , т. е. связи между универсальными константами, могли бы привести к принципиально иному ходу развития Вселенной!



РАБОТА НАД ОШИБКАМИ

Гоголевский городничий утверждал, что, «не пригнувши, не говорится никакая речь»; также и любой экспериментатор скажет, что измерений без погрешностей не бывает. Абсолютно точные измерения невозможны хотя бы потому, что измеряемые величины, да и сами эталоны единиц измерения не имеют абсолютно точных значений. Например, масса любого тела меняется из-за испарения его собственных молекул и поглощения молекул окружающего газа.

Однако в большинстве случаев точности аппаратуры не хватает, чтобы заметить эти изменения. Погрешности, которые вносят сами приборы, существенно больше: сравним, например, точность определения массы на хороших лабораторных весах (доли миллиграмма) и массу одной молекулы (порядка 10^{-27} г). Поэтому по сравнению с «приборной самостоятельностью» измеряемую величину вполне можно считать неизменной.

Почему же приборы «шалят»? Причин этому очень и очень много. Так, часы обычно хотя бы немного спешат или отстают; стрелка амперметра или вольтметра останавливается не там, где показывает точное значение, а там, где остановит её

сила трения... Приборы любой конструкции имеют такие ограничивающие факторы.

Для характеристики каждого конкретного измерения используют его *абсолютную погрешность*, т. е. модуль разности между точным значением величины и её значением, полученным в результате измерения:

$$\Delta a = |a_{\text{истинное}} - a_{\text{измеренное}}|$$

Правда, истинное значение величины узнать нельзя; зато с помощью серии измерений и обработки их результатов можно найти её приближительное значение и оценить возможное отклонение от него измеренной величины. В этом и заключается смысл обработки результатов эксперимента.

Однако абсолютная погрешность не всегда характеризует точность измерений. Велика ли ошибка в определении скорости, если она составляет 10 м/с? Для инспектора ГИБДД, следящего за порядком на дороге, это, видимо, существенно: ведь величина скорости автомобиля (во всяком случае, разрешённая правилами дорожного движения) порядка 20—30 м/с. А вот при измерении скорости света ($3 \cdot 10^8$ м/с) такая ошибка достаточно мала.

Чтобы понимать, насколько велики ошибки по сравнению с самой измеряемой величиной, вводят *относительную погрешность* измерения:

$$\epsilon_a = \frac{\Delta a}{a_{\text{истинное}}}.$$

ИСТОЧНИКИ ОШИБОК

Ошибка ошибке рознь. Существует много их разновидностей. Часть из них связана с приборами, часть — с наблюдателем, часть — с методами обработки и расчёта.

— Алло! Это приёмная комиссия физфака?
— Нет. Какой номер вы набираете?
— 123–45–67.
— Вас неправильно соединили. Это 123–45–68, и здесь дискотека.
— Подумать только! Ошибка в седьмом знаке, а какой эффект...





Приборная погрешность проявляется из-за несовершенства измерительной аппаратуры (например, большая сила трения, действующая на стрелку прибора). *Погрешность округления* возникает при считывании значения со шкалы: измерив линейкой с миллиметровыми делениями диагональ в квадрате со стороной 100 мм, получим не точное значение $100\sqrt{2}$ мм, а приблизительное – 141,5 мм с погрешностью примерно в $1/3$ цены деления шкалы (если точнее, цену деления нужно разделить на $\sqrt{2}$). Для повышения точности считывания придуманы различные приспособления (нониусы и верньеры), однако учитывать погрешность, значительно меньшую, чем приборная, не имеет смысла.

Как нет идеальных приборов, так нет идеальных экспериментаторов. В процессе измерений человек привносит свои, *субъективные погрешности*. Например, точность измерения секундомером ограничена временем реакции, равным 0,1—0,2 с.

Ошибки возникают и после проведения эксперимента. Ведь бывают измерения *прямые* (когда прибор показывает непосредственно интересующую исследователя величину) и *косвенные* (когда её приходится рассчитывать исходя из полученных данных). Пример первых — измерение длины линейкой или силы тока амперметром; пример вторых — измерение диаметра горошины d по длине цепочки L из десятка горошин $d = L/10$ или определение ускорения свободного падения g по времени падения тела t и пройденному им пути h : $g = \frac{2h}{t^2}$.

Косвенные измерения требуют расчётов, а значит, появляется *погрешность вычислений*, ведь при любом вычислении приходится округлять результат: даже самый точный калькулятор вместо точного значения $\frac{2}{3}$ использует десятичную дробь конечной длины (0.66666667). Посколь-



ку расчёты ведутся по формулам, созданным на основе определённой модели явления, то может обнаружиться и погрешность метода (или *методическая погрешность*). Если при измерении, например, ускорения свободного падения увеличивать высоту, с которой тело отправляют в полёт, то рано или поздно станет заметным влияние сопротивления воздуха и простая расчётная формула

$g = \frac{2h}{t^2}$ даст неверный результат.

При проведении серии измерений иногда приходится сталкиваться с так называемыми *грубыми ошибками* или *промахами*, которые резко отличаются от основной массы результатов. Источники этих ошибок весьма разнообразны. Причинами могут быть сотрясение прибора, изменение напряжения в электрической сети, наводки от сильных электрических разрядов и просто невнимательность того, кто вёл измерения. Такие результаты обычно игнорируют.

СЛУЧАЙ ИЛИ СИСТЕМА?

Итак, источники ошибок известны: это и приборы, и наблюдатель, и способ обработки результатов измерений. Следовательно, погрешности будут всегда. Но часть их при грамотном планировании эксперимента можно уменьшить.

В неистовстве всё знать,
Всё взвесить, всё измерить
Проходит человек по лесу
естества

Сквозь тернии кустов,
Всё дальше... Время верить,
Что он найдёт свои
всёмирные права.

Эмиль Верхарн

Письмо в редакцию

«Дорогая редакция!

Формулировку закона Ома необходимо уточнить следующим образом: «Бези использовать тщательно отобранные и безупречно подготовленные исходные материалы, то при наличии некоторого навыка из них можно сконструировать электрическую цепь, для которой измерения отношения тока к напряжению, даже если они производятся в течение ограниченного времени, дают значения, которые после введения соответствующих поправок оказываются равными постоянной величине».

Копенгаген. А. М. Б. Розенф.

Из книги «Физики шутят»



Характер погрешностей тоже различен. Некоторые из них проявляются постоянно, а потому называются *систематическими*. Другие меняются от измерения к измерению непредсказуемым образом и являются *случайными*. Предположим, что два приятеля, Петя и Вася, решили измерить ускорение свободного падения по времени полёта тела. Петя забирается на n -й этаж многоэтажного дома и по команде Васи сталкивает оттуда тяжёлый (чтобы сопротивление воздуха не влияло) чемодан. Вася же кричит Пете: «Бросай!». И одновременно включает секундомер.

Систематическими в этом эксперименте будут субъективная ошибка измерения времени, приборная ошибка секундомера и ошибка метода: ведь Петя бросает чемодан не тогда, когда начинается отсчёт времени, а тогда, когда до него доходит звук. Но присутствуют и случайные ошибки: во-первых, лёгкое дуно-



вание ветерка может задержать падающее тело в полёте (или, наоборот, убыстрить его), а во-вторых... Высоту полёта в данном эксперименте вряд ли можно узнать с помощью прямого измерения: весьма сложно справиться с линейкой, длина которой несколько десятков метров. Поэтому придётся либо замерить высоту одного этажа и умножать её на n (а где же бывают строго одинаковые этажи?), либо отметить нужную высоту верёвкой и уже её измерять какой-нибудь более короткой линейкой. Можно провести самостоятельное исследование: попробовать несколько раз определить длину стены комнаты при помощи 20-сантиметровой линейки. Результаты будут различаться — на миллиметры или на сантиметры. Это зависит от аккуратности экспериментатора, который, прикладывая линейку к концу уже измеренного отрезка, обязательно чуть-чуть её сдвинет, и начало следующего интервала измерения не совпадёт с концом предыдущего. Предсказать, как изменится результат следующего измерения, нельзя.

Так Его Величество Случай вторгается в процесс измерения. Совсем избавиться от этого невозможно. А можно ли учесть?

ВЕРШКИ И КОРЕШКИ

К сожалению, не существует надёжных критериев, позволяющих отличить сбой в аппаратуре или ошибку оператора от случайного значительного отклонения измеряемой величины. Показательна следующая история, рассказанная М. И. Подгорецким из Дубны.

Две группы физиков, занимавшихся исследованием частиц космических лучей с высокими энергиями, изучали, как изменится число регистрируемых частиц, если на пути лучей поместить толстый слой вещества. Члены одной группы считали, что из-за поглощения в веществе это количество уменьшится; другие же предполагали, что эффект размножения частиц при взаимодействии с веществом будет более существенным, чем поглощение, и, значит, число регистрируемых частиц увеличится. В результате измерений каждая группа получила итог, согласующийся с её собственным прогнозом!

Последующий анализ выявил причину странной ситуации. Частицы с большой энергией прилетают довольно редко. Если участники группы, ожидавшей уменьшения числа частиц, сталкивались с тем, что детекторы начинали срабатывать часто, они подозревали, что искрят контакты. Члены другой группы действовали совершенно иначе: сомнения в качестве контактов возникали у них при долгом отсутствии срабатываний детекторов. Поскольку измерения за подозрительный период времени и те, и другие отбрасывали, то в одном случае не учитывались большие значения случайной величины, а в другом маленькие. Естественно, средние значения числа частиц, зарегистрированных этими группами, оказались различными.



ОШИБАЙТЕСЬ ТОЧНО

Чтобы понять, как учитывать случайные ошибки, придётся рассмотреть понятие, пришедшее в физику из азартных игр. Речь пойдёт о *вероятности*, занявшей с XIX в. прочное место в физических теориях. Нагляднее всего это можно сделать на примере игральной кости (кубик с обозначенным на каждой грани числом очков). Появление числа от 1 до 6 в результате броска называют *событием* или *исходом*.

При достаточно большом числе бросков N количество выпавших единиц N_1 , двоек N_2 , троек N_3 и т. д. практически одинаково (если кубик сделан из однородного материала). Чем больше количество бросков (*выборка*), тем меньше различия между количеством выпавших цифр. Эти события называют *равновероятными*, а число $p(N_i) = \frac{N_i}{N}$ — вероятностью события i (при большом числе бросков, или, как говорят, при большой статистике). В данном случае вероятность любого события

$p = \frac{1}{6}$. Если бы кубик был шулерским (т. е. утяжелённым на какой-либо грани), то частоты выпадения разных граней различались бы, но одно осталось неизменным: сумма вероятностей всех возможных исходов даст единицу.

Такое определение вероятности не вполне строго с математической точки зрения, но помогает понять правила работы со случайными погрешностями. Однако оно не сделает легче обработку итогов эксперимента, ведь результат измерения, как правило, число не целое, а дробное (рациональное): измеряемая величина не *дискретная*, а *непрерывная*. Повторение чисел в результатах измерений случается редко, и поэтому вероятность повтора какого-то конкретного числа крайне низка (и уменьшается при росте выборки).

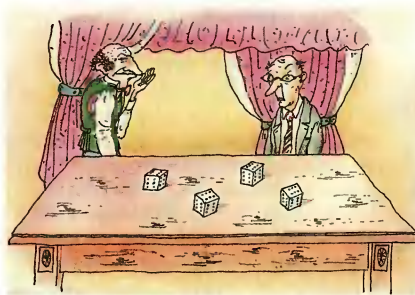
Тогда говорят о вероятности $p(x, \Delta x)$ попадания числа-результата x в какой-то интервал Δx (например, от 10,34 до 10,35) и вводят *плотность вероятности* $w(x) = \frac{p(x, \Delta x)}{\Delta x}$. Это уже не число, а функция.

Если известно распределение вероятностей $p(N_i)$ для всех возможных исходов или $w(x)$ для непрерывно меняющейся величины, то можно рассчитать среднее значение, вокруг которого колеблются получаемые значения. Это и есть наша цель, истинное значение величины — её *математическое ожидание*. На примере игральной кости можно заметить любопытное соотношение, избавляющее исследователя от необходимости долго и нудно суммировать результаты многих «экспериментов» при известном распределении вероятностей. В самом деле, количество выпавших единиц, двоек и т. д. одинаково и равно $1/6$ от числа бросков N ; значит, чтобы определить среднее арифметическое от всех выпавших значений, достаточно вычислить значение выражения

$$\frac{1 \cdot \frac{N}{6} + 2 \cdot \frac{N}{6} + 3 \cdot \frac{N}{6} + 4 \cdot \frac{N}{6} + 5 \cdot \frac{N}{6} + 6 \cdot \frac{N}{6}}{N} =$$

$$= 1 \cdot \frac{1}{6} + 2 \cdot \frac{1}{6} + 3 \cdot \frac{1}{6} + 4 \cdot \frac{1}{6} + 5 \cdot \frac{1}{6} + 6 \cdot \frac{1}{6} =$$

$= 3,5$. Но оно равно $1 \cdot p_1 + 2 \cdot p_2 + 3 \cdot p_3 + 4 \cdot p_4 + 5 \cdot p_5 + 6 \cdot p_6$. В общем случае, даже если вероятности не одинаковы, математическое ожидание





будет $M = \sum N_i p(N_i)$ или, для непрерывной величины, $M = \int_{x_{\min}}^{x_{\max}} x w(x) dx$.

Математическое ожидание не единственная характеристика распределения. Если на грани кубика нанести три тройки и три четвёрки, то среднее значение выпавших очков будет тем же, однако результаты отдельных бросков будут более плотно располагаться вокруг него. Ширину распределения (степень его «размазанности») описывают средним значением квадрата отклонения от математического ожидания (отклонение возводят в квадрат, чтобы суммировать неотрицательные числа и не получить в сумме нуль). Эта величина называется *дисперсией*:

$$D = \sum (M - N_i)^2 p(N_i)$$

или

$$D = \int_{x_{\min}}^{x_{\max}} (M - x)^2 w(x) dx.$$

Квадратный корень из дисперсии σ называют *стандартным отклонением*.

РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ГАУССА

Отвлечёмся ненадолго от интегралов и проведём простой мысленный эксперимент. Совершим виртуальную прогулку в воображаемый парк, разбитый в форме квадрата со входами по углам. Парк пересечён дорожками, образующими правильную квадратную сетку, параллельную его краям.

Пройдёмся по нему, взяв за правило удаляться от точки входа. Это значит, что на каждом перекрёстке можно выбрать только два пути: вправо вниз или влево вниз (при условии, что вход был в верхнем углу). Если не задумываясь поворачивать направо или налево, то путешествие станет случайным,

т. е. нельзя будет точно предсказать, где окажется гуляющий, пройдя несколько квадратов. Однако вероятность «попадания» на тот или иной перекрёсток можно рассчитать!

В самом деле, пройдя один квадрат от входа, мы с равной вероятностью окажемся или в точке A_0 , или в точке A_1 . И там, и там возможно свернуть как направо, так и налево; поэтому после прохода двух квадратов шансы оказаться в точках B_0 и B_2 одинаковы, а вероятность прийти в B_1 в два раза выше. Вспомнив, что сумма всех этих вероятностей равна единице, получим

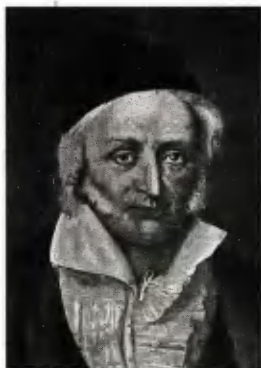
$$p(B_0) = p(B_2) = 1/4, \quad p(B_1) = 1/2.$$

Несложно проследить, сколькими путями можно попасть в разные точки парка, и рассчитать соответствующие вероятности. На рисунке показаны две зависимости вероятности p прихода в точку от её расстояния x до диагонали парка для 10 и 15 пройденных квадратов. Выясняется интересная закономерность: функция $p(x)$ имеет колоколообразный вид, причём чем выше «колокол», тем он уже. Чем больше случайных факторов влияет на результат (чем больше квадратов пройдено), тем лучше распределение вероятностей описывается формулой

$$p(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(M-x)^2}{2\sigma^2}},$$

где $M = 0$ — математическое ожидание, $\sigma = \frac{\sqrt{N}}{2}$ — стандартное отклонение. Это *нормальное распределение*, или *распределение Гаусса*. Оно проявляется всякий раз, когда значение величины подвержено действию многих случайных, не зависящих друг от друга факторов (представляет собой их сумму), а ведь как раз такая ситуация возникает в процессе измерения. Именно это свойство нормального распределения делает его столь универсальным и важным в практических исследованиях.

Карл Фридрих Гаусс.





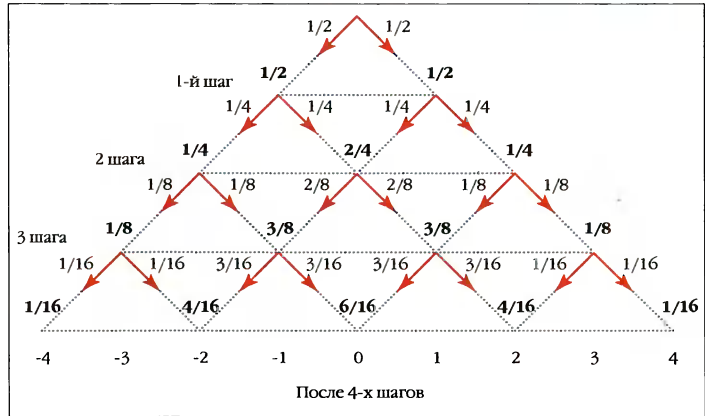
Вот лишь некоторые примеры ситуаций, приводящих к нормальному распределению. Если для большой группы людей составить распределение по росту или весу, то окажется, что оно близко к нормальному, поскольку рост и вес каждого человека определяются большим количеством случайных параметров. При взвешивании предмета на очень точных весах источниками случайных отклонений результата могут быть пылинки, садящиеся на чашки весов и взлетающие с них, потоки воздуха, вибрация стола и многое другое. К нормальному распределению приводят и измерения числа космических частиц, пролетающих через данную площадку, и количество распадов радиоактивных ядер в образце за достаточно большое время.

На графике $p(x)$ для нормального распределения математическое ожидание — это та точка, где функция максимальна (кстати, относительно неё распределение симметрично). Стандартное отклонение нормального распределения тоже можно найти по графику: это такое расстояние от точки максимума, где значение функции падает в $\sqrt{e}$ раз (примерно 0,6 от максимального).

В интервал от $M - \sigma$ до $M + \sigma$ попадает около 68 % всех исходов, т. е. результатов измерений. Если этот интервал увеличить вдвое, в него попадёт приблизительно 95 % исходов, а если утроить — почти 99 %.

СЛУЧАЙНЫЕ ПОГРЕШНОСТИ

Теперь можно перейти от теории к экспериментальной физике. Предположим, что случайная величина, которую требуется измерить, имеет нормальное распределение, основной параметр которого (математическое ожидание) и предстоит найти. Дело это непростое, потому что рассчитать чрезвычайно трудно: число измерений всегда не бесконечно



и о характеристиках распределения можно только догадываться по выборке — набору экспериментальных данных. Поэтому можно рассчитать только *выборочное среднее* и *дисперсию выборки*. Для n измерений, каждое из которых даёт значение x_i ,

выборочное среднее $\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i$ (хорошо знакомое среднее арифметическое), а дисперсия, или квадрат *выборочного стандартного отклонения*,

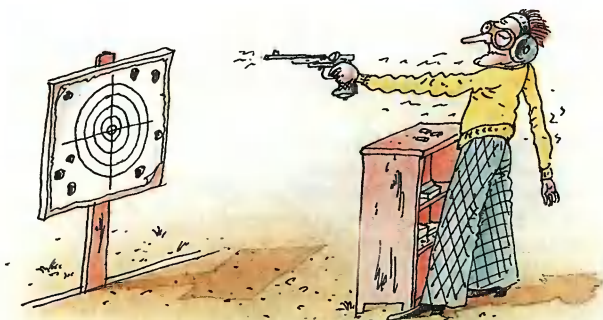
$s_x^2 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2$ (усреднённый квадрат отклонения от среднего). Насколько они близки к истинным значениям M и D ?

При измерении вероятность большого отклонения каждого полученного результата от математического



ЗАКОН ВЕРОЯТНОСТНОГО ДВИЖЕНИЯ

Интересно проследить, как изменяется в ходе прогулки по парку ширина области, в которой (с большей вероятностью) находится гуляющий. Ширина этой области (расстояние до диагональной дорожки) пропорциональна среднеквадратичному отклонению, т. е. квадратному корню из числа пройденных «кварталов». Так что если запустить в парк толпу гуляющих с одинаковой скоростью людей, то размер этой толпы будет расти пропорционально корню из времени прогулки. Аналогично растёт, например, диаметр капли чернил в воде: ведь движение молекулы чернил — это случайное блуждание между молекулами воды.



ожидания (погрешность данного измерения) тем выше, чем больше дисперсия распределения величины. Но если провести много измерений, то они почти наверняка окажутся разбросанными вокруг математического ожидания. Поэтому наилучшей *оценкой математического ожидания* является выборочное среднее значение результатов измерений, а за *оценку дисперсии* принимается дисперсия выборки. Чем больше количество проведённых измерений, тем ближе экспериментально найденные оценки дисперсии к истинным значениям.

Если проделать достаточно много серий по n измерений в каждой и найти *распределение средних значений*, то окажется, что они тоже подчиняются нормальному распределению. Однако дисперсия этого распределения в n раз меньше, чем дисперсия распределения самой случайной величины. Поэтому *стандартное отклонение среднего*, характеризующее возможное отклонение найденного среднего арифметического от истинного значения (математического ожидания), при проведении n измерений равно

$$s_{\bar{x}} = \frac{1}{n} \sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} = \frac{1}{\sqrt{n}} s_x.$$

Окончательный результат измерений записывается в виде $x = \bar{x} \pm s_{\bar{x}}$.

Интервал $(\bar{x} - s_{\bar{x}}, \bar{x} + s_{\bar{x}})$ называется *доверительным интервалом*. Математическое ожидание попадёт в него в 68 % случаев (это значение называется доверительным уровнем).

Если необходимо иметь большую уверенность в том, что математическое ожидание находится внутри доверительного интервала, то стандартную погрешность умножают на коэффициент, зависящий от доверительного уровня, — например, $x = \bar{x} \pm 2s_{\bar{x}}$ (доверительный уровень 95 %) или $x = \bar{x} \pm 3s_{\bar{x}}$ (99 %).

Интересный вывод можно сделать, проанализировав влияние случайных ошибок на измерения двух независимых источников. Для расчёта итоговой погрешности самое простое решение — сложить стандартные отклонения для обоих источников — не годится, и вот почему. Представим себе стрелка, который прицеливается в мишень. Стрелок не идеальный, поэтому у него немного дрожат руки (из-за чего прицел смещается вправо-влево) и качается голова (прицел ходит вверх-вниз). Если каждый из этих факторов по отдельности приводит к разбросу пуль на мишени по горизонтали на Δx и по вертикали на Δy , то при их совместном одновременном действии разброс увеличится до

$\Delta z = \sqrt{(\Delta x)^2 + (\Delta y)^2}$. Такое же правило применимо и к погрешностям, вызванным не зависящими друг от друга причинами: суммируются не стандартные отклонения, а дисперсии распределений: $D_z = D_x + D_y$.

ИТОГ И РЕЗУЛЬТАТ

При записи результатов измерений соблюдаются некоторые правила. Погрешность измерения обычно округляется до одной цифры, если первая цифра, отличная от нуля, больше 2, и до двух цифр, если она меньше или равна 2. Например, если

«О Я. И. Френкеле рассказывают, что якобы в ФТИ в 30-е годы его изловил в коридоре некий экспериментатор и показал полученную на опыте кривую. Подумав минуту, Я. И. дал объяснение хода этой кривой. Однако выяснилось, что кривая случайно была перевернута вверх ногами. Кривую водворили на место, и, немного поразмыслив, Я. И. объяснил и это поведение кривой».

Из книги «Физики шутят»



ОЦЕНКИ

Некоторые важные величины так и не удаётся определить достаточно точно и сколько-нибудь надёжно рассчитать погрешности измерения. Подобные измерения обычно называют *оценками*. Типичными примерами являются оценки расстояний до наиболее удалённых галактик по красному смещению, оценки возраста Земли, полученные по изучению радиоактивности элементов земной коры. Иногда говорят об «оценке по порядку величины». Это значит, что приведённая величина отличается от истинного значения скорее всего не более чем в три—четыре раза. Приведём пример такой оценки, ответив на вопрос: сколько настройщиков роялей в Москве?

Население Москвы порядка 10 млн человек (разница в полтора-два раза при оценке несущественна). При среднем размере семьи в 3 человека можно считать, что в городе приблизительно 3 млн семей. Наверное, каждая 20-я семья имеет рояль или пианино. Каждое из 150 тыс. фортепиано требует настройки раз в год-полтора, т. е. настройщиков в Москве вызывают 100 тыс. раз в год. Если считать, что настройщик работает 250—300 дней в году и тратит день на один вызов, то разумной оценкой представляется 300—400 представителей этой профессии.

Мастером оценок был, в частности, физик Энрико Ферми. На испытаниях первой атомной бомбы (США, 16 июля 1945 г.) сразу после взрыва он встал и начал разбрасывать мелко изорванную бумагу. Когда через несколько секунд пришёл фронт ударной волны, Ферми, прикинув, на какое расстояние отбросила волна клочки бумаги, сразу оценил мощность взрыва (расстояние до эпицентра ему, конечно, было известно, и соответствующие расчёты он сделал заранее). Анализ показаний многочисленных приборов, проведённый позднее, подтвердил оценку Ферми.



КВАНТОВЫЕ ОГРАНИЧЕНИЯ

Будем под Δx понимать величину стандартного отклонения x -координаты тела от математического ожидания, а под Δp_x — величину стандартного отклонения x -компоненты импульса. В квантовой механике эти отклонения называют *неопределённостями координаты и соответствующей проекции импульса*. Согласно соотношению неопределённостей Гейзенберга, эти неопределённости удовлетворяют соотношению $\Delta x \cdot \Delta p_x > \frac{\hbar}{2}$. Здесь $\hbar$ — постоянная

Планка, которая примерно равна $1,055 \cdot 10^{-34}$ Дж·с. Это ограничение отражает природу квантовых объектов и никак не связано с техническим несовершенством измерительных приборов. Поскольку $\Delta p_x = m \cdot \Delta v_x$, то

$\Delta x \cdot \Delta v_x > \frac{1}{m} \frac{\hbar}{2}$. Для тела, масса которого порядка 1 кг, а координата имеет неопределённость порядка размера атома

(1 Å), неопределённость скорости будет порядка 10^{-24} м/с. Эта величина настолько мала, что в технических и бытовых измерениях её принимают равной нулю.

Однако иногда квантовые ограничения на точность приходится учитывать и при измерениях, проводимых с макроскопическими объектами. При попытках зарегистрировать гравитационные волны в качестве антенн используют металлические цилиндры, причём следует учесть их колебания с амплитудой порядка 10^{-20} м. Необходимо принять во внимание ограничения, накладываемые соотношением неопределённостей.

Не противоречит ли такая высокая точность тому, что само положение атома нельзя определить даже с точностью на много порядков меньшей? Ответ в том, что датчики следят не за одним, а за огромным количеством (N) атомов и фиксируют их среднее смещение. А его

неопределённость в $\sqrt{N}$ раз меньше неопределённости положения одного атома.

найденные в результате проведённых измерений погрешности равны ± 83 , $\pm 0,0218$, то их записывают так: ± 80 , $\pm 0,022$. Соответственно в записи среднего значения измеренной величины последняя цифра должна быть в том же разряде, что и последняя

цифра в погрешности, например $(2,587 \pm 3) \cdot 10^2$, $4,775 \pm 0,022$.

В физических справочниках цифры, в которых возможна ошибка, как правило, заключены в скобки. Например, гравитационная постоянная $G \approx 6,67259(85) \cdot 10^{-11} \text{ м}^3 \cdot \text{кг}^{-1} \cdot \text{с}^{-2}$.



ИСКУССТВО ЭКСПЕРИМЕНТА

Эксперимент наряду с теорией — один из двух столпов физической науки. Это не просто созерцание происходящих вокруг явлений, а наблюдение за процессом, протекающим в определённых, заданных экспериментатором условиях; по определению Фрэнсиса Бэкона, это «вопрос природе». Эксперимент, как говорил российский физик-теоретик академик Аркадий Бейнусович Мигдал, «испытывает предсказания теории на прочность. Когда теория наконец не выдержит, строится новая, с учётом старых фактов и тех, что появились при проверке».

Существуют как великие теории, так и великие эксперименты. Они не только остаются в лабораторных отчётах и научных журналах, но и изменяют, прямо или косвенно, нашу повседневную жизнь. За них получают премии. О них рассказывают истории и складывают легенды.

Пожалуй, первый великий эксперимент был проведён Архимедом из Сиракуз. История с короной царя Гиерона не только сделала его «отцом криминалистики», но и показала, как исследователь в ходе поисков ответа на один вопрос может найти решение совсем иной проблемы. Однако важнее другое: Архимед был, наверное, первым учёным, опиравшимся и на теорию, и на эксперимент. Его закон плавания тел — результат наблюдений и эксперимента, закон рычага — итог размышлений и догадок. Из механики Архимеда в большей мере, чем из умозрительных рассуждений Аристотеля, выросла физическая наука.

Каждое открытие появляется на свет по-своему: в результате поиска или по прихоти случая. Предсказанные открытия можно буквально пересчитать по пальцам, зато в этом ряду есть такое яркое событие, как создание лазера: в 1953 г. научились использовать эффект, предсказанный Альбертом Эйнштейном ещё в 1916 г. Также в результате целенаправленного поиска немец Йоханнес Георг Беднорц и швейцарец Карл Александер Мюллер обнаружили высокотемпературную сверхпроводимость.

Гораздо больше в физике открытий случайных, возникающих как будто «на пустом месте». Но великий французский биолог Луи Пастёр однажды сказал, что случай помогает только подготовленному уму. Яркий тому пример — открытие другого француза, Антуана Анри Беккереля. Исследуя люминесценцию различных веществ, учёный предполагал, что она не только вызывается рентгеновскими лучами, но и может порождать их. Проведённые на основе ошибочной идеи эксперименты тем не менее закончились в 1896 г. открытием радиоактивности.

Иногда новое не замечают, проходят мимо него. Ведь учёный может просто не увидеть того, что не укладывается в привычную ему картину мира. Немецкий физик Кунце в 1933 г. наблюдал в камере Вильсона частицу в 200 раз тяжелее электрона. Это был мю-мезон. Однако, поскольку такие частицы не были известны, он счёл своё наблюдение ошибкой опыта. Повторно мезон открыли

в 1938 г. американцы Карл Дэвид Андерсон и С. Недермейер.

Обстоятельность может не только помочь в открытии нового, но и помешать. Английский физик Даниэль Колладон в 1825 г., за шесть лет до открытия явления электромагнитной индукции Майклом Фарадеем, проводил очень похожие эксперименты. Так же как и Фарадей, он подключал к чувствительному гальванометру катушку, в которую вдвигал магнит, — в этот момент по катушке протекал электрический ток. Но предосторожностей иногда бывает слишком много: чтобы уменьшить влияние магнита на гальванометр, Колладон располагал приборы в разных комнатах. Пока он не спеша доходил от магнита к измерительному прибору, стрелка успокаивалась. Не ожидая столь кратковременного эффекта, учёный не смог сделать открытия, которое удалось Фарадею, — тому помогал ассистент.

Некоторые исследователи находились на пороге открытия, но им не хватило маленького шага. Первый высокотемпературный сверхпроводник был получен за несколько лет до открытия Беднорца и Мюллера. В 1979 г. российский учёный И. С. Шаплагин с соавторами из Института общей и неорганической химии АН СССР исследовал проводимость соединений лантана, меди, кальция, стронция и бария, в том числе и таких, которые соответствовали сверхпроводящему веществу. Однако проводимость в области низких температур просто не догадались измерить.

Экспериментатор ищет ответы там, где другие не видят вопроса. Открытие Исааком Ньютоном составного характера белого света произошло потому, что исследователь поставил вопросы, до которых ранее никто не додумался. Эксперимент действительно искусство задать вопрос природе, сделав это остроумно и изящно.

Однако мало получить ответ, его необходимо ещё и понять. Ведь результат может оказаться парадоксальным, не укладывающимся в сложившуюся систему научных представлений, и тогда исследователю нужны смелость, чтобы признать его, и твёрдая уверенность в правильности результата. Такие эксперименты изменяют наши понятия о мире и облик цивилизации.





КАК ФИЗИКИ ПОЗНАЮТ МИР

ОТ ЭКСПЕРИМЕНТА К ТЕОРИИ

С чего начинается работа физика? Проводя опыт (эксперимент), физик как бы вопрошает природу. А для того чтобы её ответ был ясным и чётким, требуется особое искусство: вопрос природе нужно задавать так, чтобы исключить различные толкования ответа, т. е. он должен быть однозначным и доказательным. Этот ответ природа даёт в виде показаний приборов. В прошлом приборы были простыми. Считалось, что тот, кто не способен собрать нужный ему прибор из подручных материалов, имеющихся в любой лаборатории, — стеклянных трубок, обрезков резиновых шлангов, палочек, сургуча и т. п., — не достоин звания физика. Со временем вопросы, которые физики задавали природе, стали более изощрёнными, касались всё более тонких и сложных явлений, и приборы соответственно стали сложнее.

Если есть возможность, эксперимент повторяют: воспроизводимость результатов — веский аргумент в пользу правильности полученных данных, позволяющий исключить случайную ошибку. В итоге у физиков скапливается целый ворох чисел, кривых, видеоматериалов и т. п., характеризующих исследуемое явление. Экспериментаторы с поистине

пчелиным трудолюбием начинают разбираться в путающем своим объёмом массиве полученных данных. В таком «сыром виде» информация труднообозрима, и работать с ней неудобно. Её необходимо сжать, придав вид той или иной зависимости или записав в виде уравнения.

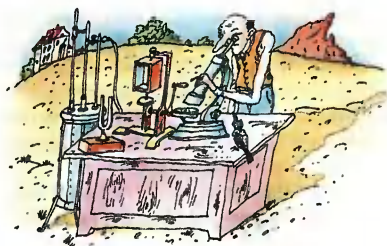
Вывод уравнения всегда большая удача исследователя, но это не финал, а лишь новый шаг на долгом пути от первичных экспериментальных данных к ответу на вопрос, поставленный природе. Первый вариант уравнения напоминает только что вытупившегося птенца: оно не радует взгляд ценителя математической красоты. Тем не менее оно уже содержит в сжатом виде драгоценную информацию, прежде затерянную, как иголка в стоге сена, во множестве экспериментальных данных. Вряд ли найдётся хотя бы один физик, который стал бы отрицать изящество уравнений Максвелла. Но в первоначальном виде они были далеко не так красивы. Лишь Генрих Герц и его последователи довели уравнения Максвелла до совершенства.

Далее уравнения нужно решать. Исследователи обращаются за помощью к математике, накопившей в своём арсенале немало мощных методов решения различных типов уравнений. Существует целый раздел математики — математическая физика, — который занимается только

«Многие указывали, что процесс превращения гипотезы в научное открытие очень хорошо иллюстрируется на примере открытия Америки Колумбом. Колумб был одержим идеей, что Земля круглая и что можно достичь Восточной Индии, плывя на Запад. Обратите внимание на следующее:

- а) идея никоим образом не была оригинальной, но он получил новую информацию;
- б) он встретился с огромными трудностями как в поиске лиц, которые могли бы его субсидировать, так и непосредственно в процессе проведения эксперимента;
- в) он не нашёл нового пути в Индию, но зато нашёл новую часть света;
- г) несмотря на все доказательства противного, он всё же верил, что открыл дорогу на Восток;
- д) при жизни он не дождался ни особого почёта, ни существенного вознаграждения;
- е) с тех пор были найдены неопровержимые доказательства, что Колумб был не первым европейцем, достигшим Америки».

Из книги «Физики шутят»





Огромный загадочный мир

«...Одной из главных причин потока научной литературы является то, что, когда исследователь достигает стадии, на которой он перестаёт видеть за деревьями лес, он слишком охотно склоняется к разрешению этой трудности путём перехода к изучению отдельных листьев».

«Ланцет»,
декабрь 1960 г.

«Чем дальше эксперимент от теории, тем ближе он к Нобелевской премии».

Ф. Жюлио-Кюри

разработкой и усовершенствованием методов решения задач (в частности, уравнений), возникающих в физике.

Наконец наступает счастливый финал: выведенное уравнение удалось решить. Раньше под решением уравнения понимали получение аналитического решения, т. е. формулы. Теперь в связи с широким распространением компьютеров под решением уравнения понимают численный результат, представляемый в виде таблицы или графика на дисплее компьютера. На этом этапе физика не может заменить даже самый искусный математик: полученное решение необходимо истолковать, интерпретировать, выяснить его физический смысл. Иными словами, происходит важнейший процесс перехода от формальной (функциональной) зависимости к содержательному описанию изучаемого явления.

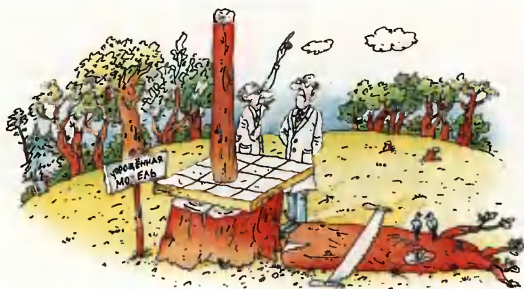
Однако уравнение и его решение — ещё не окончательный итог поисков. В уравнении речь идёт о функциональной зависимости, отвечающей на вопрос «как?», а не о причинной зависимости, отвечающей на вопрос «почему?» («с помощью какого механизма?»). Пример функциональной зависимости — выведенный Ньютоном закон всемирного тяготения. Отвечая на вопрос о том, как тела притягивают друг друга, этот закон умалчивает о природе гравитации. Когда Ричард Бентли спросил Ньютона в письме, что же такое тяготение, тот ответил, что у него есть

кое-какие догадки на этот счёт, но достоверно ответ ему неизвестен. Природа тяготения неясна и поныне.

Достигнув определённого уровня понимания исследуемого явления, физик делает следующий шаг — пытается построить его модель. Модели бывают разные. Если необходимо воспроизвести какие-нибудь физические, химические, биологические или геометрические свойства исследуемого предмета, явления, то модель называется предметной. К их числу относятся, например, аналоговые модели, при построении которых используют одинаковость математических зависимостей, или уравнений, описывающих исследуемое явление и его аналог. На раннем этапе развития вычислительных машин аналоговые модели широко применялись при расчёте различных физических процессов.

Наибольшее значение в физике приобрели так называемые математические модели. Как правило, это дифференциальные уравнения, описывающие исследуемое явление. Математическая (как и всякая другая) модель — не точный портрет, воспроизводящий исследуемое явление в мельчайших подробностях, а скорее его карикатура, на которой одни свойства преувеличены для лучшей узнаваемости, а другие — стёрты. Тем не менее хорошая модель, по выражению одного из основателей кибернетики — Эшби, может быть «умнее своего создателя», т. е. описывать не только те свойства, которые имел в виду её автор, но и другие, иногда совершенно неожиданно для него. Производя над математической моделью численный или компьютерный эксперимент, физики познают исследуемое явление. В конце XX в. компьютерное моделирование получило широкое распространение, но когда-то оно было сенсацией.

Следующий шаг — создание теории явления, которая не только подводит итог всему уже сделанному, но





и рисует перспективы для дальнейшего исследования. Основой, или фундаментом, теории служат опытные данные. Ярусом выше располагаются гипотезы, допущения и аксиомы, общие законы — «строительный материал» моделей, образующих следующий уровень. Правила логического вывода служат своего рода лестницами, соединяющими различные ярусы. В верхнем ярусе располагаются утверждения, выводимые из всего, что лежит ниже.

Результаты физической теории передаются в какой-то момент инженерам, которые воплощают их в новые технические приборы, инструменты, позволяющие задавать новые вопросы природе. Цикл повторяется сначала, но не по замкнутому кругу, а по развёртывающейся — с каждым разом всё шире — спирали. Процесс познания бесконечен.

ПРИНЦИПЫ ФИЗИКИ

Эксперимент далеко не всегда служит отправной точкой для создания новой теории. Теория может не только идти вслед за опытом, но и значительно опережать его. Так случилось, например, с теорией Поля Адриена Мориса Дирака, который вывел своё знаменитое уравнение, опередив открытие спина электрона. В своей деятельности физика-теоретика Дирак руководствовался *принципом математической красоты* физической теории. Дирак писал: «Строительность какого-нибудь уравнения является более важным, чем соответствие его эксперименту... Если нет полного согласия результатов какого-либо теоретического исследования с экспериментом, это может быть обусловлено более тонкими деталями, которые не удалось принять во внимание!». Иначе говоря, если теория противоречит эксперименту, то либо она недостаточно красива, либо несовершенен эксперимент.

ОТКРЫТИЕ С ПОМОЩЬЮ КОМПЬЮТЕРА

По завершении Манхэттенского проекта (создания американской атомной бомбы) осталась «без работы» большая и быстродействующая по тем временам электронная вычислительная машина. Этим решили воспользоваться Энрико Ферми, Станислав Улам и сотрудник Ферми, физик Джон Паста. Они придумали математическую модель цепочки шариков, разделённых пружинками, которые создавали возвращающую силу, пропорциональную не первой степени отклонения от положения равновесия, как обычные пружинки, а квадрату отклонения. С помощью проставившего компьютера Ферми, Паста и Улам надеялись проследить за тем, как будет расплываться возмущение в такой цепочке. Предполагалось, что после достаточно большого числа циклов первоначальное возмущение равномерно распределится по всей цепочке. Но сколько ни «гоняли» компьютер, ничего похожего на равномерное распределение энергии по цепочке не наблюдалось. Это было необъяснимо!

Только через 12 лет парадокс Ферми — Пасты — Улама получил разрешение в работах Нормана Забуски, Мартина Крускала и Роберта Миуры. Оказалось, что в цепочке возникают особые волны — солитоны, которые не дают энергии равномерно распределяться по всей её длине. Солитоны — один из первых объектов нелинейной физики, которая начала бурно развиваться в конце XX в.

Ещё один интуитивный, неформальный принцип физики — *принцип простоты*. Как писал Макс Планк: «Я всегда держался мнения, что закон природы выражается тем проще, чем более общим он является».

Принципы красоты и простоты — не единственные и не самые надёжные из всех принципов, которые





Юджин Пол Вигнер.

«Под количеством действия надлежит понимать те издержки, на которые идёт природа, дабы осуществить движение света наиболее экономным образом...

Не подлежит сомнению, что всё на свете упорядочено тем Высшим Существом, которое сначала создаёт силу, действующую на материю, и тем самым являет своё могущество, а затем упорядочивает действия, демонстрируя свою мудрость...

После столь великих умов, работавших над этой проблемой, я едва осмеливаюсь довести до всеобщего сведения, что я открыл принцип, могущий служить основой всех законов движения... Какое удовлетворение для человеческого духа рассматривать эти законы, столь простые и прекрасные; возможно, это единственные законы, установленные Творцом и Организатором всех материальных вещей, которым следуют все явления видимого мира».

Из книги П. Л. М. де Мопертюи «О согласии различных законов природы, до сих пор считавшихся несовместимыми», 1744 г.

используют физики, создавая новые теории без «подсказки» эксперимента.

Исторически первый принцип теоретической физики — *принцип математичности* — был сформулирован Галилео Галилеем: «Книга природы написана на естественном языке — языке разума — языке математики». Открывая новую страницу этой книги, физик ищет соответствующий ей математический язык. Если в арсенале математики нет нужного «оружия», физик всё равно предполагает, что оно может быть создано. Так, при создании квантовой механики выяснилось, что имевшихся в математике того времени средств недостаточно. В ответ на «запрос» физиков была разработана теория операторов в бесконечномерном гильбертовом пространстве функций. Теория групп — математический аппарат теории симметрии — также получила мощный импульс от создания квантовой механики. Ныне арсенал математики основательно опустошён развитием нелинейной динамики. Многие объекты, считавшиеся экспонатами математической кунсткамеры и возникшие при уточнении оснований математики в начале XX в., оказались хорошими моделями реальных объектов и процессов. «Непостижимая эффективность математики в физике», по выражению американского физика Юджина Пола Вигнера, — одна из загадок мироздания.

Принцип соответствия описывает отношение между старой и новой физическими теориями. Они охватывают различные по объёму совокупности явлений. Но даже самая широкая теория имеет свои границы применимости — «теории всего» не существует. Как правило, в старой теории таится какой-нибудь параметр, который равен нулю или бесконечности, а в новой теории он принимает конечное значение. Например, в механике Ньютона энергия бесконечно делима, наименьшая порция энергии может быть сколь

ПРИНЦИПЫ СИММЕТРИИ

По словам выдающегося математика Германа Вейля, «симметрия... является той идеей, посредством которой человек на протяжении веков пытался постичь порядок, красоту и совершенство». Симметрия интуитивно воспринимается как гармония и соразмерность частей и целого. Об этом говорит и слово «симметрия», что в переводе с греческого означает «соразмерность».

В более строгом понимании *симметрия* какого-нибудь объекта (геометрической фигуры, молекулы, субатомных частиц, уравнений, физических законов и т. п.) — это совокупность преобразований, оставляющих объект неизменным, или инвариантным. Например, шар инвариантен относительно поворота на любой угол вокруг любого из своих диаметров: повернутый шар неразличим от шара в исходном положении. Нуклоны — нейтрон и протон — симметричны (неразличимы) в отсутствие электромагнитного поля. Уравнения Максвелла инвариантны относительно преобразований Лоренца.

Симметричные принципы являются инструментом в отыскании новых законов природы. Так, отсутствие в пространстве выделенной точки (однородность пространства) означает, что законы природы должны быть инвариантны относительно переноса системы координат. Отсутствие в пространстве выделенного направления (изотропия пространства) означает, что законы природы должны быть инвариантны относительно поворотов. Отсутствие выделенного начала отсчёта времени (однородность времени) означает, что законы природы должны быть инвариантны относительно сдвигов во времени, т. е. не меняются со временем.

К числу симметричных принципов относятся и принципы относительности Галилея и Эйнштейна: они утверждают, что описание физических процессов инвариантно, если переход от одной системы отсчёта к другой происходит соответственно с помощью преобразований Галилея или Лоренца.

Инвариантность физических явлений относительно сдвигов во времени порождает закон сохранения энергии, относи-



тельно сдвигов в пространстве — закон сохранения импульса, инвариантность относительно поворотов системы координат — закон сохранения углового момента.

Не всякий инвариант преобразования симметрии сохраняется во времени. Точные условия, при которых инвариант становится законом сохранения, даёт теорема Эмми Нётер (1882—1935), доказанная в 1918 г.

Симметрия фундаментальных взаимодействий в отличие от симметрии пространства и времени дискретна: законы природы инвариантны относительно пространственной инверсии P (изменения знака всех пространственных координат), обращения времени T и зарядового сопряжения C (замены частиц на античастицы). Сильное и электромагнитное взаимодействия инвариантны относительно каждого из преобразований C , P и T в отдельности. Слабое взаимодействие не инвариантно относительно преобразований C и P в отдельности, но инвариантно относительно их комбинации CP . Так как все взаимодействия инвариантны относительно одновременного выполнения сразу всех преобразований CPT , то слабое взаимодействие инвариантно и относительно обращения времени T .

Физическая система обладает симметрией не только относительно преобразований пространства и времени, но и относительно преобразований других параметров — дополнительных (к пространственно-временным) характеристик системы. Существуют теория зарядовой инвариантности ядерных сил

(изотопическая инвариантность), «цветовой» симметрии кварков, симметрии электрослабого взаимодействия, теория Великого объединения, которая пытается описать с единых позиций электромагнитное, слабое и сильное взаимодействия.

Исходя из принципов симметрии, Евграф Степанович Фёдоров доказал, что существует лишь конечное число типов кристаллов, Мюррей Гелл-Манн предсказал существование новой элементарной частицы.

В 1963 г. Юджин Пол Вигнер был удостоен Нобелевской премии по физике за вклад «в теорию атомного ядра и элементарных частиц, особенно с помощью открытия и приложений фундаментальных принципов симметрии». Международный союз чистой и прикладной физики учредил Вигнеровскую медаль, которой награждаются исследователи за развитие и успешное приложение симметричных принципов.

ВАРИАЦИОННЫЕ ПРИНЦИПЫ

Готфрид Вильгельм Лейбниц был убеждён в оптимальности всех действий природы и утверждал, что наш «мир — лучший из миров». Исследования физиков, математиков и механиков показали, что реально происходящие в природе процессы действительно обладают различными экстремальными свойствами. Поэтому были предложены так называемые *вариационные принципы* — общие дифференциальные и интегральные соотношения, позволяющие находить те процессы, которые соответствуют экстремальным (максимальным или минимальным) значениям различных величин. Вариационные принципы дают правила вывода уравнений движения в тех случаях, когда нельзя, например, напрямую воспользоваться законами Ньютона: нет сведений о всех приложенных к телу силах, или указаны лишь общие ограничения и связи, или известны не силовые, а только энергетические характеристики динамики тела.

В 1740 г. французский математик Пьер Луи Моро де Мопертюи (1698—1759) сформулировал экстремальный



принцип, позволяющий отличать реальное движение механической системы от всех прочих возможных. Согласно принципу Мопертюи, реальное движение отличается от всех возможных тем, что для него минимальна величина, называемая *действием* и имеющая размерность произведения энергии и времени (поэтому принцип Мопертюи часто называют *принципом наименьшего действия*).

Этот принцип позволял легко выводить уравнения движения, но соображения, из которых Мопертюи исходил при его выводе, вызвали серьёзные возражения у современников математика и последующих поколений учёных.

Каким образом движущееся тело, находясь на начальном участке траектории, «знает», как ему перемещаться далее так, чтобы по всей траектории действие было минимальным? Исаак Ньютон полагал, что движущееся тело «строит» свою траекторию точка за точкой.

Мопертюи на тот же вопрос дал ответ, который даже его современники, не говоря о потомках, сочли неприемлемым: движением тела управляет разумное Высшее Существо; оно устанавливает для тела конечную цель — минимизировать действия по траектории в целом.

Современную формулировку принципа наименьшего действия предложил Леонард Эйлер в XVIII в. Он вывел принцип наименьшего действия из математических свойств траекторий, записав действие как произведение количества движения на путь. Принцип Мопертюи — один из первых вариационных принципов, нашедший широкое применение в различных областях физики.



угодно мала, тогда как в квантовой механике существует конечная наименьшая порция энергии — квант. В механике Ньютона свет распространяется бесконечно быстро, в специальной теории относительности Эйнштейна информация распространяется с конечной скоростью.

Принцип соответствия был сформулирован в 1923 г. Нильсом Бором как косвенное подтверждение правильности выдвинутой им в 1913 г. теории строения атома и спектров излучения и поглощения. Бор установил, что между предложенной им неклассической теорией излучения и традиционной (классической) существует строгое соответствие.

Развитие научной теории можно сравнить с деревом, на поперечном распиле которого отчётливо видны годовичные кольца. Новая теория обьёмлет старую, подобно тому как новое годовичное кольцо включает в себя

предыдущее: в области, описываемой старой теорией, новая даёт те же результаты (иначе новая теория неверна). Вместе с тем она объясняет (или, по крайней мере, описывает) явления, недоступные объяснению или описанию старой теорией (иначе зачем была бы нужна новая?).

Расширение числа понятий, подвластных новой теории по сравнению со старой, происходит не всегда плавно и часто требует свежих, неординарных идей. Недаром Нильс Бор, отвергая очередного «кандидата» на почётное звание новой теории, заметил, что «эта идея недостаточно безумна для того, чтобы быть верной». Математически новая теория может в определённой области переходить в старую, но идеологически она принципиально непонятна с точки зрения прежних представлений. Историк науки Томас Кун назвал это *принципом несоизмеримости парадигм*.

В своих исследованиях физики могут поступать двояко: во-первых, выделять явление из окружающего мира, чтобы изучить его отдельно, и, во-вторых, пытаться рассматривать явление в его связи с природой. Над тем, кто разделяет первую точку зрения, довлеет опасность «умертвить» исследуемое явление, разорвав его живительные связи с окружающим миром. Они пытаются понять, как работает система, изучая её изолированную часть. Представителей этого направления называют редукционистами (от лат. *reducere* — «сводить сложное к более простому»). Другой подход — системный — основан на изучении явления или физического объекта в целом. Последователей этого метода принято называть холистами (от греч. «холос» — «весь», «целый»).

Редукционизм был лейтмотивом развития физики XX столетия. Учёные пытались отыскать «материальную точку» физики, её первичный объект, размерами которого можно было бы пренебречь (атомы, ядра, элементарные частицы, кварки и лептоны, струны...). Учёные надеялись, что такой фундаментальный объект удастся описать простым и удобным аппаратом линейной физики. Однако, дойдя до планковских масштабов (10^{-33} см), физики обнаружили, что самые фундаментальные на сегодня объекты — струны — должны иметь протяжённость. На этом движение вглубь, вероятно, исчерпывается, что предвещает очередной кризис физики. Впрочем, рубеж веков, тем более тысячелетий, — естественное время для кризиса. Но, как случилось и ранее, в предкризисной физике находились ростки новых направлений, выводящих её из тупика. Один из возможных ростков — нелинейные методы. Нелинейность, неизбежно присущая холистскому подходу, — новое измерение и направление развития физики с поистине необозримыми перспективами. Вероятно, физическая наука XXI столетия будет совершенно не похожа на всю предыдущую физику.

МЕХАНИЧЕСКАЯ КАРТИНА МИРА

Пространство, время, движение.
Динамика. Механика жидкостей и газов





МЕХАНИКА И ВСЕЛЕННАЯ



Зенон.
Гравюра. XVIII в.

До появления компьютеров весьма простой способ «интегрирования» использовался геологами, инженерами и химиками. Если им требовалось вычислить площадь под кривой, получаемой на самопишущих приборах, то в такие приборы заправлялась однородная по плотности бумага. После снятия показаний искомая площадь аккуратно вырезалась, а затем... взвешивалась на точных весах. Точность такого «интегрирования» не уступала возможностям современных компьютеров!

Противоречивость античных представлений о движении, пространстве и времени, вскрытая апориями Зенона из Элеи, привела естествознание к глубокому и затяжному кризису. По сути, на стадии зарождения физика столкнулась с одной из своих вечных проблем — с бесконечностями, которые под разными названиями («ультрафиолетовая катастрофа», «инфракрасная расходимость», «нуль-заряд», «неперенормируемость» и т. п.) до сих пор являются «подводными рифами» и одновременно служат двигателями прогресса в физике. Механика и математика оказались в тупике на многие сотни лет.

«Противоядие», существовавшее в виде идей Евдокса Книдского и Архимеда, удалось с пользой употребить лишь в конце XVII в. Эти мыслители подметили, что природные процессы приобретают всё более равномерный характер, если рассматривать их на малых участках или за короткие интервалы времени. Мы легко воспринимаем эту идею, когда разбиваем сложную фигуру на мелкие клеточки, чтобы в каждой из них линии узора были близки к прямым — так их легче перерисовать. Выражаясь математическим языком, мы *дифференцируем* (от *лат. differentia* — «различие»), т. е. разделяем наш узор на простые элементы. Чтобы получить цельный узор, теперь нужно перенести полученные элементы на другой лист, клеточка за клеточкой, соблюдая их точное взаимное расположение. При

этом мы *интегрируем* (от *лат. integer* — «целый»), т. е. объединяем в одно целое части рисунка. Для вычисления площади сложной фигуры можно изобразить её на «миллиметровой» бумаге и аккуратно просчитать количество полных и неполных клеточек — результат будет довольно точным. Уже Архимед изобретательно пользовался этим приёмом.

Собственно, по той же схеме строился основной математический аппарат науки о движении и механики в целом — *дифференциальное и интегральное исчисление, или математический анализ*. Чтобы пройти путь от простой идеи до её математической реализации Исааком Ньютоном и Готфридом Вильгельмом Лейбницем, понадобились века и целая череда открытий.





Унаследованная от греков и арабов математика была пригодна лишь для решения статических задач механики, т. е. учения о равновесии сил. Задачи о движении оставляли неприступными, как и во времена Зенона.

В 1591 г. французский математик Франсуа Виёт (1540—1603) ввёл в обиход буквенные обозначения. Замена цифровых обозначений буквенными придала необычайную свободу и лёгкость математическим рассуждениям. Буквы позволили видеть то, что раньше тонуло в цифрах, в громоздких арифметических выкладках.

Без этих ступеней Рене Декарт вряд ли смог бы ввести в 1637 г. в математику метод координат, понятия переменной величины и уравнения кривой. Для появления анализа бесконечно малых величин как рабочего аппарата математики требовался синтез всех её достижений. Первым его совершил 23-летний Исаак Ньютон в период «чумного заточения» в Вулсторпе (1665—1667 гг.).

В руках Ньютона оказался ключ к познанию законов природы, и он был единственным, кто умел им пользоваться. Понятие непрерывной величины — это идеальный образ непрерывного механического движения, производная (флюксия) — скорость движения и т. д. Ньютон поставил две задачи — определение скорости движения в данный момент времени по известному пути (задача дифференцирования, решаемая прямым методом флюксий); определение пути, пройденного за данное время, по известной скорости движения (задача интегрирования, решаемая обратным методом флюксий).

ПОСТИЖЕНИЕ МИРА

Несмотря на заметные достижения в математике, Ньютон всегда считал себя физиком. Математика была для него орудием решения физических задач, а астрономия — гигантской

космической лабораторией, где проверялись его физические идеи. В естествознании к тому времени произошли важные события. В начале XVII в. Галилео Галилей «навёл порядок» в движениях в «подлунном мире», а Иоганн Кеплер установил законы движения небесных тел. Однако закон инерции по Галилею противоречил выводам Кеплера. Попытка Декарта «примирить» идеи крупнейшего физика Италии и первого астронома Германии на основе вихревой гипотезы привела лишь к выдвигению множества произвольных гипотез.

Первое из «Правил умозаключений в физике», данное Ньютоном в его знаменитых «Математических началах натуральной философии» (1687 г.), можно считать резцом, с помощью которого удалось, отсекая фантазии и домыслы, создать первую физическую картину мира: «Не должно принимать в природу иных причин сверх тех, которые истинны и достаточны для объяснения явлений... Природа проста и не роскошествует излишними причинами».

Центральная идея законов Ньютона гениально проста: изменить состояние движения (т. е. величину или направление скорости) тела можно, лишь воздействовав на него иным телом. Для характеристики взаимного действия тел учёный ввёл понятие силы, очистив его от разного рода «стремлений», «желаний» и прочих атрибутов одушевлённой материи. В качестве характеристики тел Ньютон брал только их массу (количество материи), считая, что размерами и строением тел в интересующих его задачах можно пренебречь. В итоге он сформулировал все принципы динамики в терминах массы, ускорения и силы.

Физики отныне могли не просто предсказывать, но и детально вычислять поведение движущихся тел. В результате механика стала фундаментом естествознания, а астрономия — её прикладным разделом.



И. Ньютон.

По предложению Леонарда Эйлера в «Предисловии» к трактату «Механика, или Наука о движении, изложенная аналитически» (1736 г.) учение о равновесии сил стали именовать статикой (от греч. «статос» — «стоящий»).

Замечательный английский естествоиспытатель Томас Генри Хаксли (1825—1895) дал такой совет: «Присядь на короточки и, как ребёнок, смотри, что происходит, приготовься отбросить любые укоренившиеся представления, упрямо следуя велению природы, куда и как бы она тебя ни вела, иначе ничему не научишься». Пожалуй, наибольшая сложность для любого естествоиспытателя состоит как раз в умении преодолеть устоявшиеся взгляды, докопаться до сути происходящих явлений.

Лейбница однажды спросили, какого он мнения о Ньюtone. «Если взять математиков от начала мира до Ньютона, то окажется, что Ньютон сделал половину, и притом лучшую половину», — ответил немецкий учёный.

Если учесть взаимную неприязнь между Лейбницем и Ньютоном, их споры о приоритете в создании математического анализа, высказывание Лейбница дорогого стоит!



«Ньютон указал Западу пути мышления, экспериментальных исследований и практических построений, как никто другой ни до, ни после него. Ньютон не только создал гениальные методы; он в совершенстве владел всем известным в его время эмпирическим материалом и был исключительно изобретателем в нахождении математических и физических доказательств. По всему этому он заслуживает нашего высокого уважения. Но фигура Ньютона означает больше, чем это вытекает из его собственных заслуг, ибо самой судьбой он был поставлен на поворотном пункте умственного развития человечества».

А. Эйнштейн

«Ньютон был счастливейшим из смертных, ибо существует только одна Вселенная, и Ньютон открыл её законы».

Ж. Л. Лагранж

Ньютон построил мир как систему частиц, находящихся в абсолютном пустом бесконечном пространстве и взаимодействующих посредством центральных сил. Полвека спустя Леонард Эйлер дополнил основные понятия механики «жёсткой» системой материальных точек — абсолютно твёрдым телом, идеальной жидкостью.

Все понятия, на основе которых Ньютон построил первую физическую теорию — *классическую механику*, — являются идеализированными. Они «работают» и позволяют получать реальные ответы только для определённого круга проблем. Дословно законы Ньютона справедливы лишь при рассмотрении движений в инерциальных системах отсчёта, где состояния покоя тела и его равномерного движения по прямой физически неразличимы. Но, учитывая подвижность Земли, Солнца и звёзд, сами эти понятия лишены смысла. Вновь возникает логический парадокс. В рамках физики у этой проблемы нет решения. Ньютон интуитивно нашёл простой, хотя и логически небезупречный, выход: он постулировал существование всюду однородного и неподвижного абсолютного пространства и абсолютного времени. С их помощью законы Ньютона приобрели глобальный, космический характер.



Концепции абсолютных времени и пространства вызвали серьёзную критику как со стороны современников Ньютона — Лейбница и английского философа Джорджа Беркли (1685—1753), так и впоследствии — в трудах австрийского философа и физика Эрнста Маха (1836—1916). Итог этой критике подвёл Альберт Эйнштейн: «Прости меня, Ньютон. Ты нашёл единственный путь, возможный в твоё время для человека величайшей научной творческой способности и силы мысли. Понятия, созданные тобой, и сейчас ещё остаются ведущими в нашем физическом мышлении, хотя мы теперь и знаем, что если мы будем стремиться к более глубокому пониманию взаимосвязей, то мы должны будем заменить эти понятия другими, стоящими дальше от сферы непосредственного опыта».

ВСЁ ЛИ СВОДИТСЯ К МЕХАНИКЕ?

Благодаря успехам механики Ньютона представлялось естественным, что в конце концов все явления природы получат чисто механическое объяснение. В результате возникла первая всеобъемлющая физическая картина мира, которую принято называть *механической*. В отчётливой форме её основные положения сформулировал французский математик, физик и астроном Пьер Симон Лаплас (1749—1827):

- движение всех тел подчинено законам динамики Ньютона;
- между объектами макро- и микромира отсутствуют принципиальные различия;
- в природе не существует каких-либо качественных изменений и процессов, не сводящихся к чисто механическим;
- все причинно-следственные связи являются однозначными и детерминированными.



Казалось, что всё многообразие природы, весь мир явлений удастся свести к чисто механическим движениям. Это подтверждалось реальными успехами: по аналогии с законом всемирного тяготения французский физик и инженер Шарль Огюстен Кулон (1736—1806) ввёл закон взаимодействия точечных электрических зарядов. Французский физик и математик Андре Мари Ампер (1775—1836) установил законы взаимодействия электрических токов. Англичанин Уильям Томсон (1824—1907; лорд Кельвин с 1892 г.) и немец Рудольф Юлиус Эммануэль Клаузиус (1822—1888) построили механическую теорию теплоты. Французский физик Огюстен Жан Френель (1788—1827) сформулировал волновую теорию света как механику упругой среды (эфира).

Но действительность оказалась гораздо более интересной. Чаяния творцов оправдались с точностью до наоборот: обнаружилось, что все известные силы в механике (кроме тяготения), равно как и межмолекулярные силы, имеют электромагнитную природу, а свет является частным случаем электромагнитных волн. На смену механическим основам Вселенной пришли электромагнитные или, в общем случае, полевые. Начал складываться *полевая картина мира*.

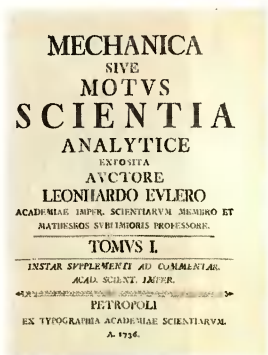
Сама механика к тому времени претерпела существенные изменения. По мере усложнения задач выяснилось, что для описания движений не всегда удобны декартовы координаты. Для движений вдоль искривлённых траекторий и поверхностей более приспособленными оказались так называемые криволинейные координаты: сферические, цилиндрические и т. д. Это дало толчок к развитию дифференциальной геометрии (позднее она пригодилась в общей теории относительности) и одновременно привело к созданию французским математиком и механиком Жозефом Луи Лагранжем (1736—1813) аналитической механики.

Понятие силы как меры взаимодействия тел в полной мере оказалось пригодным лишь в механике, поскольку вопрос о природе этих сил не играет здесь роли. Более универсальным является понятие энергии. За ней в физику проникли и другие *дескриптивные* (от *англ.* descriptive — «описательный») функции типа функций Лагранжа, Гамильтона, Гельмгольца. Эти функции не всегда имеют ясный физический смысл.

Развивая идеи французского учёного Пьера Луи Моро де Мопертюи (1698—1759) и Леонарда Эйлера, Лагранж сумел построить единый аналитический аппарат для решения не только механических задач, но и задач динамики систем зарядов и токов, конденсированных сред, термодинамики и теории поля.

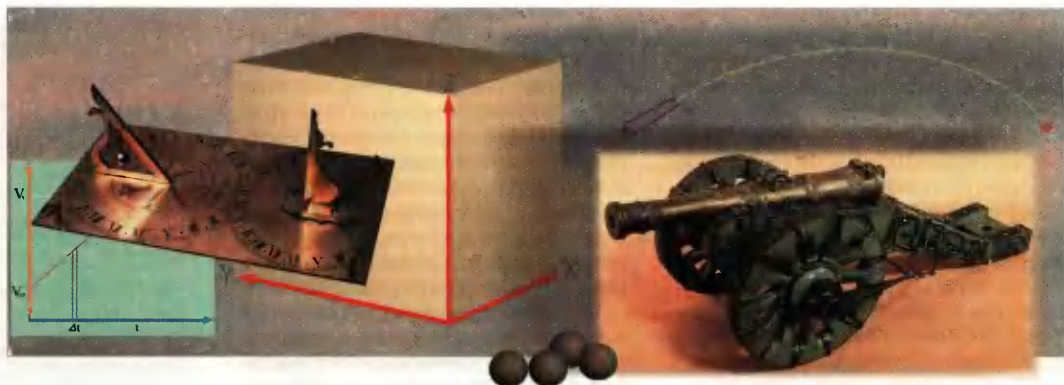
Механика вышла на новый уровень развития. Вместо простого сведения всех процессов окружающего мира к чисто механическим явлениям она стала «поставщиком» универсальных средств изучения процессов различной природы. Разработанные механикой методы изучения колебаний и распространения волн оказались удивительно эффективными при рассмотрении разнообразных процессов не только в физике, но и в таких далёких от неё отраслях знаний, как экономика, социология, экология. Именно в механике были заложены основы нелинейного подхода.

Заняв трон «царицы наук» в XX в., физика смогла позволить себе истинно царский подарок: широко распахнула дверь в мир нелинейных явлений. Нет сомнений, что на этом пути наши знания в конце концов опять будут сведены в какую-нибудь новую картину мира. Не стоит гадать, как назовут эту картину, но некоторые её детали можно предсказать и сейчас: все верные «мазки и контуры», нанесённые творцами механической картины мира, навсегда останутся надёжными ориентирами в познании неизведанного.



Л. Эйлер. «Механика». Титульный лист.

Спустя столетия, после трудов Николая Ивановича Лобачевского (1792—1856), Бернхарда Римана (1826—1866) и Альберта Эйнштейна, стало понятно, что наш мир описывается геометрией Евклида лишь в малом, или, другими словами, наш мир евклидов лишь локально. Ньютон, фактически, постулировал, что мир подчиняется законам Евклида глобально, и это выполняется с достаточной точностью в рамках задач, которые его интересовали. Ввести абсолютное пространство — всё равно что задать единую систему координат для мироздания.



ПРОСТРАНСТВО, ВРЕМЯ, ДВИЖЕНИЕ

РАЗВИТИЕ ПРЕДСТАВЛЕНИЙ О ПРОСТРАНСТВЕ, ВРЕМЕНИ И ДВИЖЕНИИ

Пространство и время — неотъемлемые составляющие человеческого опыта, любого нашего взгляда на мир. Может быть, именно поэтому человек заметил пространство и время довольно поздно, всего несколько тысячелетий назад. Противопоставив Землю и Небо, различив стороны света, люди создали первую схему пространства; появление мифов о сотворении мира свидетельствовало об открытии времени. Пространство и время дали начало божествам мирового порядка и судьбы. Их могущество росло по мере развития древних цивилизаций, в которых они определяли весь строй и ритм жизни. Лишь с появлением

научного метода в Древней Греции начался постепенный процесс превращения пространства и времени из божеств в понятия. Здесь, в Элладѣ, возникли первые научные воззрения о природе и свойствах пространства и времени, о структуре материи и сущности движения.

Фалесу Милетскому (около 625 — около 547 до н. э.), считающемуся первым среди семи мудрецов Эллады, приписывают следующее суждение:

*Большее всего — пространство,
ибо оно вмещает всё.
Быстрее всего — мысль, ибо она
бежит без остановки.*



*Сильнее всех — необходимость,
ибо она одолевает всех.
Мудрее всего — время, ибо оно
обнаруживает всё.*

В этих стихах отражён один из первых выходов человеческого разума за пределы чувственных восприятий. Не всё удаётся познать с помощью органов чувств. Есть вещи, доступные только умозрительному восприятию и анализу. Пространство и время были первыми абстракциями, при помощи которых стало возможно рассуждать о строении окружающего мира, первыми физическими категориями.

В Элладе возникли и две основные концепции в понимании сущности пространства и времени, сохраняющие свою актуальность до настоящего времени.

Одна из них, так называемая *субстанциональная* (от *лат.* substantia — «сущность»), берёт начало от пифагорейцев (Пифагор, Архит Тарентский и др.), элеатов (Ксенофан из Колофона, Парменид, Зенон) и первых атомистов (Левкипп и Демокрит). Она рассматривает пространство-время как самостоятельную физическую категорию — некую фоновую реальность, вместилище всего сущего, которое может быть или абсолютно пустым, или заполнено неосозаемой субстанцией (эфиром).

Другая концепция, её принято называть *реляционной* (от *лат.* relatio — «соотношение»), была выдвинута в работах Аристотеля. Она отрицает самостоятельную сущность пространства-времени, рассматривая его лишь как особый вид отношений между материальными объектами.



Уже в античности существовали субстанциональная и реляционная концепции пространства и времени.

ПРОСТРАНСТВО ДРЕВНИХ

Издавна основным пространственным ориентиром для человека служило Солнце. В Северном полушарии его движение начинается слева, в восточной части горизонта. Потом светило поднимается, достигает наибольшей высоты над точкой юга и скатывается направо, на запад. Всё пространство горизонта люди делили на две половины: южную, дневную, которая принадлежала живым, и северную — область мёртвых. Уже в захоронениях древнего каменного века видны признаки ориентации на юг. Такое положение тела при погребении, видимо, было связано с верой в посмертное возрождение души подобно возрождению Солнца после ночи. Север, холод, ночь естественным образом относили к миру мёртвых. Считалось, что там живут обожествлённые предки, туда направляются души умерших.

Греческий бог северного ветра Борей сначала был богом загробного мира. И в Сибири, и в Месопотамии одинаково соотносили Полярную звезду с миром усопших, а в Древнем Египте семизвездие Большой Медведицы в III тысячелетии до н. э. считали властелином подземного мира. Народ Центральной Америки майя и север, и Малую Медведицу называл «шам-аан» — «исчезающий позади». С этим грозным, таинственным местом связывались области обитания духов предков, где исчезают души умерших и откуда они выходят для возрождения. Примечательно, что юг майя называли «ма-хо», что означает «большой вход», «место возвращения души». У нанайцев одним и тем же словом именуются Полярная звезда и «хозяин нижнего мира». В языках некоторых народов слово «север» вообще считалось запретным. Даже много позже, в средневековой Западной Европе, в церквях делали специальные двери с северной стороны, куда, как считалось, уходил дьявол.

Жители другой половины Земли создали такую же, но «зеркальную» картину мироздания. В Южном полушарии Солнце проходит по северной части неба, и древний человек, естественно, полагал, что загробный мир находится на юге. Так, по словам одного старика с острова Пасхи, «все мои рано-Рараку (статуи. — Прим. ред.) священные и обращены лицом к той части света, над которой имеют власть и за которую несут ответственность» (в основном к югу).

ЧИСЛО И МИР

Первые рассуждения о сущности и свойствах пространства и времени можно найти в трудах представителей пифагорейской философской



Континуум (лат. continuum — «непрерывное») — непрерывная совокупность.

Дискретность — (от лат. discretus — «разделённый», «прерывистый») — прерывность.

Парменид.
Старинная гравюра.



школы, основанной выдающимся философом и математиком Пифагором (около 540—500 до н. э.) с острова Самос в Южной Италии. По учению пифагорейцев числа первичны по отношению к вещам и явлениям. «Существует некоторое число, присущее природе Вселенной», — писал пифагореец Архит Тарентский. Ведь в мире всё изменчиво, а числовые закономерности абсолютны и вечны, как и подобает подлинному знанию.

Эта идея находит своё подтверждение в современной науке о природе, которая выявила фундаментальную роль математики в объяснении и описании устройства физического мира. «Мир, — отмечал немецкий математик Герман Вейль, — не есть хаос, он есть космос, гармонично упорядоченный посредством нерушимых законов математики».

В пифагорейской картине мира все движения тел происходят в неподвижном, однородном, неизменяемом и бесконечном пространстве. Так, Архит Тарентский доказывал объективную реальность пустого пространства, связывая его с понятием места. «Место есть первое из бытий, — писал он, — нечто отличное от материальных тел и незави-

симое от них. Его особенность в том, что все вещи находятся в нём, но само оно не находится ни в чём. Оно независимо от тел, но тела зависят от него». Следовательно, пространство есть абсолютное место, чистая протяжённость.

Далее Архит Тарентский логически доказывал бесконечность пространства с помощью мысленного эксперимента. Он представлял себе человека, который выдвигает руку с жезлом вперёд, за край предполагаемого конца мира, и шаг за шагом передвигается в этом направлении, повторяя такую процедуру вытягивания руки с жезлом бесчисленное число раз.

Пифагорейцы полагали, что мировое пространство заполнено густым, прозрачным и холодным эфиром. Идея мирового эфира была существенно развита в Новое время. Сначала эфир «остался без работы» после открытия Галилеем и его учениками возможности пустоты. Затем его вернул в физику Декарт как среду, с помощью которой передаются механические воздействия. Ньютон сделал подобный «механический» эфир ненужным, создав концепцию абсолютного пространства-времени. После Ньютона эфир опять возвратился в физику как прозрачная неосознаваемая сплошная среда, необходимая для распространения электромагнитных волн. И наконец, Эйнштейн, создав частную теорию относительности, изменил представления о пространстве-времени, после чего эфир вновь «остался без работы».

ДВИЖЕНИЯ НЕТ

Следующий шаг в развитии теории пространства и времени и в исследовании проблем движения сделала элейская (Элея — город в Южной Италии) философская школа.

Философия элейцев опиралась на выдвинутую Парменидом (около 540—480 до н. э.) идею о невозмож-



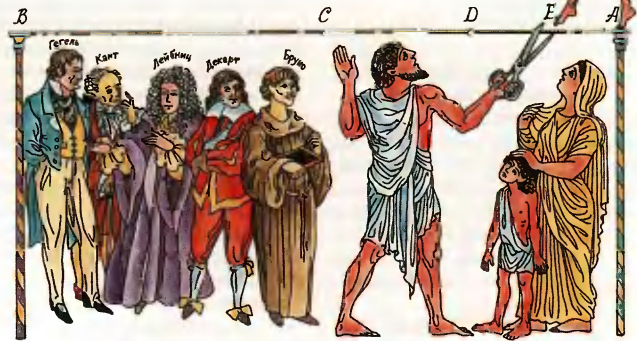
ности небытия. Небытия нет и не может быть. Как следствие невозможно движение: ничто новое не возникает (не из чего возникать) и ничто старое не исчезает (некуда исчезать). Исключаются также множественность и разнообразие вещей. Ведь в бытии не может быть разрывов (небытие не существует). Любое движение и разнообразие вещей и явлений — лишь обман чувств, не истина, а мнение. В основе мира лежит единое — непрерывная, однородная, неизменная реальность, подобная сфере. Оно заполняет мировое пространство и одинаково присутствует в каждом мельчайшем элементе действительности.

Пространство как вместилище единого элеаты считали однородным, непрерывным, неподвижным. Непрерывным и однородным было и время. Элеаты отрицали возможность существования пустого пространства, поскольку, с их точки зрения, пустота есть небытие, а небытия нет, и его даже мыслить нельзя.

Младший современник и ученик Парменида Зенон Элейский (около 490—430 до н. э.) приводил логические доказательства невозможности движения, выраженные в его знаменитых логических парадоксах — апориях (буквально «безвыходное положение»). Согласно древнегреческому историку Плутарху (около 45 — около 127), Зенон «практиковал эленктическое искусство — через противоречие загонял противника в безвыходное положение» (от *греч.* «эленхос» — «уличающее противоречие»). Зенон придумал более 40 апорий, из которых до нас дошли лишь несколько, в том числе «Дихотомия», «О летящей стреле», «Ахиллес и черепаха».

Так, в апории «Дихотомия» утверждается невозможность движения. Для того чтобы преодолеть некоторое расстояние AB , человек должен сначала пройти половину этого расстояния AC . А чтобы пройти половину

расстояния AC , ему нужно пройти половину половины AD — и так до бесконечности. В итоге мы придём к выводу, что человек вообще не в состоянии сдвинуться с места, так как всегда можно поставить перед ним условие пройти половину сколь угодно малого пути.



Эта апория основывается на двух постулатах: во-первых, пространство континуально; во-вторых, движение есть процесс перехода из одной точки пространства в другую, соседнюю. Однако эти два условия несовместимы. В континуальном пространстве для данной точки не существует непосредственно следующей, ведь между любыми двумя сколь угодно близкими точками всегда расположено бесконечное число точек. Поэтому движение, если его понимать как переход от одной точки пространства к следующей, в принципе невозможно.

Основная мысль апорий Зенона Элейского состоит в том, что дискретность, множественность и движение характеризуют лишь чувственную картину мира, но она заведомо недостоверна. Истинная картина мира постигается только мышлением и теоретическим исследованием.

В развитии науки о пространстве, времени и движении апории Зенона сыграли огромную роль. Они привели к кризису древнегреческой науки

Не возникает оно
[бытие]
и не подчиняется
смерти.
Цельное всё, без конца,
не движется
и однородно.
Не было в прошлом
оно, не будет, но
всё — в настоящем.
Без перерыва, одно.
Ему ли разыщешь
начало?
Как и откуда расти?..
... Могучая
необходимость
Держит в оковах его,
пределом
вокруг ограничив.
Так бытие должно быть,
необходимо, конечным.
Нет ему нужды
ни в чём, иначе
во всём бы нуждалось.

Парменид.
«О природе»



о движении. Разрешению логических парадоксов Зенона Элейского посвящали свои работы многие виднейшие философы и учёные античности, Средневековья и Нового времени: Демокрит, Аристотель, Эпикур, Бруно, Декарт, Лейбниц, Юм, Кант, Гегель

и др. Размышления об апориях Зенона не только помогли создать математический анализ, но и показали необходимость более глубокого изучения структуры и свойств пространства и времени, а также закономерностей движения материи.

ПРОСТРАНСТВО, ВРЕМЯ И АПОРИИ

Уже во времена Зенона существовали взгляды, согласно которым пространство и время не делятся до бесконечности, а состоят из цельных неделимых частей — атомов пространства и атомов времени (в XX в. сказали бы: квантов пространства и времени). Поскольку в этом случае никаких бесконечных количеств не возникает, могло оказаться, что апории были бы разрешены. На деле всё сложнее.

С «квантованной» точки зрения острей летящей стрелы последовательно переходит из одной неделимой ячейки пространства (в которой оно покоится несколько квантов времени) в другую. На такой переход требуется ровно один квант времени, ведь не может же острей чудесным образом мгновенно переместиться из одного места в другое. При этом бессмысленно спрашивать, где находится острей, когда оно вышло из одной ячейки пространства, но ещё не пришло в соседнюю: кванты времени и пространства неделимы, никакого промежуточного момента времени, так же как и промежуточного места, между ними не существует.

Получается, что стрела не движется: в каждой конкретной ячейке пространства она покоится. А то, что человек воспринимает чувствами как её движение, есть данность именно чувств, их иллюзия. Для разума движение сводится к покою.

Казалось бы, апория «Стрела» разрешена. Ситуация похожа на просмотр фильма: на деле сменяются неподвижные кадры, которые зрителю представляются движущейся картиной.

Однако здесь подстерегает новая трудность — апория «Стадий» (или «Стадион»): если пространство и время

состоят из атомов, то часть равна целому. Доказывается это так. Пусть навстречу друг другу бегут с одинаковой скоростью две колонны атлетов мимо неподвижной третьей. Предположим, атлеты каждой колонны находятся в соседних квантах пространства, причём пребывают в них один квант времени. Тогда каждая движущаяся колонна проходит мимо, например, двух квантов неподвижной колонны за два кванта времени. Но при этом она пройдёт мимо четырёх квантов другой движущейся колонны. Сколько понадобится единиц времени? Если тоже две, то получается, что четыре кванта пространства пройдены за два кванта времени. Это невозможно, так как переход из одной ячейки в соседнюю осуществляется за один квант времени. Если же считать, что потребуется четыре кванта времени, то получается $2 = 4$, ведь прошло одно и то же время! Как видим, в случае квантованности пространства-времени эта апория неразрешима.

Допустим теперь, что квантованно только время, пространство же делимо до бесконечности. Тогда траекторию движущейся точки следует разбить на отрезки, соответствующие отдельным квантам времени. В каждый квант времени точка находится на определённом отрезке и движется со

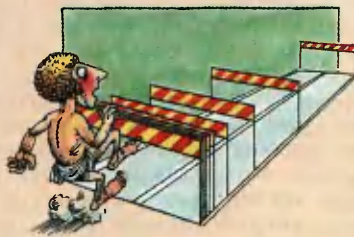
скоростью, равной отношению длины этого отрезка к единице времени. При таком подходе аргументы «Стадия» не достигнут цели. Ведь пространство разбито на части не само по себе, а в соответствии с условиями задачи — скоростью тел.

Однако Зенон и здесь приготовил новый «сюрприз» — апорию «Дихотомия» («Рассечение пополам»). Движущееся тело, прежде чем пройти весь путь, должно пройти его половину, а ещё раньше — половину от половины, т. е. четверть всего пути, а перед этим — половину четверти, или восьмую часть целого, и так до бесконечности, ведь пространство непрерывно. Если на прохождение каждой части требуется хотя бы один квант времени, который невелик, но не бесконечно мал, то общее время прохождения отрезка любой заданной длины равно бесконечности. И опять возникает безвыходное положение. Апория, одним словом!

Обединяет трудности, встречающиеся в других апориях, апория «Ахиллес и черепаха». Как может быстрый Ахиллес догнать медленную черепаху, если ему необходимо сначала достичь того места, откуда она уже ушла, а пока он это сделает, черепаха уйдёт ещё дальше? Попробуем все возможные подходы.

1. Пусть пространство и время состоят из атомов (квантов).

Тогда и Ахиллес, и черепаха должны быть представлены не точками, а по крайней мере в виде отрезков. В то время, когда быстрый отрезок обгоняет медленный, возникает ситуация, аналогичная апории «Стадий». Стоит лишь представить неподвижный отрезок, расположенный вдоль рассматриваемой прямой, чтобы показать, что часть равна целому.





АТОМЫ И ПУСТОТА

Ответом на парадоксальную философию элеатов стала атомистика Левкиппа (около 500—440 до н. э.) и Демокрита (460—371 до н. э.). В противовес элеатам они считали возмож-

ным утверждать, что небытие существует. Это — абсолютно пустое бесконечное пространство, где, как во вместилище, происходит движение сгустков бытия — атомов. В мире не существует ничего, кроме бесконечного множества атомов, которые

2. Пусть пространство непрерывно, а время квантованно.

Тогда путь, на котором Ахиллес догоняет черепаху, можно разбить на бесконечное количество частей, и если на перемещение из одной части в соседнюю требуется хотя бы один квант времени, то общее время становится бесконечным, как это уже было в апории «Дихотомия».

3. Пусть пространство квантованно, а время непрерывно.

Увы, и в этом случае нас ожидает неудача. В каждый момент времени Ахиллес (как и черепаха) будет занимать определённый квант пространства. Чтобы передвинуться в соседнюю ячейку, ему необходимо определённое время — мгновенно переход произойти не может. Возникает вопрос, на который невозможно ответить: где находится Ахиллес, когда он уже вышел из одной ячейки, но ещё не добрался до соседней? Время-то не прерывалось! Получается, Ахиллес не только не может догнать черепаху — он вообще не может сдвинуться с места, впрочем, как и сама черепаха, и любое другое тело.

4. Пусть пространство и время делимы до бесконечности.

Представим себе прямую линию, по которой движутся точки А (Ахиллес) и В (черепаха). В начальный момент их разделяет расстояние l . Поскольку скорость Ахиллеса v_A больше скорости черепахи v_B , он должен догнать её за время $t_0 = l/(v_A - v_B)$. На практике так и получается, но в теории появляется существенная трудность, связанная с понятием скорости. Что такое скорость? Греки считали: скорость есть отношение пути ко времени его прохождения. Путь всегда связывает две отстоящие друг от друга точки. Отсюда следует, что скорость — это понятие, относя-

щееся к двум точкам пространства. Но как тогда можно говорить о скорости в конкретной точке? Даже если брать всё меньшие интервалы времени, которым будут соответствовать всё меньшие участки пути, две разные точки всегда останутся разными точками. И о скорости, а значит, и о движении в одной точке говорить нельзя. По-прежнему невозможно понять, как точка способна двигаться там, где она находится. Снова возникает трудность, зафиксированная в апории «Стрела».

Кроме того, так как пространство и время можно делить бесконечно, логически приходится постоянно решать одну и ту же задачу (черепаха чуть впереди, а Ахиллес её догоняет), и мы совершенно не продвигаемся вперёд. Получается своего рода логический «заколдованный круг».

В самом деле, представим, что каждый раз пробегаая мимо точек $Ч_1$ и $Ч_2$, в которых только что была черепаха, Ахиллес считает про себя: первая, вто-

рая и т. д. Через конечное время t_0 процесс счёта был бы завершён, и мы могли бы поинтересоваться у Ахиллеса, каким оказалось последнее из названных им чисел. И здесь мы сталкиваемся с парадоксом: последнего среди этих чисел нет (множество натуральных чисел бесконечно велико), и в то же время оно должно было прозвучать, так как процесс счёта всё-таки завершился!

Выдающиеся математики Д. Гильберт и П. Бернсай по поводу парадокса Зенона заметили: «Обычно этот парадокс пытаются обойти рассуждением о том, что сумма бесконечного числа этих временных интервалов всё-таки сходится и, таким образом, даёт конечный промежуток времени. Однако это рассуждение абсолютно не затрагивает один существенно парадоксальный момент, заключающийся в том, что некая бесконечная последовательность следующих друг за другом событий, последовательность, завершаемость которой мы не можем себе даже представить, на самом деле всё-таки должна завершиться».

Нередко вслед за Аристотелем апории объявляются «ловкими софизмами», логическими трюками. Скорее всего, верно другое. Апории относятся к числу вечных проблем, разрешение которых хотя и продвигает познание, но неминуемо ведёт к новым, более глубоким вопросам и парадоксам. Так, размышления над апориями помогли создать математический анализ, однако его обоснование в виде теории функций и множеств сразу же открыло массу новых парадоксов. Апории играли определённую роль в физической революции XX в., и вполне возможно, что в физике XXI столетия их значение будет ещё более существенным.





вечно движутся в пустом безграничном пространстве. Сталкиваясь и сцепляясь друг с другом, они производят все вещи и бесчисленные миры. Пустое неподвижное однородное пространство в теории Демокрита аналогично небытию Парменида, но считается существующим. Именно эта логическая неувязка стала объектом критики со стороны Аристотеля, а впоследствии и других философов и физиков.

НЕВОЗМОЖНОСТЬ ПУСТОТЫ

К концу IV в. до н. э. за более чем 300-летнюю историю наука Древней Греции накопила внушительный объём как научных знаний, так и разноречивых мнений. Возникла потребность в их синтезе, в построении научной картины мира. Выполнить эту задачу попытался величайший учёный античного мира Аристотель (384—322 до н. э.).

На основе геоцентрического мировоззрения Аристотель создал учение о движении, господствовавшее в физике в течение примерно 2 тыс. лет. Аристотель понимает под движе-

нием любое количественное или качественное изменение, благодаря которому реализуется явление. Он выделил четыре разновидности движения: 1) качественное движение или изменение; 2) количественное движение — уменьшение или увеличение; 3) перемещение — пространственное движение; 4) возникновение или уничтожение. Согласно Аристотелю, перемещение происходит в пространстве, но свойства его определяются материальными телами.

Как и материя, пространство Аристотеля неоднородно: в нём разделены «подлунный мир», в котором вещи возникают и разрушаются, и «небесный мир» — вечно неизменный и нерушимый мир звёздных сфер. Все механические движения Аристотель делил на естественные и насильственные. Естественными движениями небесных тел являются круговые движения вокруг Земли, поскольку планеты, созданные совершенным существом — Богом, обязаны двигаться по самым совершенным траекториям, т. е. по окружностям. Естественные движения земных тел — прямолинейные вверх или вниз, для абсолютно лёгких и абсолютно тяжёлых тел соответственно. Все остальные движения — насильственные, происходящие под действием других тел — двигателей. В частности, Аристотель считал, что для поддержания равномерного и прямолинейного движения материального тела необходимо действие на него постоянной силы.

Миру Аристотеля ещё и анизотропен (от *греч.* «анизос» — «неравный» и «тропос» — «направление»). В «подлунном мире» выделяется вертикальное направление как направление естественного движения по вертикали вверх или вниз, а в «надлунном мире» — движение по окружности.

В противоположность учению атомистов Аристотель доказывает невозможность существования пустого пространства. Если принять суще-

Виды движений
по Аристотелю.





ствование пустоты, говорит Аристотель, это невозможно было бы сказать, почему тело, находящееся в движении, должно остановиться именно здесь, а не там, двигаться в ту сторону, а не в другую, ибо пустота как таковая не несёт в себе никакого различия. Она пассивна и невозмутима, принципиально ненаблюдаема. В ней не может начаться ни одно из видимых нами естественных движений, например падение камня. Значит, она просто не существует. Кроме того, по Аристотелю, движение в пустоте привело бы к бесконечной скорости, что невозможно. Итак, пустота представляет собой логическое противоречие или абстракцию, лишённую смысла. Здесь, в общем, Аристотель прав. Центральное понятие современной физики — вакуум, но вакуум — не пустота, а очень сложный и во многом загадочный физический объект.

Само понятие пространства Аристотель связывает с понятием места (*греч.* «тоπος»), определяемого им как первая неподвижная граница тела, объёмлющего данное тело: «Тело, снаружи которого находится какое-нибудь другое, объёмлющее его тело, находится в [некотором] месте. Тело, у которого этого нет, не находится...». Первая неподвижная граница объёмлющего тела и есть место. Иными словами, пространство, по Аристотелю, не существует без материальных тел и выступает в качестве некоего результата отношения двух материальных объектов.

Такое понимание мирового пространства привело Аристотеля к заключению о его конечности. Там, где кончается ограничение одного тела другим, неприменимо и понятие пространства. Следовательно, границей мирового пространства выступает последняя граница небосвода, охватывающая тела. В модели Вселенной Аристотеля «Земля помещается в воде, вода — в воздухе, воздух — в эфире, эфир — в Небе, а Небо уже ни в чём другом».

СУЩЕСТВУЕТ ЛИ ПУСТОТА? (Аристотель против Демокрита)

Демокрит. Пустота так же реальна, как и атомы. Если бы её не существовало, то атомы, а следовательно, и состоящие из них тела не могли бы двигаться.

Аристотель. Пустоты не существует. Если бы она была, то куда двигалось бы помещённое в неё тело? Ведь, конечно, не во все стороны... В пустоте нет оснований двигаться сюда больше, сюда меньше: поскольку это пустота, в ней нет различий... Далее, никто не сможет сказать, почему тело, приведённое в движение, где-нибудь остановится, ибо почему оно скорее остановится здесь, а не там? Следовательно, ему необходимо или покоиться, или двигаться до бесконечности. В последнем случае все тела имели бы равную скорость. (Ибо по какой причине одни тела стали бы двигаться в пустоте быстрее других? В наполненной среде это происходит по необходимости, так как более тяжёлое тело будет скорее разделять её своей силой.)

Из сказанного ясно, что если бы пустота существовала, то и тяжёлые, и лёгкие тела двигались бы в ней одинаково быстро. Но это невозможно. Следовательно, пустоты нет...

Скорость движения одного и того же тела в различных средах различна и обратно пропорциональна степени густоты или плотности среды; таким образом, если предположить, что степень плотности воды равна десятикратной плотности воздуха, то движение в воздухе должно совершаться в десять раз быстрее, чем в воде... Так как разрежённость пустоты бесконечно отличается от плотности пространства, заполненного хотя бы тончайшим веществом, то движущиеся тела должны были бы передвигаться в пустоте мгновенно; но мгновенное движение невозможно; поэтому невозможно и образование пустоты.

(По книге Аристотеля «Физика».)

Время, по Аристотелю, тоже не относится к самостоятельным сущностям и служит лишь своеобразной мерой движения, «числом движения». Оно проявляется как система отношений физических явлений (раньше, позже, теперь). Поскольку время у Аристотеля — считаемое число, а ничто не может считать, кроме души, то без души, заключает Аристотель, нет и времени.

ГЕОМЕТРИЯ МИРОЗДАНИЯ

С конца IV в. до н. э. доминирующей во всём античном мире стала александрийская научная школа. В ней развивалась концепция абсолютно пустого пространства атомистов.

Александрия (Египет) — столица эллинистического государства Птолемея.



Евклид
в образе святого.
Флоренция, Роспись
Андреа ди Бонато.

Эпохальное значение имели работы великого математика Евклида (III в. до н. э.), который дал математическое описание свойств пустого бесконечного пространства и построил его геометрию. Свои результаты он изложил в знаменитой книге «Начала» — единственной научной монографии античной эпохи, которая без каких-либо изменений использовалась в качестве основного учебного пособия по геометрии вплоть до XX столетия.

Пространство, по Евклиду (позже оно так и было названо «евклидовым»), безграничное, однородное, изотропное (от *греч.* «изос» — «равный», «одинаковый» и «тропос» — «направление»), имеет три измерения. Бесконечность такого пространства характеризуется тремя постулатами: 1) «от всякой точки до всякой точки можно провести прямую линию»; 2) «ограниченную прямую можно непрерывно продолжать по прямой»; 3) «из всякого центра и всяким раствором (циркуля. — *Прим. ред.*) можно описать круг». Учение о параллельных прямых и знаменитый

пятый постулат Евклида (в настоящее время он формулируется так: через любую точку, не лежащую на прямой, можно провести одну и только одну прямую, параллельную данной прямой) определяют геометрию евклидова пространства. Несколько позже Архимед дал ещё одну характеристику евклидова пространства, в котором «из всех линий, имеющих одни и те же концы, прямая будет наикратчайшей».

Таким образом, в евклидовой геометрии прямая линия представляет собой геодезическую линию, т. е. линию с наименьшей длиной. Пространство, характеризующееся этим свойством, является по современной терминологии плоским пространством, т. е. обладает нулевой кривизной. Его метрика (квадрат расстояния между двумя близкими точками) в декартовой системе координат имеет вид: $ds^2 = dx^2 + dy^2 + dz^2$, где dx , dy , dz — бесконечно малые приращения координат x, y, z .

Построенная Евклидом геометрическая теория пространства имела огромное значение не только для развития математики и физики, но и для культуры в целом. Знание основ евклидовой геометрии стало необходимым элементом современного общего образования во всём мире. Почти через 2 тыс. лет после создания теория евклидова пространства без каких-либо изменений была взята Ньютоном в качестве математической модели абсолютного пространства в его механической картине мира. Евклидово пространство является ареной всех физических явлений классической физики, основы которой заложили Галилей и Ньютон.

ОТКРЫТИЕ ПРОСТРАНСТВА И ВРЕМЕНИ

Проблема пустоты (пустого пространства) была ключевой для создания физики как науки. Аристотель



Благодаря Евклиду
геометрия впервые
стала системой.



неопровержимо логически доказал, что пустота существовать не может. К тому же совершенно непонятно, как через пустоту, т. е. ничто, могут передаваться какие-либо воздействия. Однако, правда науки была на стороне Галилея. Ему ради торжества гелиоцентризма пришлось допустить, что пустота существует, а позже это было доказано экспериментально.

Компромисс между двумя подходами пытался найти Декарт, предложивший идею пространства, заполненного вихрями эфира, которые движут телами Солнечной системы и передают прочие воздействия. Однако эта теория содержала проблему: по мере рассеивания вихрей любое движение должно прекратиться.

Проблема пространства и времени впервые была удовлетворительно решена в работах величайшего английского учёного Исаака Ньютона (1643—1727). Он стал создателем первой научной картины мира (механической), в которой существенную роль играет именно концепция пространства-времени. Разработанная Ньютоном теория механического движения была первой в истории физики объединённой физической теорией; в ней «земные» и «небесные» движения объединились во всеобщее механическое движение материальных тел. Объединение, синтез станет движущей силой физики и после Ньютона, причём нередко основой объединения будет именно расширение представлений о пространстве и времени. Так, в теории электромагнетизма Джеймса Кларка Максвелла объединились электрическое и магнитное взаимодействия. Удача Максвелла стала понятной после создания теории относительности Эйнштейна, объединившей пространство и время.

Ньютон различал абсолютные и относительные пространство и время, абсолютные и относительные движения. Абсолютные пространство и время являются объективными реальными сущностями, не зави-

сящими от наблюдений и движения материальных объектов. Относительные пространство и время — категории эмпирические; они постигаются чувствами, используются в обыденной жизни и при наблюдениях. Задача натуральной философии (физики), по Ньютону, состоит в том, чтобы распознать истинные, абсолютные движения и изучать их законы.

С одной стороны, пространство и время служат вместилищами механических процессов, ареной всех явлений — это абсолютные пространство и время. С другой стороны, сами пространство и время становятся различными, как конкретные места и времена, благодаря механическим процессам — это относительные пространство и время.

Существование абсолютного пространства, а также разницу между абсолютным и относительным движением Ньютон доказывал с помощью опыта с вращающимся ведром. В ведро, подвешенное на сильно закрученной верёвке, наливают воду и отпускают. Первое время ведро крутится быстро, но поверхность воды



«Начала» Евклида.
Издания XVI—XIX вв.



Исаак Ньютон.



остаётся плоской, т. е. вода неподвижна относительно абсолютного пространства. Затем, когда вода вся увлекается стенками ведра, её относительное движение прекращается, однако искривление поверхности воды показывает, что абсолютное движение становится наибольшим. Тем самым абсолютное пространство проявляет своё существование.

Здесь важно отметить, что если абсолютное пространство всегда является однородным и изотропным (однородность пространства — одинаковость его свойств во всех точках, а изотропность — одинаковость во всех направлениях), то относительное пространство при вращении системы уже не имеет свойств однородности и изотропности. Точки такой системы, расположенные дальше от центра вращения, будут испытывать большее центробежное ускорение, чем точки, расположен-

ные ближе к центру вращения. Таким образом, ускорение в механике Ньютона носит абсолютный характер.

Концепция абсолютного пространства-времени, не зависящего от реальных процессов, метафизична. Не случайно Ньютон связывает абсолютное пространство с Богом. Бог, по Ньютону, присутствует и в пространстве, свободном от тел, и там, где имеются тела.

Пространство Ньютона — пустое неограниченноеместилище тел, арена действий физических процессов — сходно с пространством учёных-атомистов античной эпохи. Есть одно, но принципиальное отличие. Поскольку ньютоновское пространство не является пустотой, а существует и проявляет себя (в неинерциальных системах отсчёта), через него также могут передаваться физические воздействия.

ОПЫТ НЬЮТОНА С ВЕДРОМ

Если на длинной верёвке подвесить сосуд и, вращая его, закрутить верёвку, пока она не станет совсем жёсткой, затем наполнить сосуд водой и... привести сосуд во вращение в сторону раскручивания верёвки, то... вращение сосуда будет поддерживаться достаточно долго раскручиванием верёвки. Сперва поверхность воды будет оставаться плоской, как было до движения сосуда. Затем сосуд силою, постепенно действующею на воду, заставит и её участвовать в своём вращении. По мере возрастания вращения вода будет постепенно отступать от середины сосуда и возвышаться по краям его, принимая впаую форму поверхности (я сам это пробовал сделать); при усиливающемся движении она всё более и более будет подниматься к краям, пока не станет обращаться в одинаковое время с сосудом и придёт по отношению к сосуду в относительный покой.

По этому подъёму воды... обнаруживается и измеряется истинное и абсолютное вращательное движение воды, которое, как видно, во всём совершенно противоположно относительному движению. Вначале, когда относительное движение воды в сосуде было наибольшее, оно совершенно не вызвало стремления удалиться от оси — вода... не повышалась у стенок сосуда, а её поверхность оставалась плоской и истинное вращательное её движение ещё не начиналось. Затем, когда относительное движение уменьшилось, повышение воды у стенок сосуда обнаружи-

вало её стремление удалиться от оси, и это стремление показывало постепенно возрастающее истинное вращательное движение воды, и когда оно стало наибольшим, то вода установилась в покое относительно сосуда. Таким образом, это стремление не зависит от движения воды относительно окружающего тела, следовательно, по таким движениям нельзя определить истинное вращательное движение тела. Истинное круговое движение какого-либо тела может быть лишь одно в полном соответствии с силою стремления его от оси, относительных же движений, в зависимости от того, к чему они относятся, тело может иметь бесчисленное множество; но... эти движения совершенно не сопровождаются истинными проявлениями, если только это тело не обладает, кроме относительных, и сказанным единственным истинным движением.

Поэтому в тех системах мира, в которых предполагается, что наши небесные сферы обращаются внутри сферы неподвижных звёзд и несут с собою планеты, окажется, что отдельные части этих сфер и планеты, покоящиеся относительно своих сфер, на самом деле движутся, ибо меняют относительное положение (чего не может быть для тел, покоящихся абсолютно); вместе с тем они участвуют в общем движении несущих их сфер и, значит, как части вращающегося целого, стремятся отдалиться от оси.

(По книге И. Ньютона
«Математические начала натуральной философии».)



Все движения тел рассматриваются относительно неподвижного и неизменяемого абсолютного пространства, выступающего у Ньютона как абсолютная система отсчёта. Геометрические свойства абсолютного пространства полностью совпадают со свойствами пространства Евклида: оно однородно и изотропно, трёхмерно, неограниченно, обладает нулевой кривизной и метрично (определены расстояния между точками пространства). Метрика пространства Евклида — Ньютона (квадрат расстояния между двумя его близкими точками) определяется выражением:

$$dl^2 = dx^2 + dy^2 + dz^2,$$

где x, y, z — декартовы координаты точек пространства. Эта метрика инвариантна относительно допустимых преобразований (движений) пространства, к которым относятся параллельный перенос (трансляция) и поворот, и полностью определяет его геометрические свойства.

Аналогично трактует Ньютон сущность времени. Абсолютное время есть поток чистой длительности, который не зависит от движения тел. Этот поток неограничен, однороден, непрерывен, одномерен и всегда направлен в одну сторону — в будущее. А потому время определяется одним параметром t ($-\infty < t < \infty$). Однородность времени означает, что все законы движения не изменяются с течением времени.

Время протекает одинаково во всех точках абсолютного пространства и во всех используемых системах отсчёта, так что промежуток времени dt между любыми двумя близкими событиями является инвариантным относительно преобразований систем отсчёта ($dt = \text{const}$). Отсюда следует и абсолютность одновременности в механике Ньютона: если два события одновременны в одной системе отсчёта ($dt = 0$), то они будут одновременны и в любой другой системе

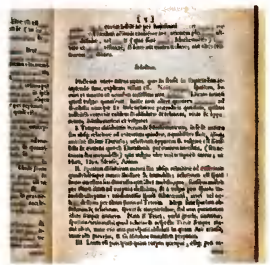
отсчёта. Таким образом, в ньютоновской теории пространства-времени существуют две основные инвариантные величины:

- 1) метрика абсолютного пространства $dl^2 = \text{const}$;
- 2) интервал времени $dt = \text{const}$.

Существование этих двух инвариантов есть математическое выражение абсолютности пространства и времени.

Концепция абсолютного пространства-времени Ньютона — яркий пример субстанционального подхода к пространству-времени как к самостоятельной физической категории, выполняющей роль вместилища всего сущего.

Противоположный, реляционный, подход отстаивал знаменитый современник Ньютона Готфрид Вильгельм Лейбниц, а позднее Эрнст Мах. Лейбниц считал пространство видом отношений между материальными объектами. В своих письмах он писал: «Я утверждаю, что без материи нет и пространства и что пространство само по себе не представляет собой абсолютной реальности». «Пространство... есть такой порядок, который



Страница из первого издания «Математических начал натуральной философии». Поучение (схолия) о природе пространства и времени.

Система отсчёта в классической физике — реальный, абсолютно неизменяемый объект, относительно которого наблюдается, измеряется и определяется движение материальных тел.





делает возможным расположение тел в случае их совместного существования».

В современной физике преобладает субстанциональная концепция пространства-времени. Вершиной этого подхода является общая теория относительности Альберта Эйнштейна, в которой материальные процессы есть лишь лёгкая рябь на поверхности пространства-времени.

Новейшие теории единых взаимодействий рассматривают как основополагающую мировую субстанцию именно пространство-время, а не материю. Но продолжает существовать и реляционная концепция пространства-времени, поддержанная в XX в. советским физиком-теоретиком Яковом Ильичом Френкелем и американским физиком Ричардом Филлипсом Фейнманом.

МЕХАНИЧЕСКОЕ ДВИЖЕНИЕ И СРЕДСТВА ЕГО ОПИСАНИЯ

«Дайте мне материю и движение, и я построю Вселенную», — говорил французский учёный Рене Декарт (1596—1650). Но что такое движение? Согласно Декарту, «движение, в обычном понимании этого слова, есть не что иное, как действие, посредством которого данное тело переходит с одного места на другое». В наши дни движение иногда определяют как изменение положения тела в пространстве с течением времени. Однако ещё

Эйнштейн предупреждал, что, согласившись с таким определением, мы «примем на свою совесть не один тяжкий грех», ибо «неясно, что следует понимать здесь под словами „место“ и „пространство“».

Действительно, представьте, что перед вами на столе лежит яблоко. Кроме вас, в комнате больше никого нет. Закройте глаза на секунду, а затем откройте их. Можно ли утверждать, что яблоко, которое вы снова видите перед собой, продолжает находиться в том же самом месте пространства, в каком находилось за секунду до этого?

Если вы уже готовы ответить «да», то подумайте, не забыли ли вы о том, что за эту секунду яблоко вместе с земным шаром успело пролететь в пространстве путь в 30 км? Но если вы это учтёте и скажете, что яблоко окажется в 30 км от первоначального места, то и в таком случае ответ нельзя будет признать удовлетворительным. Ведь и Солнце движется вокруг центра Галактики, а сама Галактика — относительно других скоплений звёзд.

Между тем яблоко по-прежнему перед вами. Где же оно находится на самом деле? В том же месте пространства или нет? Чтобы выяснить





это, следует уточнить, что мы имеем в виду, когда говорим, что то или иное тело осталось на месте или переместилось из одной точки пространства в другую.

«Что такое точка пространства? Все думают, что знают это, но это только иллюзия», — говорил знаменитый французский учёный Жюль Анри Пуанкаре (1854—1912).

Когда мы рассуждаем о перемещении тела из одной точки пространства в другую, то подразумеваем, что между ними существуют некие различия. С точки зрения геометрии различные точки пространства различаются своими координатами. Но что такое координаты? Это наборы чисел, которые по определённым правилам приписываются разным точкам пространства. И возникает замкнутый логический круг: чтобы иметь возможность различать точки, мы приписываем им разные координаты, но разные координаты следует присваивать точкам, про которые уже известно, что они разные.

Разорвать этот круг удастся, если научиться различать точки ещё до того, как им приписали разные координаты. Однако сделать это при помощи одной лишь геометрии невозможно, ибо она оперирует абстрактными понятиями и сами по себе геометрические точки ничем не отличаются друг от друга.

Геометрия, конечно, замечательная наука, но, как сказал ирландский учёный Джон Лайтон Синг, рано или поздно «раздаётся зов природы, и в этот отвлечённый мир врывается физика». А в реальном мире мы имеем дело не с геометрическими точками, а с физически различимыми материальными объектами (телами), которые в пределе исчезающе малых размеров и приводят к идеализированному образу точки.

Поэтому дальнейшие действия будут следующими. Примем какое-либо реальное твёрдое тело за *тело отсчёта*, а какую-нибудь очень ма-

ленькую часть этого тела — за начало отсчёта 0. Теперь, отмеряя от него с помощью другого твёрдого тела — масштабного стержня (или линейки) — вдоль трёх взаимно перпендикулярных направлений различные расстояния, поставим в соответствие каждому месту, где окажется то или иное деление стержня, определённую тройку чисел — координаты x, y, z .

Представим различные положения масштабного стержня в виде твёрдой решётки, жёстко связанной с телом отсчёта, — её называют *системой координат*. При достаточно малых размерах ячеек решётку можно рассматривать как некоторую твёрдую среду, а каждый её узел — как точку этой среды. Такие точки воображаемой среды и имеют в виду, когда говорят о тех или иных точках пространства.

Следовательно, определение положения любого тела в пространстве сводится к указанию тех точек твёрдой среды (или системы координат), связанной с выбранным телом отсчёта, с которыми в данный момент времени совпадают точки рассматриваемого тела.



Тело отсчёта и масштабные стержни.





Но тел отсчёта может быть сколько угодно много, и с каждым связываются свои системы координат. Все системы движутся относительно друг друга, и в любой из них положение одной и той же частицы будет характеризоваться разными наборами чисел x, y, z .

Поэтому на вопрос о том, где находится данное тело, можно дать бесчисленное множество разных ответов. Каждый из них будет справедлив по отношению к тому или иному телу отсчёта. Говоря о положении тела в пространстве, бессмысленно пытаться указать какое-то «истинное» место, в котором рассматриваемое тело якобы находится «на самом деле». Никакого «на самом деле» не существует. Все положения в пространстве относительны. Без указания тела отсчёта любой ответ на поставленный выше вопрос будет лишён смысла, ибо никакого абсолютного пространства, не связанного с телом отсчёта, не существует.

ДВИЖЕНИЕ

Соотнося с тем или иным телом отсчёта систему координат (или воображаемую твёрдую среду), мы созда-

ём своего рода арену для наблюдения и изучения всевозможных процессов, происходящих в реальном мире.

Поскольку никаких абсолютных мест не существует и положение тела имеет смысл только по отношению к тому или иному телу отсчёта, то относительно и его изменение, т. е. движение. Как писал Декарт, движение есть лишь «перемещение одной части материи, или одного тела, из соседства тех тел, которые непосредственно его касались и которые мы рассматриваем как находящиеся в покое, в соседство других тел». Поэтому, предлагает Эйнштейн, «оставим в стороне неясное слово „пространство“, под которым, признаемся, мы ничего определённого не подразумеваем; вместо этого мы рассмотрим „движение по отношению к практически твёрдому телу отсчёта“».

Итак, *механическое движение* тела — это процесс изменения его положения относительно твёрдого тела, выбранного за тело отсчёта.

В широком смысле слова под движением понимают любое изменение, происходящее в природе. Именно так трактовал это понятие древнегреческий учёный Аристотель. «Всякий [предмет], — писал он, — необходимо должен двигаться сообразно своей способности к движению определённого рода, например способный к качественному изменению — качественно изменяться, способный менять место — перемещаться...» Последнее было названо сначала местным, а затем механическим движением. Иные формы движения, например биологическую (эволюция живых организмов), социальную (развитие общества) и т. д., изучает уже не механика, а другие науки.

Механическое движение относительно: по отношению к разным телам отсчёта оно выглядит по-разному, вплоть до того, что может вообще смениться покоем, если за тело отсчё-





та принять то тело, движение которого мы изучаем. Например, человек, сидящий в поезде, движется относительно полотна железной дороги, но находится в покое относительно себя, а также вагона поезда. Самолёт в небе перемещается относительно облаков, но покоится относительно сидящего в кресле пилота.

Однако наряду с относительностью механическому движению при-



Столкновение автомобилей или попадание мяча в ворота противника — факты явно абсолютные. В противном случае для спасения людей во время автомобильной катастрофы или для изменения результатов футбольного матча достаточно было бы выбрать в качестве тела отсчёта не Землю, а какое-нибудь другое тело. Однако мир устроен иначе, и с этим нужно считаться.



сути и черты абсолютности, а именно: относительное движение двух (и более) тел есть факт абсолютный, не зависящий от выбора тела отсчёта! Так, если относительно Земли расстояние между двумя телами A и B уменьшается, то сближение этих тел будет происходить и относительно любого другого тела отсчёта (автомобиля, Солнца, Луны и т. д.). Другими словами, нельзя найти такое тело отсчёта, по отношению к которому A и B не сближались бы, а удалялись друг от друга. Сближение данных тел имеет абсолютный характер.

Это и понятно. Если бы механическое движение было только относительным (и, следовательно, всегда существовала бы возможность уничтожить его, выбрав подходящее тело отсчёта), то оказалось бы неясным, как оно может приводить к абсолютным следствиям. Между тем мы постоянно имеем дело именно с такими проявлениями движения.

СИСТЕМА ОТСЧЁТА

Картина мира будет выглядеть застывшей, если не дополнить её понятием времени. Для измерения времени нужны *часы*. Ими в физике может служить любая система тел, в которой происходит многократно повторяющийся процесс, например колебания маятника, вращение Земли, колебания атомов в кристаллической решётке и т. д.

От часов требуется, чтобы их ход был равномерным. Поэтому использовать в них можно только периодический процесс, т. е. такой, который повторяется через строго одинаковые промежутки времени. Но убедиться в том, что данный процесс является именно таким, удастся лишь с помощью уже имеющихся равномерно идущих часов. В результате мы оказываемся в порочном кругу. Чтобы вырваться из него, надо какие-либо часы просто принять за равномерно идущие. Тогда все остальные часы можно будет сверять по ним.

Песочные часы.





Выбор эталонных часов — дело серьёзное. Ведь это должны быть очень хорошие часы, обладающие как можно более высокой воспроизводимостью. Иначе говоря, если их изготовить достаточно много, то все они с максимальной возможной точностью должны идти одинаково. Песочные часы в данном отношении

далеки от совершенства; воспроизводимость маятниковых существенно лучше, ещё выше она у кварцевых, атомные часы в этом качестве превосходят все остальные. Именно их в настоящее время и принимают за эталонные.

Введение часов является последним шагом в построении «арены»,

ЧАСЫ — ДЕЛО ТОНКОЕ

Вообще говоря, часы, находящиеся в разных местах пространства, могут показывать неодинаковое время. Для того чтобы оно было общим (единым) во всех точках данной системы отсчёта, часы следует *сбалансировать* (сделать их ход одинаковым) и *синхронизировать* (согласовать начальный момент, от которого будет вестись отсчёт времени). Насколько важно, чтобы эти процессы были проведены аккуратно, стало ясно лишь с созданием частной теории относительности Эйнштейна.

Балансировку часов можно осуществить следующим образом. Поместив разные часы в одном и том же месте, отрегулируем их ход так, чтобы все они шли одинаково. Затем, выключив (остановив) их, разнесём по предназначенным для них местам.

Теперь все часы следует синхронизировать, т. е. запустить таким образом, чтобы начало отсчёта времени у них было одним и тем же.

Казалось бы, можно попытаться синхронизировать их уже во время балансировки, когда они находились все рядом. Для этого надо было установить на всех часах одно и то же время, после чего, не выключая, разнести по разным местам. Однако такой способ синхронизации возможен лишь в том случае, если существует уверенность, что ход часов не зависит от их движения. Если же имеются сомнения (для чего есть теоретические и экспериментальные основания), то лучше поступить иначе.

Будем считать, что часы сбалансированы и уже разнесены по разным

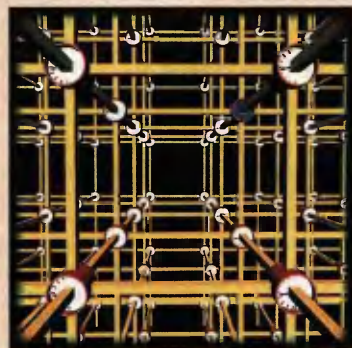
местам. Воспользуемся для их синхронизации какими-либо сигналами, например световыми лучами или радиоволнами. Измерим в первую очередь промежуток времени τ , необходимые для распространения сигналов из начала координат во все другие точки и обратно (причём каждый сигнал должен сразу же отражаться из соответствующей точки назад). Для этого нужны лишь одни часы — те, которые находятся в начале системы координат. Теперь, установив на них время t_0 , одновременно с этим направим сигналы ко всем остальным часам. Тогда для синхронизации достаточно в момент прихода сигнала установить на них время $t = t_0 + \tau/2$ (где время τ , конечно, для каждой точки своё).

Заметим, что не всякий сигнал может использоваться как синхронизирующий. Важное условие: его скорость должна быть одинакова во всех направлениях. Иначе говоря, время распространения сигнала от начала координат до точек A , B и обратно должно быть одинаковым, если расстояние $|OA| = |OB|$. Звук, например, не годится в качестве синхронизирующего сигнала, поскольку может дуть ветер.

Итак, мы выяснили, как синхронизировать часы, находящиеся в одной и той же системе отсчёта. Но любое явление можно изучать в разных системах отсчёта. Переход от одной из них к другой требует умения согласовывать показания часов, движущихся относительно друг друга. Значит ли это, что достаточно сначала синхронизировать все часы в какой-то одной системе отсчёта, а затем передать их в другие системы отсчёта? Например,

согласовав ход часов, покоящихся относительно Земли, разместить их потом в лаборатории, расположенной в движущемся поезде. Нет, поскольку в момент передачи часов из одной системы отсчёта (где они покоились) в другую (где они также должны будут покоиться) часы неизбежно подвергнутся ускорению, которое может повлиять на их ход и тем самым свести на нет все усилия по их синхронизации. Поэтому согласование часов, расположенных в разных системах отсчёта, следует производить следующим образом.

Допустим, имеются две разные системы отсчёта S и S' , движущиеся относительно друг друга с некоторой скоростью. В тот момент, когда какие-то часы первой системы поравняются с часами второй системы, установим на них одновременно одинаковое время. После этого в каждой из систем отсчёта все остальные часы синхронизируем с ними тем способом, о котором говорилось выше.





служашей для описания процессов, протекающих в нашем мире. Расставив их в каждой точке используемой системы координат, мы получим то, что в физике принято называть системой отсчёта.

Система отсчёта — это совокупность тела отсчёта, связанной с ним системы координат и неподвижных часов.

Конечно, никто и никогда не сможет разместить по всему пространству бесконечное количество часов. Однако подобного и не требуется — ведь они нужны лишь там, где происходит интересующее нас явление.

МАТЕРИАЛЬНЫЕ ТОЧКИ И ТВЁРДЫЕ ТЕЛА

Декарт считал, что для построения Вселенной нужны материя и движение. Понятие «движение» мы обсудили. Выбрав ту или иную систему отсчёта в качестве «арены» для изучения движения, можно оглянуться вокруг. Открывшаяся картина материального мира оказывается чрезвычайно сложной. «Вы, — пишет американский физик Ричард Фейнман, — не найдёте в природе ничего простого, всё в ней перепутано и слито. Но наша любознательность требует найти в этом простоту».

Например, все тела имеют сложнейшую атомную структуру, а также обладают многочисленными механическими, тепловыми, электрическими, оптическими и другими свойствами. Учесть сразу всё это разнообразие мы не в состоянии. Чтобы изучение окружающего мира стало возможным, необходимо заменить реальные тела их упрощёнными моделями. *Моделями* в физике называют такие идеализированные объекты, в которых пренебрегают несущественными в данной задаче деталями и свойствами реальных тел и сохраняют только их основные, определяющие черты.

Наиболее простыми моделями, используемыми в механике, являются материальная точка и абсолютное твёрдое тело.

Материальной точкой называют абстрактное тело нулевых размеров. Пренебречь его размерами можно тогда, когда тело движется без вращения (или вращательную часть его движения можно в условиях данной задачи не учитывать) и при этом его размеры много меньше расстояний, характерных для рассматриваемого в задаче движения.

С большой точностью за материальную точку можно принять всю нашу планету при изучении её орбитального движения вокруг Солнца (поскольку расстояние, которое Земля проходит за год, в десятки тысяч раз превышает размеры земного шара, а её собственное осевое вращение не влияет на движение вокруг Солнца).

Но, скажем, полёт пули весьма существенно зависит от её вращательного движения, и потому при объяснении характера движения пули пренебрегать её размерами можно не всегда. Нельзя считать материальной точкой и ту же Землю, когда рассматривается суточное вращение планеты вокруг своей оси.

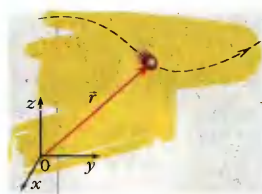
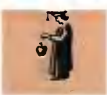
Заметим, что наряду с названием «материальная точка» в настоящее время широко используется термин «частица». В классической физике эти термины считаются синонимами, в физике микромира применяется только последний термин.

В некоторых задачах (например, при изучении равновесия тел) пренебречь размерами тела нельзя даже тогда, когда оно не совершает никакого вращательного движения. В этом случае рассматриваемое тело часто бывает удобно представлять в виде системы материальных точек, взаимное расположение которых с течением времени остаётся неизменным. Деформациями такого тела пренебрегают, и потому соответствующую



Маятниковые часы.

Ричард Филлипс Фейнман (1918–1988) — американский физик-теоретик, один из основателей квантовой электродинамики.



Положение частицы можно определить с помощью радиус-вектора.

модель называют *абсолютно твёрдым телом*.

Когда деформациями тела пренебречь нельзя, используют модель *идеально упругого тела*. В данном случае все деформации модели считают упругими, т. е. полностью исчезающими после прекращения действия внешних сил. Пластические деформации тела, которые остаются и после прекращения действия внешних сил, при этом не учитываются.

ЗАКОН ДВИЖЕНИЯ

Предмет изучения механики — это грандиозный спектакль, в котором роль сцены играет выбранная система отсчёта, а актёрами являются движущиеся тела. Природа, писал немецкий поэт и мыслитель Иоганн Вольфганг Гёте, «даёт дивное зрелище; видит ли она его сама, не знаем, но она его даёт для нас, а мы, незамеченные, смотрим из-за угла...».

Оставаться «незамеченными», однако, удаётся не всегда. Ведь при изучении движения необходима аппаратура для измерения расстояний и промежутков времени, а приборы могут оказать некоторое влияние на исследуемое тело.

В классической физике (физике макромира) считается, что это влияние можно сделать сколь угодно слабым, так что при изучении движения макроскопических тел им пренебрегают. Тогда, измеряя координаты движущейся частицы в разные моменты времени, можно установить зависимости $x(t)$, $y(t)$ и $z(t)$, описывающие её движение в отсутствие побочного влияния, которое оказывают на частицу измерительные приборы. Если такие зависимости известны, то принято говорить, что известен *закон движения* частицы.

Вместо координатной формы записи закона движения можно использовать векторную. В этом случае положение частицы в выбранной

системе отсчёта характеризуют вектором $\vec{r}$, проведённым из начала системы отсчёта в ту её точку, где находится в данный момент рассматриваемая частица. Его называют *радиус-вектором* частицы. Ориентация радиус-вектора указывает направление на движущуюся частицу, а его модуль — расстояние до неё. Аналогичным способом характеризуют положение тела в радиолокации.

Заметим, что проекции вектора $\vec{r}$ на координатные оси совпадают с координатами x , y , z его конца, поэтому закон движения частицы теперь определяется не тремя, а одной функцией:

$$\vec{r} = \vec{r}(t).$$

ТРАЕКТОРИЯ, ПУТЬ И ПЕРЕМЕЩЕНИЕ

При движении частицы конец радиус-вектора $\vec{r}$ в выбранной системе отсчёта описывает линию — *траекторию* частицы. Её длину l называют пройденным *путём*.

Траектории имеют разную форму. О ней иногда удаётся судить по видимому следу, оставляемому движущимся телом. Это может быть пролетевший в небе самолёт или кусочек

Радиолокация.





мела, с помощью которого сделан рисунок на классной доске. Но в большинстве случаев траектория невидима и допускает лишь математическое описание. Например, если траектория плоская, т. е. все её точки находятся в одной плоскости, то её уравнением будет зависимость $y = f(x)$, где y и x — координаты движущейся частицы в выбранной системе отсчёта.

Путь является скалярной величиной и потому никакой информации о направлении движения не содержит. Иначе обстоит дело с перемещением.

Перемещением частицы называют вектор $\vec{s}$ проведённый из начального положения частицы в выбранной системе отсчёта в её конечное положение в той же системе отсчёта. Легко заметить, что для любых двух точек 1 и 2 соединяющее их перемещение может быть представлено в виде разности радиус-векторов этих точек:

$$\vec{s} = \Delta \vec{r} = \vec{r}_2 - \vec{r}_1.$$

Если начальное положение тела известно, то перемещение позволяет определить его конечное положение и тем самым предсказать, где будет тело спустя заданное время.

СКОРОСТЬ И УСКОРЕНИЕ

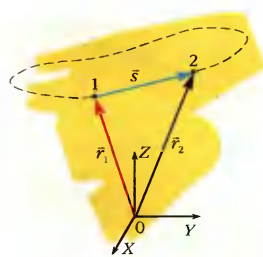
В лекциях Фейнмана приводится поучительная история о том, как трудно объяснить, что такое скорость, человеку, нарушившему правила дорожного движения. Полицейский, остановив машину, сообщил нарушительнице, что она ехала со скоростью 90 км/ч, а в ответ услышал: «Простите, это невозможно. Как я могла делать девяносто километров в час, если я еду всего лишь семь минут!».

Действительно, что означают эти 90 километров и 1 час, когда речь идёт о скорости в какой-то определённой точке траектории и в неко-

торый момент времени? Английский учёный XIV в. Ричард Гейтсбёри объяснял это следующим образом: «При неравномерном движении скорость в любое данное мгновение определяется величиной пути, который был бы пройден... точкой, если бы в течение некоторого промежутка времени она бы двигалась равномерно с той самой степенью скорости, с которой она движется в данное мгновение». Таким образом, скорость 90 км/ч, достигнутая автомобилем в какой-то момент времени, означает, что если бы, начиная с этого момента, движение автомобиля стало равномерным, то за последующий час он проехал бы путь, равный 90 км.

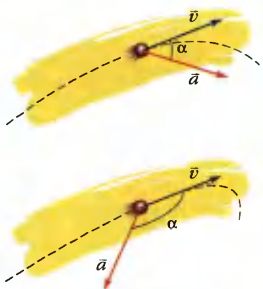
Однако в устах полицейского, сообщившего нарушительнице, за что её задержали, подобное объяснение выглядело бы не очень убедительно. Ведь никому не захочется платить штраф за то, что ещё не произошло! И потому неудивительно, что в истории, рассказанной Ричардом Фейнманом, нарушительница скромно заметила: «Да, но я ведь затормозила и остановила машину, так что теперь-то я уж никак не могла бы проехать девяносто километров за час».

«Как видите, — заключает Фейнман, — полицейский оказался бы



Перемещение $\vec{s}$ соединяет начальную и конечную точки траектории.





Ускорение может быть направлено под разными углами к скорости.

в очень трудном положении, пытаясь объяснить, что он имел в виду».

Что же всё-таки следует понимать под скоростью тела в данный момент времени? Современная физика отвечает на этот вопрос так.

Рассмотрим движение частицы на протяжении интервала времени Δt , содержащего интересующий нас момент. Составив отношение $\Delta \vec{r} / \Delta t$ перемещения, совершённого частицей за данное время, к этому интервалу времени, начнём уменьшать Δt . Тогда перемещение $\Delta \vec{r}$ при этом тоже будет уменьшаться. Изменится и отношение $\Delta \vec{r} / \Delta t$ (такое отношение называют средней скоростью движения на рассматриваемом участке траектории).

Если, однако, движение частицы непрерывно и в каждый момент времени её положение характеризуется определённым радиус-вектором $\vec{r}$, то у отношения $\Delta \vec{r} / \Delta t$ будет существовать некоторый предел, к которому оно станет стремиться при $\Delta t \rightarrow 0$. Значение этого предела и принимают за *мгновенную скорость* частицы в данный момент времени.

В математике такой предел называют производной. Поэтому определение мгновенной скорости можно записать в виде следующей формулы:

$$\vec{v} = \vec{r}',$$

где $\vec{r}'$ — производная радиус-вектора частицы по времени t .

Последнее выражение можно переписать в несколько ином виде, если учесть, что производная по времени в математике обозначается не только с помощью штриха, но и посредством символа d/dt (читается: «дэ по дэ тэ»). Таким образом,

$$\vec{v} = \frac{d\vec{r}}{dt}.$$

При этом проекции скорости на координатные оси определяются выражениями:

$$v_x = \frac{dx}{dt}, \quad v_y = \frac{dy}{dt}, \quad v_z = \frac{dz}{dt}.$$

Скорость является векторной величиной. В каждый момент времени она направлена по касательной к траектории, по которой движется тело.

Единица скорости в СИ — метр в секунду (м/с). 1 м/с — это скорость такого равномерного движения, при котором тело за 1 с проходит путь в 1 м. Для этой единицы предлагалось специальное название «мес», однако узаконено оно не было.

Поскольку 1 м = 10^{-3} км, а 1 с $\approx 2,8 \cdot 10^{-4}$ ч, то

$$1 \frac{\text{м}}{\text{с}} = \frac{10^{-3} \text{ км}}{2,8 \cdot 10^{-4} \text{ ч}} = 3,6 \frac{\text{км}}{\text{ч}}$$

и

$$1 \frac{\text{км}}{\text{ч}} = \frac{10 \text{ м}}{36 \text{ с}}.$$

Отсюда, в частности, видно следующее: скорость 90 км/ч, о которой шла речь выше, есть то же самое, что и скорость 25 м/с. Поэтому, чтобы нарушить правила дорожного движения, не обязательно проделывать путь в 90 км за 1 ч; достаточно было за 1 с миновать 25 м, как, по-видимому, и сделала героиня рассказа Фейнмана.

Скорость тела с течением времени может изменяться. Характеристикой быстроты изменения скорости является векторная физическая величина, называемая *ускорением*. Ускорение равно пределу, к которому стремится отношение изменения скорости $\Delta \vec{v}$ к промежутку времени Δt , за который это изменение произошло, когда $\Delta t \rightarrow 0$. Иначе говоря, ускорение равно производной скорости по времени:

$$\vec{a} = \frac{d\vec{v}}{dt},$$

или (в проекциях на оси координат)

$$a_x = \frac{dv_x}{dt}, \quad a_y = \frac{dv_y}{dt}, \quad a_z = \frac{dv_z}{dt}.$$



Если траектория движения представляет собой плоскую кривую, вектор ускорения лежит в той же плоскости, что и траектория. Причём ускорение направлено в сторону вогнутости траектории и составляет с направлением вектора скорости острый угол, когда скорость возрастает, и тупой угол — когда она убывает.

Единицей ускорения в СИ является метр на секунду в квадрате (м/с^2). 1 м/с^2 — это такое ускорение, при котором скорость тела за каждую секунду равноускоренного прямолинейного движения изменяется на 1 м/с . Единица ускорения в 100 раз меньшая, т. е. 1 см/с^2 , называется галом (Гал) — в честь великого итальянского учёного Галилео Галилея, впервые установившего законы равноускоренного движения. Вслед за ускорением можно было бы ввести величину $\dot{w}$, характеризующую быстроту его изменения и равную производной $d\dot{w}/dt$. Затем можно было бы ввести величину, которая равна производной $d^2\dot{w}/dt^2$, и так до бесконечности. В этом, однако, нет необходимости. По не вполне понятным причинам при описании нашего мира не требуются уравнения движения, содержащие подобные величины.

ИНЕРЦИАЛЬНЫЕ СИСТЕМЫ ОТСЧЁТА

В силу относительности движения каждая из перечисленных выше характеристик имеет определённое значение лишь в той или иной системе отсчёта. В разных системах отсчёта одно и то же движение выглядит по-разному: различными могут быть траектории движения, зависимости $\vec{r}(t)$, а также скорости и ускорения. При этом в одних системах отсчёта движение представляется проще, в других — сложнее.

Например, в системе отсчёта, связанной с Землёй, лежащий на траве



камень, пока его не трогают, остаётся неподвижным. Но тот же камень будет перемещаться по сложной криволинейной траектории, если наблюдать за ним, находясь на вращающейся карусели. Причём в первой системе отсчёта характер движения камня (при неизменных внешних условиях) не будет зависеть от того, где именно находится этот камень и когда именно его положили на землю. Во второй системе отсчёта, напротив, форма траектории, скорость и ускорение камня будут определяться его расположением относительно центра, вокруг которого происходит вращение. И если в начальный момент времени его скорость была равна нулю, то уже в следующий момент (как только карусель начала вращаться) это изменится.

Если в системе отсчёта любой процесс, протекающий в замкнутой совокупности тел, не зависит от её местоположения, ориентации в пространстве и от момента времени, в который начался процесс, то говорят, что пространство и время в такой системе отсчёта обладают *симметрией*. Под этим понимают однородность пространства (равноправие всех точек), изотропию пространства (равноправие всех направлений) и однородность времени (равноправие всех моментов). В таких системах отсчёта выполняется *закон инерции*: тело, бесконечно удалённое от всех остальных тел, сохраняет

Замкнутая система — совокупность тел, рассматриваемая в условиях, когда $r \rightarrow \infty$, где r — расстояние до окружающих систему тел Вселенной.



свою скорость неизменной. Поэтому такие системы отсчёта называются *инерциальными*.

В инерциальных системах отсчёта одинаково поставленные опыты приводят к идентичным результатам независимо от того, где и когда они проводились, а также от того, как при этом была ориентирована экспериментальная установка. И наоборот, если система отсчёта является неинерциальной, то соответствующие опыты будут давать разные результаты.

Повседневные наблюдения показывают, что по крайней мере приблизительно инерциальной можно считать систему отсчёта, связанную с Землёй. В самом деле, возьмём два одинаковых телевизора и, включив, поставим в разных углах комнаты. Понаблюдав за ними некоторое время, мы увидим, что они работают одинаково. Их работа не будет зависеть и от того, когда мы их включили — часом раньше или часом позже. Эти и многие другие опыты

свидетельствуют о том, что пространство и время в земной системе отсчёта действительно до некоторой степени симметричны. Если бы было иначе, то в разных местах и в разные эпохи на Земле действовали бы разные законы природы. На самом деле, как известно, это не так, и потому в исследованиях можно опираться на труды предшественников, а также коллег в других городах и странах.

Эта симметрия, однако, не является строгой. Например, в тех же телевизорах, расположенных в разных местах земного шара, электронные лучи внутри кинескопов будут испытывать небольшие смещения, зависящие от географической широты места, в котором они находятся. Но если это нарушение симметрии внешне незаметно, то такое явление, как подмывание водой правых (но не левых) берегов рек в Северном полушарии, общеизвестно и прямо показывает, что разные направления в системе отсчёта, связанной с Землёй, не совсем равноправны.

Нарушение пространственной симметрии в земной системе отсчёта обнаруживается и в опытах с так называемым маятником Фуко. Наблюдая за его колебаниями, можно заметить, что плоскость, в которой они происходят, медленно поворачивается, причём в разных местах земного шара с различной скоростью. Она минимальна (равна нулю) на экваторе планеты и максимальна на её полюсах. Обозначим период вращения Земли вокруг своей оси T , а географическую широту местности — φ , тогда время τ , за которое плоскость колебаний маятника совершает полный оборот, окажется равно

$$\tau = \frac{T}{\sin \varphi}.$$

Отсюда следует, что, если бы Земля не вращалась, данного эффекта просто не существовало бы. Это обстоятельство указывает на то, что причиной неинерциальности зем-

Маятник Фуко.
Исаакиевский собор.
Санкт-Петербург.





ной системы отсчёта является вращение планеты.

Более инерциальной оказывается та система отсчёта, начало которой расположено в центре Солнца, а координатные оси направлены на удалённые одиночные звёзды. Именно такой системой отсчёта, как правило, пользуются при решении задач небесной механики. Однако она также не является идеалом инерциальной системы.

В настоящее время за эталон инерциальной системы отсчёта в астрономии принимается такая система отсчёта, в которой роль опорных «звёзд» при построении соответствующей системы координат играют центры удалённых галактик. Отклонения от инерциальности в ней не поддаются обнаружению.

ПРИНЦИП ОТНОСИТЕЛЬНОСТИ ГАЛИЛЕЯ

Помимо пространственно-временной законы природы обладают ещё другой симметрией. Одним из тех, кто первым обратил на неё серьёзное внимание, был Галилео Галилей. «Уединитесь, — писал он, — с кем-либо из друзей в просторное помещение под палубой какого-нибудь корабля, запаситесь мухами, бабочками и другими подобными мелкими летающими насекомыми. Пусть будет у вас там также большой сосуд с водой и плавающими в нём маленькими рыбками. Подвесьте наверху ведёрко, из которого вода будет падать капля за каплей в другой сосуд с узким горлышком, подставленный внизу. Пока корабль стоит неподвижно, наблюдайте пристально, как мелкие летающие животные с одной и той же скоростью движутся во все стороны помещения; рыбы, как вы увидите, будут плавать безразлично во всех направлениях; все падающие капли



попадут в подставленный сосуд, и вам, бросая какой-нибудь предмет, не придётся бросать его с большей силой в одну сторону, чем в другую, если расстояния будут одни и те же... Прилежно наблюдайте всё это, хотя у нас не возникает никакого сомнения в том, что, пока корабль стоит неподвижно, всё должно происходить именно так. Заставьте теперь корабль двигаться с любой скоростью, и тогда (если только движение будет равномерным и без качки в ту или другую сторону) во всех названных явлениях вы не обнаружите ни малейшего изменения и ни по одному из них не сможете установить, движется ли корабль или стоит неподвижно».

В частности, утверждает Галилей, если с высокой мачты сбросить камень, то он «всегда упадёт в одно и то же место корабля, неподвижен ли тот или движется с какой угодно скоростью». Это утверждение многим современникам Галилея показалось сомнительным: тогда была распространена точка зрения, согласно которой чем быстрее движется корабль, тем дальше от подножия мачты должен упасть камень. Нужен был эксперимент, чтобы установить истину. Однако Галилей заявил, что он и без опыта уверен: результат будет





таким, как он говорит, ибо «необходимо, чтобы он последовал».

Прошло девять лет, прежде чем был поставлен соответствующий опыт. В 1641 г. вблизи Марселя французский физик Пьер Гассенд и в присутствии большого числа свидетелей, находясь на галере, несколько раз (при разных скоростях движения судна) сбросил камень с мачты. Однако даже при наибольшей возможной скорости, которую могли обеспечить гребцы, «камень всё же падал во всех случаях вдоль мачты к её подножию, и с той же стороны». После этого все сомнения в справедливости утверждений Галилея отпали.

Итак, одинаково поставленные механические опыты и в системе отсчёта, неподвижной относительно Земли, и в тех, что движутся относительно неё равномерно и прямолинейно, приводят к совершенно одинаковым результатам. Эти системы отсчёта оказываются физически равноправными — среди них нет никакой преимущественной, как-то выделенной по сравнению с другими системы.

Таким образом, если имеется система отсчёта, которую с известной точностью можно считать инерциальной, то с той же самой точностью будут инерциальными и все остальные системы отсчёта, движущиеся относительно неё равномерно и прямолинейно.

Позднее закономерность, описанную Галилеем, стали рассматривать в качестве одного из основных принципов механики, для которого впоследствии было предложено название «принцип относительности Галилея».

Одна из первых его формулировок, предложенная Исааком Ньютоном в 1687 г., звучала так: «Относительные движения друг по отношению к другому тел, заключённых в каком-либо пространстве, одинаковы, покоится ли это пространство или движется равномерно и прямолинейно без вращения».

В настоящее время *принцип относительности Галилея* формулируют следующим образом: законы механики во всех инерциальных системах отсчёта имеют один и тот же вид. Именно поэтому, в частности, находясь в закрытом вагоне и проводя в нём различные механические эксперименты, невозможно по их результатам определить, покоится ли этот вагон или движется относительно Земли равномерно и прямолинейно.

Стоит, однако, вагону изменить свою скорость, например резко затормозить (и тем самым превратиться в неинерциальную систему), как падающие с полок вещи сразу дадут понять, движется он или нет.

Во времена Галилея практически вся физика сводилась к механике. Отсюда и «механический» характер принципа относительности Галилея. Но было и другое обстоятельство. В XIX столетии физики считали, что электромагнитные процессы не подчиняются принципу относительности. В результате получалось, будто этот принцип справедлив для одних явлений природы и несправедлив для других.

Однако в начале XX в. Жюль Анри Пуанкаре и Альберт Эйнштейн сняли имеющиеся несообразности, расширив принцип относительности на все явления природы (при этом, однако, пришлось радикально пересмотреть привычные представления о пространстве и времени). Оказалось, что не только законы механики, но и все другие законы физики во всех инерциальных системах отсчёта имеют один и тот же вид.

В современной физике принцип относительности часто формулируют как принцип симметрии: уравнения, выражающие физические законы, должны иметь такой вид, который не меняется при переходе от одной инерциальной системы отсчёта к другой. В подобной форме он используется на «переднем крае» фи-



зики, при построении новых научных теорий. Требуя от уравнений определённой симметрии, такой принцип позволяет установить один из основных критериев для выбора верного закона из множества различных математических выражений, получаемых учёными в результате тех или иных теоретических построений.

Проиллюстрируем это простым примером. Пусть имеется система из двух частиц, одна из которых (A) действует на другую (B) с силой F . По Ньютону, такая сила связана с ускорением частицы B :

$$\vec{F} = m\vec{a},$$

а согласно воззрениям, высказывавшимся ещё Аристотелем, она должна определять не ускорение, а скорость этой частицы:

$$\vec{F} = k\vec{v},$$

где k — некий постоянный (для данного тела) коэффициент пропорциональности. Какому из уравнений следует отдать предпочтение с точки зрения принципа относительности? Для того чтобы выяснить это, перейдём в другую инерциальную систему отсчёта и посмотрим, что произойдёт с каждым из уравнений.

Поскольку масса, ускорение и сила во всех инерциальных системах отсчёта имеют одинаковые значения, а скорость — разные, нетрудно сообразить, что ньютоновский закон в данном случае сохранит свой вид, а аристотелевский — нет (в нём левая часть останется без изменения, а правая изменится).

Таким образом, из предлагаемых уравнений лишь закон Ньютона, обладая должной симметрией, удовлетворяет требованию принципа относительности, и потому только он может претендовать на роль основного закона механики.

Для построения Вселенной, говорил Декарт, нужны материя и движение. И то и другое у нас есть. В нашем распоряжении имеются также достаточно удобная «сцена» (инерциальная система отсчёта), относительное движение с его характеристиками и материальные точки. Но что с ними делать? Располагать строительным материалом — ещё не значит суметь построить из него дом. Нужно научиться с ним обращаться, необходимо знать правила, по которым строится наш мир. Но это уже темы других разделов механики.

КИНЕМАТИКА МАТЕРИАЛЬНОЙ ТОЧКИ

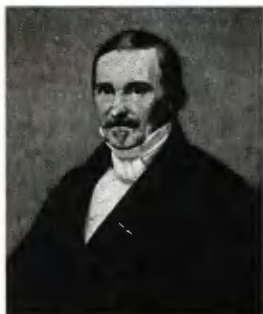
В конце XVIII — начале XIX в. в науке о движении тел (механике) постепенно стал формироваться раздел, в котором давалось лишь математическое описание того, как движутся тела, без выяснения причин, почему они так движутся. В 1818 г. польский математик и философ Юзеф Вронский (1776—1853) назвал этот раздел *форономией*. Однако более широкое распространение получило другое его название — *кинематика* (от *грек.* «кинематос» — «движение»), которое

впервые появилось в 1834 г. в одной из работ французского учёного Андре Мари Ампера (1775—1836).

Кинематика даёт в руки исследователя мощный «инструмент», позволяющий работать в области изучения движения. Она объясняет, какими способами и какими математическими средствами можно описать перемещение тела из одного места в другое. Из множества факторов, влияющих на движение тел, здесь учитывается лишь то, что оно происходит

Андре Мари Ампер.
Графический портрет.





Жан Виктор Понселе.

в пространстве и во времени. Но соотношения между расстояниями в пространстве изучаются в геометрии, а свойства времени — в науке, называемой *хронометрией* (от греч. «хронос» — «время» и «метрео» — «измеряю»). Поэтому можно сказать, что кинематика представляет собой объединение геометрии и хронометрии (или геометрию пространства-времени).

В кинематике не рассматриваются физические свойства тел (инертность и способность взаимодействовать) и потому отсутствуют такие понятия, как масса и сила. Основными в ней являются лишь геометрические характеристики движения — перемещение, скорость и ускорение. Наиболее «молодое» из перечисленных понятий — ускорение. В качестве особой физической величины оно было введено в физику в 1841 г. французским учёным Жаном Виктором Понселё (1788—1867). Вот почему именно этот год считают годом создания кинематики как самостоятельной науки.

В зависимости от характера изменений скорости и ускорения все движения в кинематике делят на несколько видов.

РАВНОМЕРНОЕ ПРЯМОЛИНЕЙНОЕ ДВИЖЕНИЕ

Из всех движений самым простым является *равномерное прямолинейное*. Так называют движение без ускорения, когда скорость частицы остаётся неизменной и по модулю, и по направлению. Строго говоря, такого движения в природе не существует. Однако нередко на протяжении не слишком больших интервалов времени и ограниченных отрезков пути скорость движения не успевает заметно измениться, и поэтому его принимают за равномерное и прямолинейное. В таких случаях путь, пройденный телом, находят как произведение скорости на время движения:

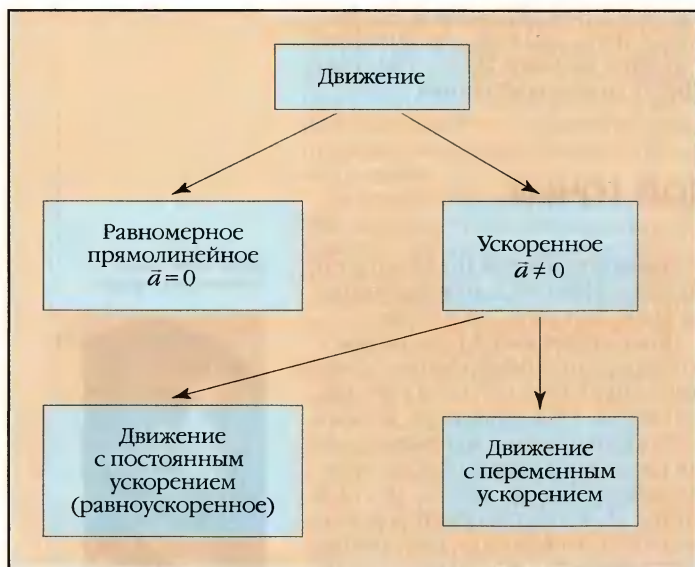
$$s = vt. \quad (1)$$

Это, пожалуй, самая первая физическая формула, с которой мы знакомимся ещё в начальной школе. Применяя её, можно решать самые разнообразные задачи: составлять расписание поездов, определять время распространения света от далёких галактик и т. д.

Рассмотрим простой пример. Известно, что расстояние s от Земли до Солнца составляет около $1,5 \cdot 10^8$ км. Найдём время t , которое требуется солнечному свету, чтобы достичь нашей планеты. Поскольку $t = s/v$, а скорость света $v \approx 3 \cdot 10^5$ км/с, то это время равно:

$$t = \frac{1,5 \cdot 10^8}{3 \cdot 10^5} \text{ с} = 500 \text{ с} \approx 8 \text{ мин.}$$

Следовательно, глядя в данный момент на Солнце, мы видим его таким, каким оно было примерно 8 минут назад. И установить это помогла





простая формула равномерного прямолинейного движения.

РАВНОУСКОРЕННОЕ ДВИЖЕНИЕ

Равноускоренным называют движение с постоянным ускорением. Простейшим примером такого движения является свободное падение тел, изучением которого занимался ещё Галилео Галилей. Скорость движения при этом не остаётся постоянной: в общем случае она меняется и по модулю, и по направлению. Описание данного движения значительно сложнее по сравнению с равномерным прямолинейным. Действия с числами здесь заменяют на действия с векторами, так как именно векторы содержат в себе информацию о направлении величин, характеризующих движение (о скорости, ускорении, перемещении).

Ускорение при равноускоренном движении показывает, на сколько изменяется скорость тела за каждую секунду движения:

$$\vec{a} = \frac{\vec{v} - \vec{v}_0}{t}, \quad (2)$$

где $\vec{v}_0$ — начальная скорость тела, а $\vec{v}$ — скорость того же тела спустя время t .

Из определения ускорения следует, что мгновенная скорость тела при равноускоренном движении изменяется с течением времени по линейному закону:

$$\vec{v} = \vec{v}_0 + \vec{a}t. \quad (3)$$

Эта формула позволяет по начальной скорости и ускорению тела вычислить его скорость в любой момент времени t .

Между тем основная задача механики заключается в определении того, где будет находиться тело спустя заданное время. Для её решения необходимо знать перемещение, совершённое телом за это время. Переме-

щение можно найти, умножив среднюю скорость на время движения:

$$\vec{s} = \vec{v}_{\text{ср}} t.$$

При равноускоренном движении средняя скорость равна полусумме начальной и конечной скоростей движения:

$$\vec{v}_{\text{ср}} = \frac{\vec{v}_0 + \vec{v}}{2}.$$

Поэтому

$$\vec{s} = \frac{\vec{v}_0 + \vec{v}}{2} t.$$

Подставляя сюда выражение (3), получаем:

$$\vec{s} = \vec{v}_0 t + \vec{a} \frac{t^2}{2}. \quad (4)$$

Именно это уравнение является непосредственным обобщением равенства (1) на случай движения с постоянным ускорением.



В какую сторону направлен вектор ускорения при равноускоренном прямолинейном движении?

Скорость тела увеличивается от 0 до v

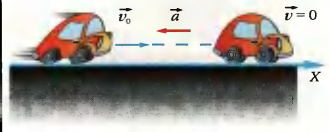
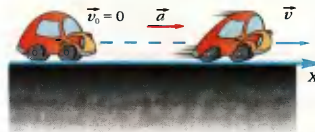
Скорость тела уменьшается от v_0 до 0

$$\vec{a} = \frac{\vec{v} - \vec{v}_0}{t} = + \frac{\vec{v}}{t}$$

Знак «плюс» в конце формулы означает, что вектор ускорения $\vec{a}$ направлен в ту же сторону, что и вектор скорости $\vec{v}$

$$\vec{a} = \frac{\vec{v} - \vec{v}_0}{t} = - \frac{\vec{v}_0}{t}$$

Знак «минус» в конце формулы означает, что векторы $\vec{a}$ и $\vec{v}$ направлены в противоположные стороны.





ОТ ВЕКТОРОВ К КООРДИНАТАМ

Уравнения (2), (3), (4) — векторные. Действия с векторами отличаются от действий с числами, поэтому ника-

кие числовые значения перемещения, скорости и ускорения в такие уравнения подставлять нельзя. Между тем любые расчёты требуют проведения операций именно с числами. Чтобы это стало возможным, необходимо от векторного способа

ЗАКОН ДВИЖЕНИЯ КАК РЯД ТЕЙЛОРА

Любое движение описывается своей функцией $\vec{r}(t)$, которая выражает зависимость радиус-вектора движущейся частицы от времени t и носит название закона движения. В общем случае эта функция может быть представлена в виде бесконечного ряда (см. статью «Степенные ряды» в томе «Математика» «Энциклопедии для детей»), открытого в 1712 г. английским математиком Бруком Тейлором:

$$\vec{r}(t) = \frac{t^0}{0!} \vec{r}(0) + \frac{t^1}{1!} \vec{r}'(0) + \frac{t^2}{2!} \vec{r}''(0) + \frac{t^3}{3!} \vec{r}'''(0) + \dots,$$

где штрих означает производную, а восклицательный знак — факториал ($n! = 1 \cdot 2 \cdot 3 \cdot 4 \cdot \dots \cdot n$; $0! = 1$).

При равноускоренном движении ускорение тела постоянно: $\vec{a} = \text{const}$. Но ускорение $\vec{a} = \vec{v}' = \vec{r}''$. Поэтому все производные более высоких порядков в приведённом выше ряде обращаются в нуль. А раз так, то для радиус-вектора частицы, совершающей равноускоренное движение, справедливо уравнение:

$$\vec{r}(t) = \vec{r}_0 + \vec{v}_0 t + \vec{a} \frac{t^2}{2},$$

где $\vec{r}_0 = \vec{r}(0)$ и $\vec{v}_0 = \vec{v}(0)$ — соответственно радиус-вектор и скорость частицы в начальный момент времени, т. е. когда $t = 0$.



Брук Тейлор.

ПЕРЕМЕЩЕНИЕ КАК ПЛОЩАДЬ ПОД ГРАФИКОМ СКОРОСТИ

Задача о нахождении перемещения, совершаемого при равноускоренном движении, впервые была решена в XVII в. Галилео Галилеем. Графический метод, который он тогда применил, не утратил своего значения и в наши дни.

При равноускоренном прямолинейном движении вдоль оси X скорость частицы (в проекции на эту ось) изменяется с течением времени по закону:

$$v_x = v_{0x} + a_x t.$$

Это — линейная функция. Значит, её графиком будет прямая линия. Докажем, что площадь фигуры под ней совпадает с проекцией перемещения s_x на рассматриваемую ось.

Всю площадь под графиком можно представить в виде суммы площадей узких прямоугольников, основания которых Δt бесконечно малы. Но площадь каждого из прямоугольников численно равна малому пе-

ремещению, совершённому частицей за время Δt (ведь площадь равна произведению сторон, а эти стороны есть скорость и время, причём последнее настолько мало, что движение на соответствующем участке можно считать равномерным). Сумма площадей всех прямоугольников даст не только общую площадь фигуры, но и перемещение s_x , совершённое за время t .

Итак, чтобы определить перемещение s_x при равноускоренном прямолинейном движении, достаточно найти площадь фигуры под графиком зависимости $v_x(t)$. Поскольку эта фигура является трапецией, её площадь равна произведению полусуммы оснований на высоту:

$$s_x = \frac{v_{0x} + v_x}{2} t.$$





описания движения перейти к координатному.

При координатном описании движения вместо векторов используют их проекции на оси координат. Поскольку любой вектор характеризуется тремя проекциями на оси X , Y и Z , следовательно каждому векторному уравнению в общем случае будут соответствовать три уравнения в координатной форме.

Для плоского (двухмерного) движения таких уравнений только два. Если же движение является прямолинейным, то для его описания достаточно одного уравнения в проекциях на ось X (при условии, что эта ось направлена параллельно вектору скорости частицы). Тогда уравнения (3) и (4), например, можно записать следующим образом:

$$\begin{aligned} v_x &= v_{0x} + a_x t, \\ s_x &= v_{0x} t + a_x \frac{t^2}{2}. \end{aligned} \quad (5)$$

Покажем, как следует обращаться с подобными уравнениями при решении задач на равноускоренное прямолинейное движение. Допустим, требуется определить скорость v и перемещение s автомобиля, имеющего начальную скорость $v_0 = 20$ м/с, через $t = 4$ с после начала торможения, если ускорение $a = 4$ м/с².

Учитывая, что проекции векторов положительны, когда эти векторы направлены в ту же сторону, что и ось, и отрицательны, когда они направлены в противоположную сторону, выразим все проекции, входящие в уравнения (5), через модули соответствующих векторов:

$$s_x = s, v_{0x} = v_0, v_x = v, a_x = -a.$$

Подстановка данных значений в уравнения (5) позволяет перейти от координатной формы записи соответствующих уравнений к скалярной:

$$v = v_0 - at \text{ и } s = v_0 t - a \frac{t^2}{2}.$$

Теперь можно произвести вычисления:

$$v = (20 - 4 \cdot 4) \text{ м/с} = 4 \text{ м/с},$$

$$s = (20 \cdot 4 - 4 \cdot \frac{4^2}{2}) \text{ м} = 48 \text{ м}.$$

Заметим, что если бы мы в этой задаче данные числовые значения начальной скорости и ускорения подставили в векторные формулы (3) и (4), то получили бы совершенно иные и, конечно, неверные ответы.



Джеймс Кларк Максвелл.

РАВНОМЕРНОЕ ДВИЖЕНИЕ ПО ОКРУЖНОСТИ

Как известно, год на Земле длится примерно 365 дней и соответствует периоду обращения Земли вокруг Солнца. Период обращения T — это время одного оборота. Проще всего его найти в случае равномерного кругового движения — он будет равен отношению длины окружности $l = 2\pi R$ к скорости, с которой движется тело:

$$T = \frac{2\pi R}{v}.$$

Скорость v в этой формуле называется линейной. Она показывает путь, пройденный телом за единицу времени. Помимо линейной движение по окружности характеризуется также угловой скоростью ω . Угловая скорость выражает не путь, а угол, на который поворачивается радиус-вектор частицы за единицу времени, и потому она определяется следующим образом: $\omega = \alpha/t$. Поскольку одному обороту соответствуют угол $\alpha = 2\pi$ радиан и время $t = T$, то угловую скорость можно представить в виде:

$$\omega = \frac{2\pi}{T} = \frac{v}{R}.$$

При равномерном движении по окружности неизменным остаётся лишь модуль линейной скорости, направление её, напротив, изменяется

Уильям Роуан Гамильтон.





СКАЛЯРЫ И ВЕКТОРЫ

Деление физических величин на скаляры и векторы предложил ирландский математик и механик Уильям Роуан Гамильтон (1805—1865). Одним из первых, кто оценил пользу такого нововведения, был знаменитый английский физик Джеймс Кларк Максвелл. Работая над созданием теории электромагнитного поля, он оперировал как величинами, которые не имеют никакого направления в пространстве, так и величинами, характеризующимися определённым направлением. Последние нельзя было складывать и умножать, как обычные числа: действия с ними требовали применения особых правил, их-то и разработал Гамильтон.

Однако для ирландского учёного скаляры и векторы явились составными частями особых чисел, которые Гамильтон назвал кватернионами. Максвелл решил их разделить. Убедившись, что векторное исчисление удивительно хорошо подходит для формулировки его теории, он написал: «Ценность идеи вектора несказанна».

В 1873 г. вышел фундаментальный труд Максвелла «Трактат по электричеству и магнетизму». Читая то, что написано в нём о скалярах и векторах, можно только удивляться, насколько язык Максвелла современен. И хотя с тех пор прошло более 120 лет, даже сегодня, знакомя с этими понятиями, можно лишь повторить слова английского учёного.

«Одна из наиболее важных особенностей метода Гамильтона, — писал Максвелл, — есть деление величин на скаляры и векторы.

Скалярная величина может быть полностью определена заданием одного единственного числа. Её числовое значение никоим образом не зависит от тех направлений, которые мы выберем для координатных осей.

Вектор, или направленная величина, требует для своего определения три числовые величины, проще всего понимать под ними числа, связанные с направлениями координатных осей.

Скалярные величины не включают в себя понятие направления. Объём геометрической фигуры, масса и энергия материального тела, гидростатическое давление в точке жидкости, потенциал в точке пространства — всё это примеры скалярных величин.

Векторная величина имеет длину и направление, так что обращение её направления обращает и её знак. Перемещение точки, представленное прямой линией, которая проведена из её начального положения в конечное, можно принять за типичную векторную величину, из чего и в самом деле возникло название «вектор». (Латинское слово *vector* означает «несущий, перевозящий».)

Для многих физиков того времени книга Максвелла стала первым знакомством с векторным исчислением. Впоследствии оно было развито в работах американского физика Джозайи Уилларда Гиббса (1839—1903) и английского учёного Оливера Хэвисайда (1850—1925).

Сформулируем основные положения векторной алгебры.

1. Любая вектор $\vec{a}$ характеризуется тремя числами — проекциями a_x , a_y и a_z на оси координат. При изменении системы координат эти числа изменяются.

2. Два вектора называются равными, если они имеют одинаковую длину (модуль), параллельны и направлены в одну и ту же сторону.

3. Сумма двух векторов $\vec{a} + \vec{b}$ может быть найдена либо по правилу треугольника, либо по правилу параллелограмма.

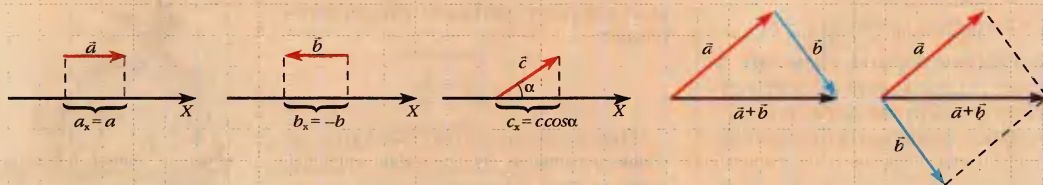
4. При умножении вектора $\vec{a}$ на число k получается вектор, в $|k|$ раз превосходящий $\vec{a}$ по длине, направленный в ту же сторону, что и $\vec{a}$, если $k > 0$, и направленный в противоположную сторону, если $k < 0$.

5. Скалярным произведением $\vec{a} \cdot \vec{b}$ двух векторов называется число, равное произведению модуля первого вектора на модуль второго вектора и на косинус угла между ними:

$$\vec{a} \cdot \vec{b} = ab \cos \alpha$$

6. Векторным произведением $\vec{a} \times \vec{b}$ двух векторов называется вектор, направленный перпендикулярно каждому из них в ту сторону, куда перемещался бы буравчик (с правой резьбой) в случае кратчайшего поворота его рукоятки от $\vec{a}$ к $\vec{b}$, и равный по модулю $ab \sin \alpha$ (что совпадает с площадью параллелограмма, построенного на перемножаемых векторах).

Используемые выше обозначения не сразу были приняты математиками. Так, предлагаемая Гиббсом символика (например, точка и крест для обозначения произведения векторов) резко критиковалась ими. Вместо этого предлагалось использовать обозначения $S.ab$, $v.ab$, $a \wedge b$ и др. Но история рассудила иначе. Немецкий математик Феликс Клейн однажды признался, что не понял, почему же эта символика «так укоренилась». Между тем ответ прост: она понравилась физикам.





непрерывно. Этого достаточно, чтобы ускорение было отлично от нуля. Правда, оно будет характеризовать не быстроту изменения числового значения скорости (оно не меняется), а быстроту изменения её направления. Чтобы выяснить, от чего зависит модуль этого ускорения, заметим: чем больше скорость движения (по одной и той же окружности), тем быстрее изменится направление вектора скорости и, следовательно, тем больше должно быть ускорение. Если же при неизменной скорости увеличивать радиус окружности, то каждый её участок (проходимый за данное время) будет всё более приближаться к прямой линии, а движение — всё больше походить на равномерное прямолинейное. Но при равномерном прямолинейном движении $a = 0$. Поэтому с ростом радиуса окружности модуль ускорения должен уменьшаться.

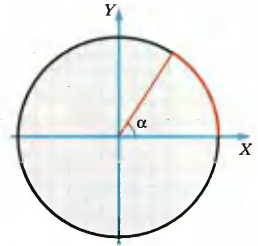
Таким образом, можно предположить, что при равномерном круговом движении ускорение тела прямо пропорционально скорости движения и обратно пропорционально радиусу окружности, т. е. равно отношению v/R . Однако размерность этого отношения (1/с) отличается от размерности ускорения (м/с²). Что-

бы добиться совпадения их размерностей, достаточно заменить скорость в рассматриваемом отношении на её квадрат. Разделив (м/с)² на (м), мы действительно получим (м/с²). Следовательно,

$$a = \frac{v^2}{R}.$$

Строго говоря, в правую часть формулы нужно было бы добавить безразмерный коэффициент пропорциональности. Однако расчёты показывают, что этот коэффициент равен единице.

Приведённая выше формула позволяет определить модуль ускорения. Поскольку ускорение — величина векторная, оно характеризуется не только числовым значением, но и направлением. Куда же оно направлено при равномерном движении по окружности? Понятно, что не в ту же сторону, что и скорость (это привело бы к её увеличению, и движение перестало бы быть равномерным), но и не в противоположную сторону (тогда скорость уменьшалась бы, и движение снова перестало бы быть равномерным). Ускорение тела в данном случае всё время направлено под прямым углом к вектору скорости,



Радян — центральный угол окружности, «вырезающий» из неё дугу, равную длине радиуса этой окружности. Радян приблизительно равен 57°17'45". В томе «Физика» везде используется радианная мера угла, кроме случаев, оговоренных особо.

РАСЧЁТ ЦЕНТРОСТРЕМИТЕЛЬНОГО УСКОРЕНИЯ

Радиус-вектор частицы может быть представлен следующим образом:

$$\vec{r} = x\vec{i} + y\vec{j},$$

где $\vec{i}$ и $\vec{j}$ — единичные векторы, задающие направления координатных осей.

При равномерном движении по окружности

$$x = r \cos \alpha = r \cos \omega t, \quad (1)$$

$$y = r \sin \alpha = r \sin \omega t. \quad (2)$$

Чтобы узнать ускорение, представим его сначала в виде:

$$\vec{a} = a_x \vec{i} + a_y \vec{j}. \quad (3)$$

Найдём проекции ускорения a_x и a_y , дважды продифференцировав соотношения (1) и (2); после первого раза определим скорость, после второго — ускорение:

$$a_x = -r\omega^2 \cos \omega t = -\omega^2 x,$$

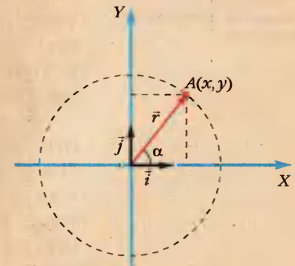
$$a_y = -r\omega^2 \sin \omega t = -\omega^2 y.$$

Подставив эти выражения в формулу (3), легко убедиться в том, что

$$\vec{a} = -\omega^2 \vec{r}.$$

Отсюда видно, что ускорение при равномерном движении по окружности направлено в сторону, противо-

положную радиус-вектору, т. е. к центру, вокруг которого происходит движение. Поэтому такое ускорение и называют центростремительным.





РАЗЛОЖЕНИЕ УСКОРЕНИЯ ПО ЕСТЕСТВЕННЫМ ОСЯМ

Рассмотрим движение частицы по произвольной криволинейной траектории. Пусть в данный момент времени частица находится в точке A этой траектории. По одну сторону от A расположим точку B , по другую — C . Все три точки принадлежат некоторой плоскости. При приближении точек B и C к A ориентация плоскости будет изменяться, стремясь к некоторому пределу. Плоскость, получающаяся в пределе бесконечно близкого расположения точек, называют *соприкасающейся плоскостью* кривой в точке A . Именно в этой плоскости лежит вектор ускорения, с которым движется частица по криволинейной траектории.

Проведём в соприкасающейся плоскости две оси: одну ось — по касательной к кривой в точке A , вторую — перпендикулярно к ней. Разла-

гая вектор ускорения по этим двум направлениям, получим:

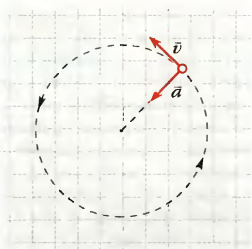
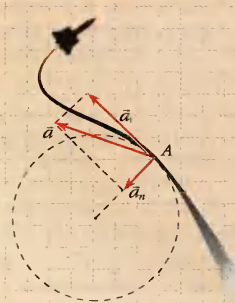
$$\vec{a} = \vec{a}_\tau + \vec{a}_n.$$

Такое разложение и есть разложение ускорения по естественным осям. Вектор $\vec{a}_\tau$ называется *касательным* (или *тангенциальным*) ускорением. Оно характеризует быстроту изменения модуля скорости. При увеличении скорости касательное ускорение направлено в ту же сторону, что и скорость, а при её уменьшении — в противоположную. Вектор $\vec{a}_n$ называется *нормальным* ускорением. Оно характеризует быстроту изменения направления вектора скорости и всегда направлено к центру кривизны данной траектории. Модуль нормального ускорения равен отношению квадрата скорости к радиусу кривизны траектории: $a_n = v^2/R$.

Если $\vec{a}_n = 0$, то направление скорости остаётся неизменным, и, следовательно, движение является прямо-

линейным. Таково, в частности, равноускоренное прямолинейное движение.

Если $\vec{a}_\tau = 0$, то модуль скорости остаётся неизменным, и потому движение является равномерным. Примером такого движения служит равномерное движение по окружности (в этом случае нормальное ускорение называют *центростремительным*).



При равномерном движении по окружности ускорение направлено к её центру.

а именно к центру окружности, по которой движется тело.

Данное обстоятельство помогло установить причину обращения Земли (а также других планет) вокруг Солнца. До Галилея и Ньютона эта причина (сила) связывалась со скоростью тела. Но смотреть в направлении движения Земли бесполезно. Ничего особенного мы там не увидим. Если же связать силу с ускорением и посмотреть в сторону ускорения нашей планеты, можно увидеть там Солнце. Поэтому именно Солнце естественно считать тем источником силы, который заставляет двигаться Землю.

Увидеть ускорение в равномерном круговом движении удалось Ньютону (и независимо от него Гюйгенсу). Однажды Ньютон понял, что такие, казалось бы, разные движения, как обращение небесного тела Луны вокруг Земли и падение самого обычного яблока на землю, по сути своей сходны. И то и другое совер-



шается с ускорением, направленным вертикально вниз (к центру земного шара). Установив данный факт, Ньютон понял, что и у того и у другого движения должна быть одна причина. На этом пути Исаак Ньютон и пришёл к открытию закона всемирного тяготения.



ДИНАМИКА МАТЕРИАЛЬНОЙ ТОЧКИ

ДИНАМИКА ДО НЬЮТОНА

В 335 г. до н. э. отец-основатель физики Аристотель создал собственную научную школу — Ликей, — которой руководил почти до самой смерти. Именно здесь были написаны его знаменитые лекции по физике; в них впервые появилось новое понятие «динамис» — «сила». Теперь раздел механики, изучающий влияние сил на движение тел, называют *динамикой*.

прямолинейные движения тяжёлых тел (земли, воды) вниз и лёгких тел (огня, воздуха) вверх. Эти движения,



ЧЕМУ ЖЕ УЧИЛ АРИСТОТЕЛЬ?

«Всякое движение, — писал Аристотель, — бывает или насильственным, или происходящим по природе». К последним он относил круговые движения небесных светил, а также



Полковник Краус фон Шиллергут провозгласил:
— Когда кончился бензин, автомобиль вынужден был остановиться. Это я сам
вчера видел. А после этого ещё болтают об инерции, господа!.. Ну не смешно ли?

(Из книги Я. Гашека «Похождения бравого солдата Швейка».)

АРИСТОТЕЛЬ ОБ УСТРОЙСТВЕ ВСЕЛЕННОЙ

Вселенная конечна и имеет наиболее симметричную (и совершенную) форму — форму сферы. У всякой сферы есть центр — единственная точка, выделенная своим особым местоположением среди всех остальных точек Вселенной. Поэтому естественное движение тел может происходить либо по окружности вокруг такого центра, либо по радиальным направлениям. «Простыми, — писал Аристотель, — являются только эти два движения по той причине, что и среди величин простые также только эти: прямая и окружность». Из двух названных движений «круговое движение по необходимости должно быть первичным. В самом деле, законченное по природе первично относительно незаконченного. Между тем круг — нечто законченное, чего нельзя сказать ни об одной прямой». Именно по кругу и движутся небесные тела.

Если бы Вселенная была бесконечной, то в ней не оказалось бы «ни центра, ни края, ни верха, ни низа, там у тел не может быть и никакого [определённого] места, [куда направлены] перемещения. Если же его нет, то не может быть и движения». Но движения есть, и мы их наблюдаем. Значит, «тело Вселенной не бесконечно».

Что находится в центре Вселенной? Поскольку естественное движение тяжёлых тел должно быть направлено к нему, а мы видим, что такие тела падают вниз, на Землю, то, следовательно, именно Земля и располагается в центре мира.

Есть, правда, люди, сомневающиеся в верности данного вывода и считающие, что Земля находится на некотором расстоянии от центра мира. Но «надо отличаться, вероятно, весьма беспечным образом мыслей, чтобы не удивляться, как же это возможно, чтобы, в то время как маленькая часть земли, если её поднять и отпустить, движется и никогда не остаётся на месте (и причём движется тем быстрее, чем она больше), вся Земля, если бы её подняли и отпустили, не двигалась. А между тем так оно и есть: столь огромная тяжесть пребывает в покое!».

считал Аристотель, присущи самим телам, и, будучи естественными, они не нуждаются в каких-либо внешних причинах.

Если какое-либо движение отличается от естественного, то оно может быть осуществлено лишь насильственным путём. В отношении таких движений Аристотель писал: «Всё движущееся необходимо приводится в движение чем-нибудь». Иными словами, причина «нестественного» движения — сила, действующая со стороны других тел. Нет силы — нет движения. В современных обозначениях основной закон динамики Аристотеля может быть представлен в виде:

$$F = k \frac{S}{t} \text{ или } F = kv,$$

где F — сила, приложенная к телу, $v = S/t$ — скорость тела, k — постоянный для каждого тела коэффициент, пропорциональный весу данного тела.

Конечно, сам Аристотель подобных формул никогда не записывал. И не только потому, что тогда не существовало используемой ныне символики, но и из-за отсутствия чётко определённых физических понятий. Даже такое «простое» понятие, как скорость, ещё не имело строгого определения. Под скоростью Аристотель понимал «быстроту» движения. «Быстрое, — писал он, — есть далеко продвигающееся в течение малого времени, медленное же — малопродвигающееся в течение большого времени».

Взгляды Аристотеля на движение тел соответствовали логике геоцентрической картины мира, а также существовавшей в то время уровню техники и средств передвижения, когда движущая сила создавалась животными или рабами. Практика их использования говорила, например, о том, что для перемещения телеги нужна лошадь. Если лошадь будет тянуть с постоянной силой, телега будет двигаться с постоянной



скоростью. Для перевозки вдвое более тяжёлого груза или для вдвое более быстрого движения требовалось и двойное количество животных.

ПОЧЕМУ ЛЕТИТ СТРЕЛА?

Самой сложной задачей для динамики Аристотеля оказалось движение брошенного тела: «Раз всякий движущийся предмет, который не движет сам себя, приводится в движение чем-нибудь иным, то спрашивается: как некоторые предметы движутся непрерывно без соприкосновения с движущим, например тела брошенные?». Почему летит выпущенная из лука стрела? Согласно Аристотелю, полёт её обусловлен действием воздуха, который был приведён в движение отпущенной тетивой и самой стрелой.

Аристотель и не подозревал, что это объяснение окажется одним из самых уязвимых в его теории. «Если мы говорим, — замечает комментатор его трудов Симплиций (VI в.), — что человек, запускающий снаряд, сообщает воздуху постоянное движение, почему бы нам не сказать, что это движение сообщено снаряду, не обращаясь к воздуху?»

Ещё более сильный удар по воззрениям Аристотеля нанёс в 517 г.



греческий философ и богослов Иоанн Филопон (V—VI вв.) в своём комментарии к «Физике». «Если движение обязано давлению воздуха на обратную сторону тела, то заострённая с хвоста стрела должна была бы лететь медленнее, чем незаострённая. В действительности же происходит как раз обратное. Почему? И почему камень можно бросить дальше, чем перо?» Продолжая рассуждения, Филопон отмечал: «И далее, если тетива и стрела или рука и камень непосредственно соприкасаются, какой же воздух позади снаряда будет

ПОЧЕМУ КАМЕНЬ ЛЕТИТ ДАЛЬШЕ, ЧЕМ ПЕРО?

Если же кто-нибудь спросит, почему я бросаю камень дальше, чем перо, и почему железо или свинец забрасывается моей рукой дальше, чем такой же кусок дерева, я отвечаю, что причина этого заключается в том, что... насколько больше имеется материи, настолько же больше напора (impetus) может получить тело. А в плотном и тяжёлом теле содержится, при прочих равных условиях, больше первичной материи, нежели в редком и лёгком. Поэтому плотное и тяжёлое тело получает большее количество этого напора, точно так же, как железо может получить больше тепла, чем такое же количество дерева... В этом также заключена причина, почему труднее остановить быстро движущийся большой точильный камень, чем маленький; очевидно, оттого, что в большем, при прочих равных условиях, содержится больше напора.

(Ж. Буридан.)





приведён в движение? А если будет приведён в движение воздух сбоку, какое отношение имеет он к брошенному телу, не находясь на его пути? Из этих и подобных соображений видно, что невозможно, чтобы

предметы, двинутые силой, стали двигаться таким способом. Вернее, должно быть, что бросающий сообщает брошенному предмету некую бестелесную кинетическую мощь, а воздух, который он толкает, ниче-

ИМПЕТУС И ПУШЕЧНОЕ ЯДРО

В Средние века теория импетуса (внутренней силы) широко применялась для объяснения движения каменных и пушечных ядер. Философ, учёный-энциклопедист, врач и писатель, живший в Средней Азии и Иране, Абу Али ибн Сина (латинизированное имя Авиценна; около 980—1037), считал, что ядро, приобретя внутреннюю силу от метательной машины, движется вначале по прямой линии. Это движение продолжается до тех пор, пока соприкоснувшись ядру импетус полностью не израсходуется. Оно на мгновение останавливается, после чего естественная тяжесть ядра заставляет его падать вертикально вниз.

В XIV в. ученик Жана Буридана Альберт Саксонский предложил теорию, которая более точно описывала траекторию пушечного ядра. В соответствии с ней полёт ядра включает три фазы движения. Сначала сообщённый ядру импетус заставляет его двигаться в том направлении, в котором был произведён выстрел (первая фаза). Затем импетус начинает осла-

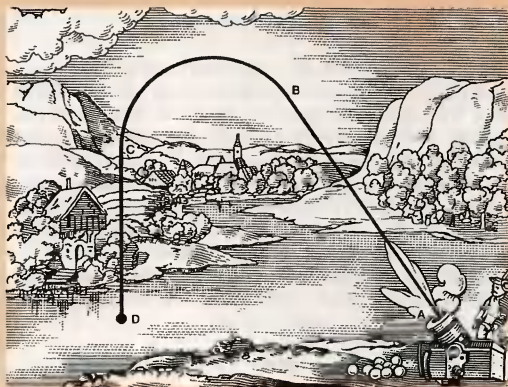
бевать, и собственная тяжесть ядра заставляет его всё сильнее и сильнее отклоняться от первоначального направления движения вниз; траектория движения на этом участке принимает искривлённую форму (вторая фаза). Наконец, когда начальный импетус оказывается полностью израсходованным, ядро падает вертикально вниз (третья фаза). Каждую из этих фаз движения можно обнаружить на старинной гравюре, иллюстрирующей полёт пушечного ядра, как его представляли себе средневековые военные инженеры.

Следующий шаг в развитии теории полёта пушечных ядер был сделан итальянским математиком и механиком Никколо Тарталья (около 1499—1557). В 1531 г. к нему обратился старый друг-артиллерист: «Под каким углом следует поставить ствол пушки, чтобы она стреляла как можно дальше?». Заинтересовавшись этим вопросом, Тарталья, сам никогда ранее не стрелявший, после «изрядного размышления» пришёл к выводу, что угол должен составлять 45° . Дав такой ответ, учёный, однако, не привёл каких-

либо доказательств. Вместо этого, как он сам пишет, видя сомнения своего друга, «несколькими частными опытами полностью удостоверился, что так оно и есть».

В 1537 г. вышла книга Тарталья «Новая наука». Первые две части этой работы были посвящены движению снарядов. Но более важные результаты (основанные на тщательных наблюдениях) сформулированы им в следующей, вышедшей спустя девять лет книге «Проблемы и различные изобретения. Именно здесь он впервые отказался от существования прямолинейного участка траектории пушечного ядра, о котором ранее говорили все последователи теории импетуса. «Насильственное движение тела постоянного веса, брошенного не перпендикулярно к горизонту, никогда не имеет ни одной части, которая была бы совершенно прямой», — категорически заявил Тарталья.

Потребовалось, однако, ещё сто лет, прежде чем удалось установить форму этой траектории на основе динамических представлений, развитых Галилео Галилеем.



Так представляли себе траекторию движения пушечного ядра в эпоху Возрождения. Старинная гравюра.



Никколо Тарталья. Гравюра. XVI в.



го не привносит или [привносит] очень мало в это движение».

В средневековой литературе внутренняя сила, сообщаемая брошенному телу («бестелесная кинетическая мощь», по Филопону), получила название «импетус» (*лат.* «стремление вперёд», «напор», «натиск»). Особенно широко это понятие распространилось благодаря работам французского учёного, ректора Парижского университета Жана Буридана (около 1300 — около 1358). Проанализировав задачу о брошенном теле в трактате под названием «Вопросы к восьми книгам „Физики“ Аристотеля», он сразу же заявил: «Аристотель, как мне кажется, неправильно решил эту задачу». Повторив далее некоторые из аргументов Филопона и добавив к ним собственные (в частности, о том, что запущенный вращающийся волчок или точильный камень движется, не покидая своего места, и потому их движение не может быть объяснено действием воздуха), Буридан сделал вывод: «Поэтому, как мне представляется, необходимо сказать, что движитель, приводя в движение перемещающееся тело, внедряет в него определённый напор (*impetus*) или некую присущую перемещающемуся телу двигательную силу, действующую в том же направлении, в каком движитель двигал перемещённое тело». По мнению Буридана, этот напор в теле по мере его движения «непрерывно уменьшается сопротивляющимся воздухом» и «движение камня постепенно замедляется», так что в конце концов «тяжесть камня одерживает верх и направляет камень в его естественное место».

Идея импетуса сыграла важную роль в развитии физических представлений и в определённой степени предвосхитила такие фундаментальные понятия современной физики, как импульс и кинетическая энергия.

Между тем развитие военной техники требовало умения рассчитывать

траектории артиллерийских снарядов. Механика Аристотеля в этом отношении оказалась бесполезной. К тому же гелиоцентрическая картина мира Коперника лишила её всякой основы. Нужно было совершить качественный скачок в системе динамических представлений и способов описания движения тел, понять, что без опоры на эксперимент и широкое использование математики дальнейшее развитие физики невозможно. Первым, кто осознал это в полной мере, был итальянский учёный Галилео Галилей (1564—1642). По его словам, «книга природы написана математическими знаками», и в механике, как и в других науках, в которых для объяснения законов природы применяются математические доказательства, основные принципы должны подтверждаться «опытом, воспринимаемым чувствами».

ДИНАМИКА ГАЛИЛЕЯ

В 1638 г. вышла в свет книга Галилея «Беседы и математические доказательства, касающиеся двух новых наук, механики и местного движения». Сам автор считал её шедевром. В ней он подводил итоги более чем 40-летних исследований в области изучения механических свойств тел («механики») и перемещений их из одного места в другое («местного движения»). Понимая, что его труд открывал новую страницу в физике, Галилей торжественно провозгласил: «Мы создаём совершенно новую науку, предмет которой является чрезвычайно старым. В природе нет ничего древнее движения, но именно относительно него философами написано весьма мало значительного. Поэтому я многократно изучал на опыте его особенности, вполне этого заслуживающие, но до сего времени либо неизвестные, либо недоказанные». Правда, отмечает Галилей, некоторые положения уже были



Галилео Галилей.
Гравюра.

Г. Галилей. «Беседы и математические доказательства, касающиеся двух новых наук, механики и местного движения». Титульный лист. Лейден. 1638 г.





выдвинуты другими, например Аристотелем, однако «его рассуждения не принадлежат к числу удачных».

К тому времени прошло уже почти 2 тыс. лет с тех пор, как Аристотель сформулировал свой закон о пропорциональности скорости движения тела действующей на него силе. И лишь теперь, спустя 19 веков, Галилей открыл *движение по инерции*, полностью перечеркнув тем самым основные представления динамики Аристотеля. «Когда тело, — писал Галилей, — движется по горизонтальной плоскости, не встречая никакого сопротивления движению, то... движение его является равномерным и продолжалось бы бесконечно, если бы плоскость простиралась в



ОПЫТ С ЖЁЛОБОМ

Вот как сам Галилей описал свой опыт: «Вдоль узкой стороны линейки или, лучше сказать, деревянной доски, длиною около двенадцати локтей... был прорезан канал шириною немного больше одного дюйма. Канал этот был прорезан совершенно прямым и, чтобы сделать его достаточно гладким и скользким, оклеен внутри возможно ровным и полированным пергаментом; по этому каналу мы заставляли падать гладкий шарик из твердейшей бронзы... Сравнивая время прохождения всей линейки со временем прохождения половины, двух третей, трёх четвертей или любых иных частей её и повторяя опыты сотни раз, мы постоянно находили, что отношение пройденных путей равно отношению квадратов времени их прохождения при всех наклонх плоскости, т. е. канала, по которому скользил шарик... Что касается способа измерения времени, то мы пользовались большим ведром, наполненным водою и подвешенным наверху; в дне ведра был проделан узкий канал; через этот последний вода изливалась тонкой струйкой и собиралась в маленьком бокале в течение всего того времени, как шарик спускался по всему каналу или части его; собранные таким образом количества воды каждый раз взвешивались на точнейших весах».



Наклонный жёлоб Г. Галилея.

пространстве без конца». В самом деле, «при движении по наклонной плоскости вниз наблюдается ускорение, а при движении вверх — замедление. Отсюда следует, что движение по горизонтали является неизменным, ибо... оно ничем не ослабляется, не замедляется и не ускоряется».

Таким образом, тело может двигаться и в отсутствие какой-либо внешней силы. Подобное движение называют движением по инерции. Согласно Галилею, внешним воздействием определяется не скорость тела (как считал Аристотель), а её изменение. «Степень скорости, обнаруживаемая телом, ненарушимо лежит в самой его природе, в то время как причины ускорения или замедления являются внешними», — подчёркивал учёный.

ГАЛИЛЕЙ О СВОБОДНОМ ПАДЕНИИ

Вместе с тем для Галилея так и остались загадкой причины падения тел. Ему не было известно о существовании всемирного тяготения, и он, хотя и использовал понятие «сила тяжести», вынужден был признать, что



что не понимает, «какой принцип и какая сила движет камень вниз... мы не знаем ничего, за исключением названия». «Мне думается, — писал Галилей, — что сейчас неподходящее время для занятий вопросом о причинах ускорения естественного движения тел». Поскольку ему не удалось установить причину падения тел, он продолжал по-прежнему называть его «естественным». Однако уже сама постановка подобных во-просов означала, что появилась серьёзная «брешь в стенах крепости аристотелевой динамики».

Вместо того чтобы выяснить причины падения тел, Галилей предлагает рассмотреть закономерности, которым оно подчиняется. Он сразу же выдвинул гипотезу: движение падающих тел является *равноускоренным*, т. е. таким, при котором их скорость за равные промежутки времени изменяется на одну и ту же величину.

Чтобы проверить, так это на самом деле или нет, Галилей, не имея возможности измерить непосредственно скорость, решил поступить следующим образом. Сначала он теоретически доказал, что при любом равноускоренном движении пройденный телом путь из состояния покоя пропорционален квадрату времени движения:

$$s \sim t^2.$$

Верно и обратное: любое движение, подчиняющееся данному закону, является равноускоренным. Поэтому остаётся лишь доказать, что при свободном падении $s \sim t^2$.

Однако проверить эту закономерность в опытах с падающими телами Галилей не мог: слишком быстро происходит падение. Тогда, чтобы увеличить время движения, он провёл опыт с наклонным желобом.

Путь, который шарик проходил в процессе движения по наклонной плоскости, оказывался пропорциональным квадрату времени движения. Это означало, что данное дви-

жение является равноускоренным. Однако свободное падение, согласно Галилею, можно рассматривать как предельный случай движения по наклонной плоскости, когда угол её наклона стремится к 90°. Отсюда он заключил: свободное падение также является равноускоренным.

Аристотель утверждал, что тяжёлые тела падают быстрее лёгких. Галилей с помощью остроумных рассуждений опроверг его и пришёл к иному выводу: в пустом пространстве (когда нет сопротивления воздуха) все тела должны падать одинаково быстро. Опыты с ядрами, сброшенными с «Падающей башни» в Пизе, подтвердили этот вывод. Осуществлял ли опыты непосредственно сам



«Падающая башня»
в Пизе. Италия.
XII—XIV вв.

КАКИЕ ТЕЛА ПАДАЮТ БЫСТРЕЕ?

(Галилей против Аристотеля)

Аристотель. Тела различного веса движутся в одной и той же среде с различными скоростями, которые относятся между собой, как веса тел, так что, например, если одно тело в десять раз тяжелее другого, то и падать оно будет в десять раз быстрее.

Галилео Галилей. Во-первых, я сильно сомневаюсь, чтобы Аристотель видел на опыте справедливость того, что два камня, из которых один в десять раз тяжелее другого, начавшие одновременно падать с высоты, предположим, ста локтей (мера длины, равная длине локтевой кости человека, около 38—46 см. — Прим. ред.), двигались со столь различной скоростью, что в то время как более тяжёлый достиг бы земли, более лёгкий прошёл бы всего 10 локтей... Да и без дальнейших опытов путём краткого, но убедительного рассуждения, мы можем ясно показать неправильность утверждения, будто тела более тяжёлые движутся быстрее, нежели более лёгкие. Предположим, что имеются два тела, естественные скорости падения которых различны, и соединим движущееся быстрее с движущимся медленнее. Тогда движение тела, падающего быстрее, несколько задержится, а движение другого несколько ускорится. Если большой камень движется, скажем, со скоростью в восемь «градусов», тогда как другой, меньший, — со скоростью в четыре «градуса», то, соединяя их вместе, мы должны получить скорость, меньшую восьми «градусов»; однако два камня, соединённые вместе, составляют тело, большее первоначального, которое имело скорость в восемь «градусов»; следовательно, выходит, что составное тело (которое тяжелее одного первого) будет двигаться медленнее, нежели одно первое, которое, однако, легче, а это противоречит исходному предположению. Отсюда следует, что тела большие и малые, имеющие одинаковый удельный вес, движутся с одинаковой скоростью.

(По книге Г. Галилея «Беседы и математические доказательства, касающиеся двух новых наук, механики и местного движения». 1638 г.)



Галилей, точно неизвестно. В своей книге он говорил лишь, что «опыт показывает нам, что два шарика одинаковой величины, из коих один весит в десять или двенадцать раз более другого (а такое отношение веса существует, например, у шариков из свинца и дуба), достигают земли при падении с высоты от 150 до 200 локтей с самой незначительной разницей в скорости».

ГАЛИЛЕЙ О ДВИЖЕНИИ БРОШЕННЫХ ТЕЛ

Рассмотрев прямолинейное движение тел, Галилей обратился к изучению движения тел по кривой линии. При этом движение тела, брошенного в горизонтальном направлении, он представлял состоящим из «равномерного беспрепятственного движения» по горизонтали и «равномерно ускоренного движения» вниз, вызванного силой тяжести. Таким образом Галилей ввёл новый закон — *принцип сложения движений*.

Это позволило учёному решить основную задачу баллистики: он установил вид траектории тела, брошенного под углом к горизонту. Оказалось, что в отсутствие сопротивления воздуха тело будет двигаться по *параболе*. Правда, писал Галилей, и до него было замечено, «что бросаемые тела или снаряды описывают некоторую кривую линию, но того, что линия эта является параболой, никто не указал». Он доказал, что если бросать тело с одной и той же скоростью под разными углами, то «наибольшую дальность полёта... мы получим при наклоне, равном половине прямого угла». Один из участников «Бесед» Галилея по этому поводу заметил: «Удивительна и вместе с тем восхитительна сила убедительности доказательств, которая присуща одной лишь математике. Я уже был знаком со слов опытных бомбардиров с тем фактом, что из всех



выстрелов, при которых снаряды выпускаются из пушек или мортир, наиболее дальнбойным, т. е. переносщим снаряд на наибольшее расстояние, является тот, который производится при угле, равном половине прямого, или, как они говорят, при шестом пункте угламера. Но понимание причины, по которой это происходит, даёт неизмеримо больше, чем простое показание других лиц или даже многократно повторяемый опыт». «Ваше замечание, синьор, совершенно справедливо, — ответил ему другой участник „Бесед“». — Познание причины одного только явления даёт возможность нашему уму постичь и установить другие явления без необходимости прибегать к помощи опыта».

Так пришло осознание ценности теории — наука стала обладать предсказательной силой. «Только теперь, — написал Галилей, — открылись двери для новых исследований, которые могут иметь результатом множество новых удивительных заключений и выводов, если в будущем этим предметом займутся другие учёные».

Увидеть свою книгу великому мыслителю так и не довелось. К тому времени, когда она была издана, 74-летний Галилей полностью ослеп. Он сознавал, что написанный им

В своих «Беседах» Галилей немного скитрил. На самом деле при стрельбе из пушек максимальная дальность достигается при угле, меньшем 45°: сказывается сопротивление воздуха. Это было известно «опытным бомбардирам».



труд — только начало. Этим сочинением, отмечал он, «будут проложены пути для создания новой обширной и чрезвычайно важной науки, начальные основы которой заложены в настоящей работе и погрузиться в глубокие тайны которой предоставляется пытливым умам последующих учёных». Пророческие слова Галилея стали своеобразным завещанием тем, кто пришёл ему на смену.

ДИНАМИКА ПОСЛЕ ГАЛИЛЕЯ

Краеугольным камнем новой динамики, которая сменила теорию Аристотеля, стал закон инерции. Представления Галилея об инерции были ограничены. Слишком сильное влияние ещё оказывала школа Аристотеля, и потому он не сумел вполне освободиться от идеи разделения движений на два вида — естественного и насильственного. Движение по инерции Галилей мыслил только происходящим вдоль сферической поверхности Земли, а не прямолинейным в свободном пространстве. Естественное движение небесных тел по-прежнему могло быть лишь круговым, хотя и не обязательно вокруг центра мира (где, по его мнению, находилось Солнце), но и вокруг рядовых планет. Галилей освободился от многих представлений Аристотеля, однако ещё не пришёл к той картине мира, которая была бы полностью свободна от них.

Между тем первая формулировка закона инерции появилась уже через два года после смерти Галилея, в 1644 г. Её автором был французский философ, математик и естествоиспытатель Рене Декарт (1596—1650). Согласно Декарту, «если тело пришло в движение, уже этого достаточно, чтобы оно его продолжало с той же скоростью и в направлении той же прямой линии, пока оно не будет остановлено или отклонено какой-либо другой причиной».

Введя понятие *импульса* (от лат. *impulsus* — «удар», «толчок»), или *количества движения*, которое, по Рене Декарту, есть «произведение величины тела на скорость его движения», французский учёный предложил первую теорию столкновений тел. Не усмотрев, правда, векторный характер этого понятия, он пришёл к неверным выводам, противоречившим экспериментальным данным. Впрочем, его самого это нисколько не смутило: он всё равно продолжал считать все свои доказательства абсолютно «достоверными». Пусть «опыт и показал обратное, однако мы вынуждены верить больше нашему разуму, нежели нашим чувствам», заметил Декарт после изложения теории.

В 1666 г. проблемой столкновения тел заинтересовалось Лондонское королевское общество. Считая, что решение данной проблемы поможет установить законы движения тел, оно объявило конкурс на лучшую работу, посвящённую этой теме. В нём приняли участие математик Джон Уоллис (1616—1703), английский архитектор, математик и астроном Кристофер Рен (1632—1723) и нидерландский естествоиспытатель, в то время работавший в Париже, Христиан Гюйгенс (1629—1695). В ходе их исследований впервые были рассчитаны скорости тел после соударения и установлен векторный характер понятия импульса. Закон сохранения импульса также нашёл убедительное обоснование.

Новые динамические представления стали показывать свою практическую ценность. Хотя до завершения начатого Галилео Галилеем было ещё далеко, все понимали, что эра Аристотеля подошла к концу.

Рене Декарт. Гравюра.





ДИНАМИКА НЬЮТОНА

«Ньютон заставил физику мыслить по-своему, „классически“, как мы выражаемся теперь. На языке Ньютона мы думали и говорили, и только теперь делаются попытки изобрести новый язык. Вот почему можно утверждать, что на всей физике лежал индивидуальный отпечаток его мысли: без Ньютона наука развивалась бы иначе».

С. И. Вавилов.
«Исаак Ньютон»

Рождение новой науки, основы которой были заложены Галилеем, происходило на фоне острейшей борьбы с противниками метода, избранного итальянским учёным. Многие естествоиспытатели в то время считали, что главным вопросом физики должен быть вопрос «почему?». Галилей же считал более важным установление того, как происходят те или иные явления. Умозрительным гипотезам древних он предпочёл анализ опытных фактов на языке математики.

Противником Галилея выступил французский учёный Рене Декарт. Ознакомившись с трудами итальянского физика, он подверг их резкой критике. «Всё, что он говорит о скорости тел, которые падают в пустом пространстве и т. д., — писал Декарт Марену Мерсенну, — не имеет под собой основания, ибо он должен был прежде определить, что есть тяжесть; и если бы он имел о ней верные знания, то он уже знал бы, что её в пустом пространстве вовсе нет». Вся Вселенная, по мысли Декарта, заполнена вихрями тонкой материи; их действием и обусловлена тяжесть тел.

Наука оказалась на распутье. В каком направлении следовало двигаться дальше: по пути умозрительных и подчас фантастических гипотез, подобных вихрям Декарта, якобы объясняющим причины всех явлений во Вселенной, или по пути установления математических законов, описывающих поведение реальных тел? Английский поэт Александр Поп в последствии написал так:

*Был этот мир глубокой тьмой
окутан.
Да будет свет! И вот явился
Нью́тон.*

По словам знаменитого английского астронома сэра Уильяма Гершеля, «эра полной зрелости человеческого ума началась с Ньютона». После того как Исаак Ньютон (1643—1727) произнёс свою историческую фразу: «Hypotheses non fingo» (лат. «гипотез не измышляю»), выбор был сделан, причём выбор окончательный и бесповоротный.

В 1684 г. Ньютон пообещал астроному Эдмунду Галлею изложить свои взгляды на движение тел, которые, как он потом скажет, «вполне достаточны для объяснения всех движений небесных тел и моря». До него никому не удалось объяснить законы движения планет на основе чётких математических принципов. Правда, попытки такого объяснения уже предпринимались некоторыми учёными, в том числе и самим Галлеем, однако к успеху они не привели.

Ньютон, начав с небольших «заметок о движении», написанных им через силу, только под давлением Галлея, постепенно увлёкся, и вскоре скромное сочинение стало превращаться в главную книгу его жизни. Учёный поставил перед собой грандиозную цель — разработать «учение о строении системы мира» и присво-



Эдмунд Галлей.





ил книге название «Philosophiae naturalis principia mathematica» (что в переводе с латинского означает «Математические начала натуральной философии» или «Математические основы естествознания»).

Работа над книгой буквально преобразила Ньютона. Ни разу ещё он не испытывал такого воодушевления, когда вдруг понял, что ему удалось найти то минимальное количество фундаментальных законов природы, на основе которых можно объяснить все явления, связанные с движением тел, начиная от маленького камешка и кончая гигантскими небесными телами. У него даже почерк изменился, столь велико было впечатление от того, что он сумел сделать.

В 1686 г. Ньютон полностью завершил работу над рукописью, и в следующем году его книга была издана на деньги Эдмунда Галлея.

«СОЗДАНИЕ ЯЗЫКА И МЕТОДА МЕХАНИКИ»

Вначале, по-видимому, лишь немногие понимали значение совершившегося события. Один из кембриджских учёных, получивший в подарок труд Ньютона, скептически заметил, перелистав страницы, что «надо лет семь учиться, прежде чем поймёшь что-нибудь в этих „Началах“».

Постепенно, однако, всё большее и большее число учёных стало осознавать, что в науке произошёл переворот. Уже в предисловии ко второму изданию «Математических начал...» (1713 г.) появились восторженные слова издателя: «Едва ли можно передать словами, сколько света, сколько величия в этом превосходном сочинении нашего знаменитейшего автора. Его величайший и счастливейший гений разрешил такие труднейшие задачи и достиг до таких пределов, что не было и надежды, что человеческий ум в состоянии до них возвыситься».

Новая наука требовала нового языка и нового метода. Ньютон создал его. Каждый учёный, по его мнению, должен строить свои умозаключения по совершенно определённым правилам. Обсуждая их, великий мыслитель подчеркнул, что «свойства тел познаются не иначе, как с помощью экспериментов», причём «в противность ряду опытов не следует измышлять на авось каких-нибудь бреден». Основная задача естествознания, согласно Ньютону, состоит в том, чтобы «по явлениям движения распознать силы природы, а затем по этим силам объяснять остальные явления», к тому же «описать явления природы с помощью законов математики».

Чтобы навсегда покончить с существовавшей ранее терминологической путаницей, Ньютон начал свою



Исаак Ньютон.
Открытие. Франция.
Конец XIX в.

ЭЙНШТЕЙН О МЕТОДЕ НЬЮТОНА

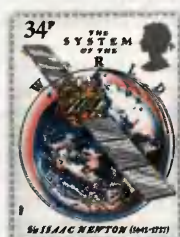
Ньютон знал слабости построенной им системы лучше, чем последующие поколения учёных. Это обстоятельство всегда вызывало во мне чувство почитательного удивления...

1. Хотя всюду заметно стремление Ньютона представить свою систему как необходимо вытекающую из опыта и вводить возможно меньше понятий, не относящихся непосредственно к опыту, он тем не менее вводит понятия абсолютного пространства и абсолютного времени. В наше время это ему часто ставили в упрёк. Но именно в этом пункте Ньютон особенно последователен. Он обнаружил, что наблюдаемые геометрические величины (расстояния между материальными точками) и их изменения во времени в физическом смысле не характеризуют полностью движения. Это положение он доказывает своим знаменитым опытом с ведром. Следовательно, кроме масс и изменяющихся во времени расстояний между ними, существует ещё нечто, что определяет происходящие события; это «нечто» он воспринимал как отношение к «абсолютному пространству». Ньютон понимал, что его законы могут иметь смысл, только если пространство обладает физической реальностью в той же мере, как материальные точки и расстояния между ними...

2. Введение мгновенно действующих на расстоянии сил для представления гравитационных эффектов не соответствует характеру большинства явлений, знакомых нам из повседневного опыта. Ньютон предупреждает эти возражения, указывая, что на его закон следует смотреть не как на окончательное объяснение, а как на выведенное из опыта правило.

3. Учение Ньютона не давало никакого объяснения тому в высшей степени замечательному факту, что вес и инерция тела определяются одной и той же величиной (массой). Достопримечательность этого факта также не ускользнула от Ньютона.

Эти замечания лишь... выражают неутолённое желание научного духа, борющегося за всеохватывающее проникновение в явления природы...



Серия марок, выпущенная в Великобритании к 300-летию «Математических начал...» И. Ньютона.

книгу с определений основных понятий механики: массы, количества движения, силы и т. д. Затем он сформулировал «аксиомы или законы движения»; на их основе доказывались многочисленные следствия и теоремы. В этой же книге впервые дан закон всемирного тяготения и подробно рассматривается теория движения небесных тел.

Под *массой* Ньютон понимает «тело» или «количество материи». Последнее, согласно Ньютону, «есть мера таковой, происходящая от её плотности и объёма».

Впоследствии в основу определения массы был положен способ её измерения, описанный Ньютоном в пояснении к своему третьему закону. Рассмотрев столкновение двух тел, он указал, что полученные ими изменения скоростей «будут обратно пропорциональны массам тел». Следовательно, приняв массу какого-либо тела за эталон (в Международной системе единиц — 1 кг), можно по результатам взаимодействия с ним найти массу других тел. Определённая таким образом масса выступает как количественная мера инертности тела. Иными словами, чем больше масса тела, тем более оно инертно, т. е. тем меньше изменяется его скорость при взаимодействии с выбранным эталоном.

После массы Ньютон определил *количество движения* — понятие, введённое ещё Декартом и именуемое в настоящее время *импульсом*. Согласно Ньютону, «количество движения есть мера такового, устанавливаемая пропорционально скорости и массе». Иными словами, импульс — это произведение массы тела на его скорость:

$$\vec{p} = m\vec{v}.$$

Силу учёный, в отличие от многих своих предшественников, рассматривал как нечто внешнее по отношению к телу, на которое она действует, а не как присущее ему внутреннее

свойство. Результатом действия силы, по Ньютону, является изменение состояния покоя или равномерного прямолинейного движения: «Сила проявляется единственно только в действии и по прекращении действия в теле не остаётся. Тело продолжает затем удерживать своё новое состояние вследствие одной только инерции».

Далее Ньютон остановился на анализе понятий *пространства, времени и движения*. Каждое из этих понятий, считал он, можно рассматривать как в относительном, так и в абсолютном смысле. Такое различие необходимо для «устранения неправильных суждений», которые могут иметь место, если эти понятия связать лишь с нашими ощущениями.

По теории Ньютона пространство и время, понимаемые абсолютно, существуют безотносительно к каким-либо реальным телам и движениям и не поддаются нашим чувствам. Абсолютное пространство есть то, что осталось бы во Вселенной, если бы все тела внезапно исчезли. Если бы абсолютного пространства не было, то осталась бы пустота, т. е. ничто. Но если все тела в реальном мире погружены в пустоту, то каким же образом передаётся тяготение? «Допустить, что... одно тело должно действовать на расстоянии через пустоту на другое без посредства чего-либо постороннего... — писал Ньютон, — есть для меня такая нелепость, что, полагая, в неё не впадёт ни один человек, способный к мышлению о философских вещах».

Поскольку существует абсолютное пространство, считал Ньютон, то должно существовать также абсолютное движение. «Абсолютное движение есть перемещение тела из одного абсолютного его места в другое». Именно такое движение учёный полагал истинным и хотел бы его исследовать. Однако, как он сам признавал, «распознавание истинных движений отдельных тел и точное их



разграничение от кажущихся весьма трудно, ибо части того неподвижного пространства, о котором говорилось и в котором совершаются истинные движения тел, не ощущаются нашими чувствами».

То, что человек не имеет средств для распознавания движения относительно абсолютного пространства, не означает, что их вообще не существует. На самом деле, думал Ньютон, они есть, но известны лишь Богу, которым заполнено абсолютное пространство («Бог пребывает всюду, так-

же и в вещах»). На фоне этого и развёртывается недоступная чувствам человека истинная картина движения.

Впрочем, отмечал Исаак Ньютон, установление такой картины — «дело не вполне безнадёжное», и приводил пример, в котором, по его мнению, обнаруживается именно истинное (т. е. абсолютное) движение. Это опыт с вращающимся ведром. При вращении ведра вокруг вертикальной оси поверхность воды искривляется и принимает «впалую форму». Искривление свободной

«Бог не существует в пространстве и времени, но сам своим существованием производит пространство и время».

И. Ньютон

НЬЮТОН О СЛОЖЕНИИ СИЛ

Во времена Ньютона понятия вектора ещё не существовало, но то, что силы складываются не так, как обычные числа, уже было известно. Трудно сказать, кто понял это первым, но наиболее чётко и обоснованно данный вопрос впервые был изложен именно Ньютоном.

Из теории столкновений, разрабатываемой сначала Рене Декартом, а затем Христианом Гюйгенсом, следовало: сила удара имеет определённое направление, в котором начинает двигаться после удара покоящееся тело. Этим представлением воспользовался и Ньютон. О величине силы F он судил по перемещению s , совершаемому телом после удара за данное время. Ведь чем больше сила, тем большая скорость сообщается телу при ударе, и потому тем больший путь оно пройдёт затем за данное время. В современных обозначениях соотношение можно записать так: $\vec{F} = k\vec{s}$, где k — некоторый коэффициент пропорциональности.

Исходя из этого, Ньютон сначала установил *правило сложения перемещений*: «При силах совокупных тело описывает диагональ параллелограмма в то же самое время, в течение которого оно описало бы стороны такового при раздельно действующих силах».

Для доказательства данного утверждения Ньютон рассмотрел тело в точке A , которое подвергается кратко-

временному воздействию сначала силы F_1 , действующей в направлении AB , затем в той же точке силы F_2 , действующей в направлении AC , а затем их одновременному воздействию в той же точке. (После каждого из этих воздействий тело считается движущимся по инерции.)

В первом случае тело перемещается в направлении действия силы F_1 и спустя некоторое время t достигнет прямой BD . Во втором случае тело перемещается в направлении действия силы F_2 и через то же самое время t достигнет прямой CD . Что будет, если обе силы действуют на рассматриваемое тело одновременно? Под действием первой силы тело начнёт перемещаться к линии BD ; причём вторая сила, параллельная этой линии, не сможет ни увеличить, ни уменьшить скорость их сближения. По той же причине первая сила никак не сможет повлиять на скорость приближения тела к прямой CD , обусловленного действием второй силы. Значит, тело должно одновременно достичь обеих этих линий, т. е. спустя время t оно должно оказаться в точке их пересечения D . Таким образом, при наличии обеих сил тело движется по диагонали параллелограмма, что и требовалось доказать.

Если воспользоваться современными обозначениями, то полученный результат можно представить в виде:

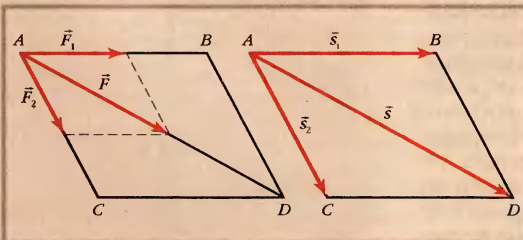
$$\vec{s} = \vec{s}_1 + \vec{s}_2, \quad (1)$$

где через $\vec{s}_1$, $\vec{s}_2$ и $\vec{s}$ обозначены векторы перемещений по направлениям AB , AC и AD соответственно.

«Отсюда, — писал Ньютон, — явствует составление силы, направленной по AD , из каких-либо двух сил AB и BD , наклонённых друг к другу». Действительно, поскольку каждое из перемещений в (1) пропорционально соответствующей силе, то, умножив последнее равенство на коэффициент пропорциональности, получим:

$$\vec{F} = \vec{F}_1 + \vec{F}_2.$$

Это и есть *закон сложения сил*, выраженный в современной векторной форме.





поверхности воды означает, что вращение ведра является истинным. Если бы было можно, остановив ведро, привести во вращение звёзды, то поверхность воды в ведре осталась бы плоской, несмотря на то что по отношению к звёздам ведро снова испытывало бы вращение. Поэтому такое (относительное) вращение в противоположность первому нельзя считать истинным.



Однако на опыте возможно изучение лишь *относительного движения*, из-за чего Ньютон вынужден был ввести понятия *относительного пространства* и *относительного времени*. При этом относительное пространство «определяется нашими чувствами по положению его относительно некоторых тел», а относительное (или обыденное) время есть постигаемая нашими чувствами и «совершаемая при посредстве какого-либо движения мера продолжительности... как-то: час, день, месяц, год».

Дав определения основным понятиям механики, Ньютон перешёл к формулировке «аксиом, или законов движения». Ощувив себя пророком, избранным Богом, чтобы открыть людям законы, которыми он руководствовался при создании Вселенной, Ньютон придал им форму Божественных повелений.

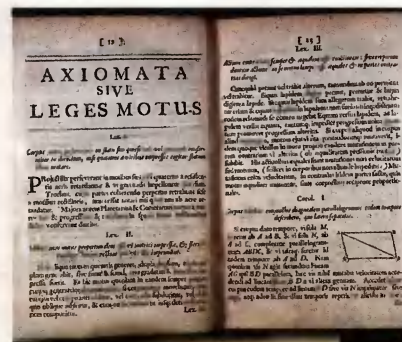
После смерти Ньютона эти законы стали формулировать в обычном наклонении. Кроме того, их формулировки были несколько уточнены, и там, где можно, им был придан математический характер (сам Ньютон свои законы никогда не записывал в виде каких-либо формул).

ПЕРВЫЙ ЗАКОН НЬЮТОНА

Формулируя свои аксиомы, Ньютон стремился описать «истинное» движение тел, т. е. их движение по отношению к абсолютному пространству. Однако в современной физике свойства пространства считаются зависящими от выбора системы отсчёта. Из всевозможных систем отсчёта выберем те, в которых пространство и время обладают свойствами симметрии (пространство — однородно и изотропно, а время — однородно). Именно относительно таких систем отсчёта (а не абсолютного пространства) мы и будем рассматривать в дальнейшем все движения, совершаемые телами.

Первое, что нас будет интересовать, — это характер движения *изолированной* материальной точки, т. е. тела, бесконечно удалённого от всех остальных тел.

Согласно *первому закону Ньютона*, любое тело сохраняет своё состояние покоя или равномерного пря-



Разворот
«Математических
начал...» с законами
Ньютона.



молинейного движения до тех пор, пока оно остаётся изолированным.

Это уже знакомый нам закон инерции. Поскольку он справедлив в рассматриваемых системах отсчёта, их называют *инерциальными*.

Формулируя свой первый закон, Ньютон ссылаясь на труды Галилея, хотя, судя по начальным наброскам, наибольшее влияние на него оказали работы Декарта. Ведь именно он впервые дал правильную трактовку явления инерции и сформулировал данный закон.

В соответствии с законом инерции изолированное тело способно находиться лишь в одном из двух следующих состояний: оно может либо покоиться, либо двигаться равномерно и прямолинейно, т. е. с постоянной скоростью $\vec{v}$. Объединяет оба случая то, что ускорение тела равно нулю.

Строго говоря, изолированных тел в природе не существует. Поэтому первый закон Ньютона описывает не реальную, а воображаемую ситуацию и должен пониматься так: если расстояния r от данной частицы (материальной точки) до всех остальных тел делать всё больше и больше, то её ускорение будет становиться всё меньше и меньше, так что в пределе (при $r \rightarrow \infty$) оно будет стремиться к нулю:

$$\lim_{r \rightarrow \infty} \vec{a} = 0.$$

Таким образом, содержание первого закона Ньютона сводится по существу к следующему утверждению: ускорение любой частицы убывает по мере удаления от неё окружающих тел.

Подчеркнём, что это имеет место лишь в инерциальных системах отсчёта. В *неинерциальных системах отсчёта*, пространство и время в которых не обладают свойствами симметрии, любому первоначально покоящемуся изолированному телу ничто не мешает уже в следующий момент времени прийти в движение вдоль какого-либо направления.



(Ведь в таких системах отсчёта пространство не изотропно, и потому в нём существуют выделенные направления, вдоль которых может начаться движение.)

При этом тело, движущееся с некоторой начальной скоростью, может без каких бы то ни было причин остановиться в одной или другой точке. Такие точки в неоднородном пространстве уже не равноправны.

И наоборот, в инерциальных системах отсчёта первоначально покоящееся изолированное тело так и будет продолжать покоиться, а имеющее начальную скорость — продолжать неограниченное движение по инерции. По этой причине данные системы отсчёта и называются инерциальными.

■ Роль, которую играют инерциальные системы отсчёта в современной физике, столь велика (по отношению к ним формулируются законы не только механики, но и электродинамики и молекулярной физики), что первый закон Ньютона нередко формулируют в виде постулата о существовании таких систем.

ВТОРОЙ ЗАКОН НЬЮТОНА

Второй закон Ньютона описывает движение тела (частицы), учитывая его взаимодействие с другими телами. Согласно ему, изменение импульса частицы равно произведению силы, с которой на неё действуют окружающие тела, и времени их действия:

$$\Delta \vec{p} = \vec{F} \Delta t$$

или

$$\frac{\Delta \vec{p}}{\Delta t} = \vec{F},$$

где $\vec{p} = m\vec{v}$ есть импульс (количество движения) частицы.



Если $m = \text{const}$, то $\Delta \vec{p} = \Delta(m\vec{v}) = m\Delta\vec{v} = m\vec{a}\Delta t$, и потому второй закон Ньютона можно переписать в несколько ином виде:

$$m\vec{a} = \vec{F}.$$

Именно эта формула обычно приводится в школьных курсах физики. Пользуясь ею, не следует, однако, забывать, что она справедлива лишь тогда, когда масса тела в процессе движения не меняется.



Если известна зависимость силы от координат и скоростей, то уравнение, выражающее второй закон Ньютона, позволяет вычислить траекторию движения и называется поэтому *уравнением движения*. Им можно пользоваться как в инерциальных, так и в неинерциальных системах отсчёта. Правда, в последнем случае в его правую часть необходимо добавить так называемые *силы инерции*, причина возникновения которых — ускоренное (относительно инерциальной системы) движение системы отсчёта.

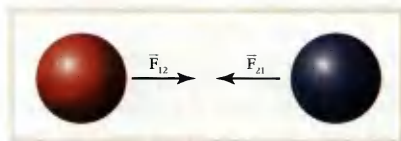
ТРЕТИЙ ЗАКОН НЬЮТОНА

Третий закон Ньютона описывает ситуацию, когда во взаимодействии участвуют два тела: силы взаимодей-

ствия двух любых частиц равны по модулю и направлены в противоположные стороны вдоль соединяющей их прямой.

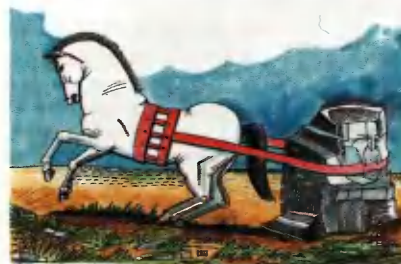
Если обозначить через $\vec{F}_{12}$ силу, с которой первое тело действует на второе, а через $\vec{F}_{21}$ — силу, с которой, наоборот, второе тело действует на первое, то в соответствии с третьим законом Ньютона получится:

$$\vec{F}_{12} = -\vec{F}_{21}.$$



Третий закон Ньютона иначе называют *законом действия и противодействия*. «Если кто нажимает пальцем на камень, — писал Ньютон, — то и палец его также нажимается камнем. Если лошадь тащит камень, привязанный к канату, то и обратно (если можно так выразиться) она с равным усилием оттягивается к камню...»

Обосновывая равенство сил действия и противодействия, Ньютон писал: «Относительно притяжений дело может быть изложено вкратце следующим образом: между двумя взаимно притягивающимися телами надо вообразить помещённым какое-либо препятствие, мешающее их сближению. Если бы одно из тел A притягивалось бы телом B сильнее, нежели тело B притягивается телом A , то пре-





пятствие испытывало бы со стороны тела *A* большее давление, нежели со стороны тела *B* и, следовательно, не осталось бы в равновесии. Преобладающее давление вызвало бы движение системы, состоящей из двух тел и препятствия, в сторону тела *B*, и в свободном пространстве эта система, двигаясь ускоренно, ушла бы в бесконечность. Такое заключение нелепо и противоречит первому закону, по которому система должна бы оставаться в своём состоянии покоя или равномерного и прямолинейного движения. Отсюда следует, что оба тела давят на препятствие с равными силами, а значит, и притягиваются взаимно с таковыми же».

Третий закон Ньютона остаётся справедливым во всех (даже в неинерциальных) системах отсчёта. Например, сила притяжения Земли и Луны или сила взаимодействия двух неподвижных относительно друг друга точечных зарядов будет одной и той же независимо от того, из какой системы отсчёта (инерциальной или неинерциальной) мы наблюдаем за этими телами. Подчеркнём, что в третьем законе Ньютона речь идёт не о любых силах, а о силах взаимодействия тел. Такие же, например, силы, как силы инерции, которые возникают в неинерциальных системах отсчёта, этим законом не описываются.

ВСЕМИРНОЕ ТЯГОТЕНИЕ

В картине мира, созданной Аристотелем, не было места всемирному тяготению. Круговое движение небесных светил считалось естественным и не требовало приложения каких-либо сил. Таким же естественным казалось Аристотелю и падение тяжёлых тел на землю. Ведь Земля, по его представлениям, находилась в центре Вселенной, а куда ещё, как не в этот центр, должно быть на-

правлено естественное движение тел в подлунном мире?

С момента выхода в свет «Математических начал...» Ньютона прошло уже более 300 лет. Благодаря труду многих учёных XIX—XX вв. открыты новые законы природы, являющиеся не менее фундаментальными, а иногда и более общими, чем законы Ньютона. Были созданы электродинамика, общая теория относительности и другие теории. Картина мира наполнилась более богатым и глубоким содержанием. Тем не менее Альберт Эйнштейн подчёркивал: «Пусть никто не думает, что великое создание Ньютона может быть ниспровергнуто теорией относительности или какой-нибудь другой теорией. Ясные и широкие идеи Ньютона навечно сохраняют своё значение фундамента, на котором построены наши современные физические представления. Даже такой яростный критик Ньютона, как Эрнст Мах, признавал, что законы Ньютона позволяют «без привлечения какого-нибудь нового принципа рассмотреть каждый практически возможный случай механики. Если при этом возникают затруднения, то это всегда только затруднения математического (формального), но никогда не принципиального характера».



Медаль Великобритании с изображением И. Ньютона, присуждаемая монархом по рекомендации Королевского общества за выдающиеся достижения в науке.

правлено естественное движение тел в подлунном мире?

Впрочем, Аристотель не ограничился подобными общими соображениями и привёл также отдельное доказательство того, что падение тел не может быть «насильственным». Всем известно, что более тяжёлый груз труднее сдвинуть с места. Поэтому, рассуждает Аристотель, если бы падение тел было вызвано действием



какого-либо другого тела, то «большее количество огня медленнее двигалось бы вверх, а большее количество земли — вниз. На самом же деле наоборот...». Значит, никакая сила не является причиной падения тел.

Однако, писал Аристотель, «поскольку центр Земли и Вселенной — один и тот же, правомерен вопрос: почему к нему естественно движутся тела, имеющие тяжесть? Потому ли, что он центр Вселенной, или же потому, что он центр Земли?». Не увидев в этом движении проявления притяжения Земли, Аристотель пришёл к выводу, что Земля здесь ни при чём. «По необходимости, — писал философ, — они, несомненно, должны двигаться к центру Вселенной, так как лёгкие тела и огонь, движенье которых противоположно по направлению движению тяжестей, движутся к краю не Земли, а окружающего центр пространства».

Однако в XVI в. Николай Коперник «изгнал» Землю из центра мироздания, «поместил» на её место Солнце, а все планеты «заставил» обращаться вокруг него: «В середине всех этих орбит находится Солнце; ибо может ли прекрасный этот светоч быть помещён в столь великолепной храмине в другом, лучшем месте, откуда он мог бы всё освещать собой?».



Создание новой системы мира требовало и нового решения проблемы тяготения. Если в центре Вселенной находится Солнце, а не Земля, то аристотелевское объяснение тяжести «стремлением» тел к центру мира уже «не работает».

Понимая это, Коперник пришёл к очень важному выводу: тяжесть существует не только на Земле, но и на других небесных телах. «Тяготение, — писал он, — есть не что иное, как естественное стремление частей, которым Божественное провидение Творца Вселенной наделяет весомые тела, дабы они, собираясь в единое целое, обрели сферичность. Вполне вероятно, что таким же стремлением наделены Солнце, Луна и все прочие блуждающие светила, дабы с его помощью они могли сохранять ту правильную шарообразную форму, в которой мы их видим».

КЕПЛЕР И ЗАКОНЫ ДВИЖЕНИЯ ПЛАНЕТ

Следующий шаг был сделан в 1609 г. немецким учёным Иоганном Кеплером. Проанализировав обширные данные об изменениях положений небесных тел, он пришёл к выводу, что планеты движутся не по окруж-



ностям, а по эллипсам, причём не вокруг их центра, а вокруг Солнца, находящегося в одном из их фокусов, (*первый закон Кеплера*). Но разве такое «неправильное» движение можно считать естественным? У него наверняка должна быть какая-то причина!

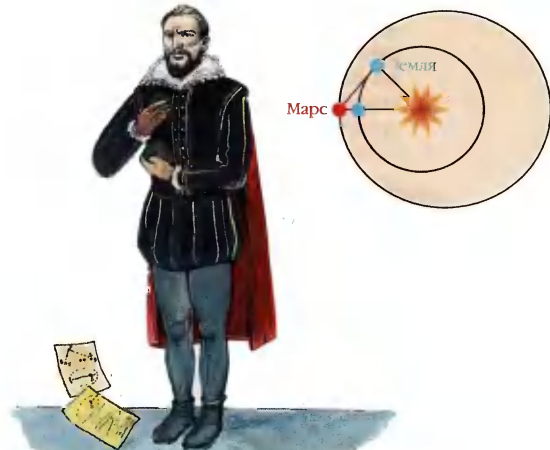
Сначала Кеплер предполагал, что это солнечные лучи заставляют планеты двигаться вдоль своих орбит, но вскоре переменял мнение, остановившись на гипотезе о магнитной природе тяготения. Немногом ранее вышла книга английского физика Уильяма Гильберта (1544—1603) «О магните, магнитных телах и о большом магните — Земле», в которой впервые подробно описывались магнитные свойства Земли. И то, что эти свойства могут распространяться на все планеты, Кеплеру показалось вполне логичным. Он предположил, что вращающееся Солнце испускает силовые «магнитные нити», увлекающие планеты за собой. В своей книге «Гармония Мира» он писал: «Гравитацию я определяю как силу, подобную магнетизму — взаимному притяжению. Сила тем больше, чем оба тела ближе друг к другу».

Второй закон Кеплера гласил, что радиус-вектор планеты в равные промежутки времени описывает (замечает) равные площади. Отсюда следовало, что с увеличением расстояния от Солнца скорость планет убывает. Поэтому, считая справедливым закон Аристотеля о пропорциональности силы и скорости, Кеплер пришёл к выводу, что «движущая сила», исходящая от Солнца, тоже должна убывать с увеличением расстояния до планет.

Чтобы точно определить данную зависимость, учёный решил воспользоваться гипотетической аналогией между «распространением» силы тяжести и распространением света. Уменьшение освещённости E в расходящихся лучах, как установил сам Кеплер ещё в 1604 г., происходит пропорционально увеличению освеща-

емой этими лучами площади, т. е. пропорционально квадрату расстояния R от источника света до данной поверхности: $E \sim 1/R^2$. Следовательно, аналогичная зависимость от расстояния должна быть характерна и для сил тяготения. Но силы тяготения между планетами и Солнцем, рассуждал Кеплер, действуют не в трёхмерном пространстве, а лишь в плоскости планетных орбит. Значит, они должны изменяться обратно пропорционально не квадрату, а первой степени расстояния. Ошибка, допущенная Кеплером, задержала появление закона всемирного тяготения на несколько десятилетий.

Свойство тяготения Кеплер приписывал не только небесным, но и любым другим телам. Понимая важность этой идеи, он призывал физиков отнестись к ней с вниманием. «Вот, — писал Кеплер, — истинное учение о тяжести: тяжесть есть взаимная склонность между родственными телами, стремящимися слиться, соединиться воедино... Если бы в каком-нибудь месте мира находились два камня на близком расстоянии друг от друга и вне сферы действия какого бы то ни было





родственного им тела, то эти камни стремились бы соединиться друг с другом, подобно двум магнитам, где-нибудь посредине этого расстояния, и пути, которые им пришлось бы пройти, были бы обратно пропорциональны их массам».

Особенно тщательно Кеплер рассмотрел взаимодействие Земли и Луны. Он считал, что не только Земля притягивает Луну, но и Луна Землю. Именно этим и вызваны приливы и отливы на нашей планете. «Если бы Земля перестала притягивать свои воды, — писал учёный, — то все воды морей поднялись бы и втекли в тело Луны». Галилея подобная теория лишь рассмешила. «Из всех людей, рассуждавших об этом замечательном явлении — о приливах и отливах моря, больше всех удивляюсь я Кеплеру», — заявил он, давая понять, что не представляет, как Кеплер, «человек свободного и острого ума», способен увлечься «детскими выдумками».

Такая близорукость, однако, не мешала Галилею сделать выдающиеся открытия, в частности, в области астрономии. Направив на небо свою зрительную трубу, он открыл на Луне горы и пришёл к выводу, что она «представляет собой тело, подобное Земле». У Юпитера учёный обнаружил спутники, обращающиеся вокруг своей планеты, как Луна вокруг Земли. Благодаря этим открытиям небесные тела в представлении людей перестали быть чем-то особенным. Но

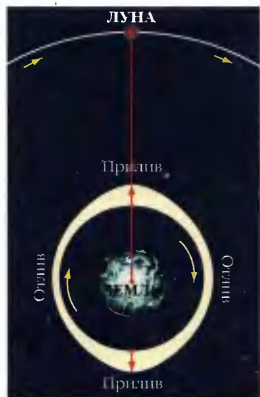
тогда почему бы им не подчиняться тем же законам, что и обычные тела?

ДЕКАРТ ПРОТИВ РОБЕРВАЛЯ

Идея об универсальной природе тяготения получила развитие в работах французского учёного Жюль Роберваля (1602—1675). Через год после смерти Галилея, в 1643 г., он уже категорически утверждал, что всем телам присуще свойство, «сходное со свойством, которое мы приписывали системе мира, взятой в целом. Силой этого свойства все части этой системы соединяются в одну массу и взаимно друг к другу притягиваются». Причём сила такого притяжения не нуждается в какой-либо среде и может действовать на расстоянии, через пустое пространство.

Однако Рене Декарт подверг теорию Роберваля резкой критике. Если бы она была верна, писал Декарт, это означало бы «не только то, что каждая частица материи в природе одушевлена, но что в ней содержится множество душ, одарённых сознанием, что эти души поистине божественны, ибо они без посредства какой-либо среды могут знать, что происходит в отдалёнейших от них местах, и там производить действие».

Собственную теорию Рене Декарт изложил в трактате «Начала философии», вышедшем в свет в 1644 г. Вся Вселенная, утверждал автор, заполнена особой небесной материей — *пленумом* (лат. «всё заполняющий»), — по своим свойствам напоминающей жидкость. Эта «небесная материя, в которую погружены планеты, непрерывно кружится, подобно вихрю, в центре которого находится Солнце, и части его, расположенные вблизи Солнца, движутся быстрее, чем удалённые на некоторое расстояние». Аналогичные вихри, считал Декарт, существуют и вокруг планет, они и увлекают за собой их спутники. Теория вихрей «объясняла» кру-





говые движения планет и спутников и потому получила широкое распространение, особенно на родине Декарта — во Франции.

РОБЕРТ ГУК И ЗАКОН ОБРАТНЫХ КВАДРАТОВ

В 1674 г. английский учёный Роберт Гук (1635—1703) заметил, что «все небесные тела имеют притяжение, или силу тяготения», причём «притягательные силы тем значительно обнаруживают себя, чем ближе тело, на которое они действуют, находится от центра действия». Но, признался Гук, «в какой степени это увеличение зависит от расстояния, это я ещё не определил опытом».

На решение данной задачи у Гука ушло несколько лет. В конце концов, обратившись к теории Кеплера и исправив допущенную им ошибку, он приходит к такому выводу: «Притяжение обратно пропорционально квадрату расстояния до центра». Теперь следовало доказать, что движение планет действительно подчиняется открытому им закону, для чего необходимо было убедиться в том, что при $F \sim 1/R^2$ траектории планет могут быть эллипсами. Однако этого Гук так и не сумел сделать.

НЬЮТОН, ЯБЛОКО И КОМЕТА ГАЛЛЕЯ

То, что не удалось Гуку, сумел сделать Исаак Ньютон. К идее о существовании всемирного тяготения, или *гравитации* (от лат. *gravitas* — «тяжесть»), Ньютон пришёл ещё в 1666 г., когда ему самому было всего 24 года. Согласно легенде, это произошло во время отдыха в саду. Он увидел падающее яблоко и задумался: не одна ли и та же сила заставляет яблоко падать, а Луну — двигаться вокруг Земли? Что было бы, если бы «около Земли обращалось несколько Лун, подобно тому как около Юпитера... и если бы наинизшая из этих Лун была малой и почти что касалась вершин высочайших гор... и если бы этот спутничек лишиться его поступательного движения по орбите»? Стала бы эта маленькая «Луна» падать с тем же ускорением, что и яблоко?

Кеплер предполагал, что движение планеты продолжается только до тех пор, пока на неё действует сила, — он не знал о законе инерции, поэтому считал, что от Солнца должна исходить сила, движущая планету, как бы толкающая её по орбите. Галилей в свою очередь ошибочно полагал, будто на планеты со стороны Солнца не действуют никакие силы и они движутся по круговым орбитам по инерции.

Ньютон понял, что сила, исходящая от Солнца, не движет планету, а лишь удерживает её на орбите, не позволяя ей удалиться от светила. Без этой удерживающей центральной силы планета двигалась бы по инерции равномерно и прямолинейно. Притяжение Солнца заставляет планету непрерывно отклоняться от прямолинейного движения по инерции и таким образом «падать» на свою орбиту.

Размышляя об этом, Ньютон пришёл к открытию закона всемирного



тяготения. Однако публиковать его не стал и никому о нём не рассказывал. Одной из причин послужило то, что при сопоставлении результатов своей теории с опытными данными он обнаружил расхождения (на самом деле они были вызваны использованием ошибочного значения радиуса Земли). Когда же, много лет спустя, Ньюто́ну стали известны более точные данные, он, как пишет английский физик Оливер Лодж, «достал свои старые рукописи и снова приступил к вычислениям... Новые данные изменяют результаты: в чрезвычайном возбуждении пересматривает он глазами свою работу, перо не успевает следить за мыслью, и, наконец, вычисления приводят его к желаемым результатам. Беспредельно большое значение и глубина его открытия настолько ослепляют его своим сиянием, что затуманенные глаза не видят рукописи. В изнеможении он отбрасывает перо; тайна мироздания, наконец, открылась ему, единственному в мире...».

Незадолго до этого Христиан Гюйгенс сумел измерить ускорение сво-

бодного падения вблизи Земли (в то время о нём судили по пути, пройденному свободно падающим телом за 1 с): оно оказалось равным примерно $15\frac{1}{12}$ парижского фута, что соответствует $9,8 \text{ м/с}^2$. Ньютон обратил внимание на следующий факт: вблизи поверхности Земли это ускорение в 3600 раз больше, чем у Луны, которая находится от центра Земли в 60 раз дальше, чем земная поверхность. Но $3600 = 60^2$. Значит, ускорение свободного падения убывает обратно пропорционально квадрату расстояния от центра Земли: $a \sim 1/R^2$. Согласно второму закону Ньютона, ускорение пропорционально силе. Следовательно, причиной убывания ускорения является аналогичная зависимость от расстояния силы тяготения.

В 1677 г. Ньютон решает более сложную задачу, которую формулирует так: «Тело обращается по эллипсу: требуется определить закон центростремительной силы, направленной к фокусу эллипса». Учёный доказывает, что $F \sim 1/R^2$. Но любая планета состоит из множества частиц. При этом, замечает Ньютон, «тяготение ко всей планете происходит и складывается из тяготений к отдельным её частям». Таким образом, «тяготение ко всем планетам пропорционально количеству материи в них». Количество же материи определяется массой. Значит, подводит итог Ньютон, «тяготение существует ко всем телам и пропорционально массе каждого из них».

Современная формулировка открытого Ньютоном *закона всемирного тяготения* такова: сила гравитационного притяжения любых двух частиц прямо пропорциональна произведению их масс и обратно пропорциональна квадрату расстояния между ними, т. е.

$$F = G \frac{m_1 m_2}{r^2}, \quad (1)$$



ЗАКОН ТЯГОТЕНИЯ И РАЗМЕРНОСТЬ ПРОСТРАНСТВА

Следующий после Ньютона (и совершенно неожиданный) шаг в понимании закона всемирного тяготения был сделан 23-летним выпускником Кёнигсбергского университета Иммануилом Кантом (1724—1804). В 1747 г. он написал работу «Мысли об истинной оценке живых сил», в которой несколько страниц посвятил свойствам пространства и их связи с законом тяготения.

Канта интересовал вопрос: почему пространство трёхмерно? Легко доказать, — замечал он, — что не было бы никакого пространства и никакого протяжения, если бы субстанции не обладали никакой силой действовать вовне. Ибо без этой силы нет никакой связи, без связи — никакого порядка и, наконец, без порядка нет никакого пространства». Но эти силы по закону всемирного тяготения изменяются обратно пропорционально квадрату расстояния между телами. А потому между числом 3 — размерностью пространства и числом 2 в законе тяготения должна быть связь. Трёхмерность пространства, сделал

вывод Кант, «происходит, по-видимому, оттого, что субстанции в существующем мире действуют друг на друга таким образом, что сила действия обратно пропорциональна квадрату расстояния».

Кант сознавал, что его рассуждения не слишком убедительны, и закончил свою работу такими словами: «Эти мысли могут послужить наброском для некоего исследования, которым я намереваюсь заняться. Не могу, однако, отрицать, что сообщаю их в том виде, в каком они мне пришли в голову, не придав им требуемой достоверности с помощью более подробного изучения. Я готов поэтому снова отказаться от них, как только более зрелое суждение раскроет мне их слабость».

И действительно, впоследствии, став знаменитым философом, Кант пришёл к мысли, что свойства пространства не могут зависеть от какого бы то ни было закона сил, и больше к этой теме не возвращался.

Лишь спустя 170 лет после выхода упомянутого выше сочинения Канта, в 1917 г., в журнале «Труды Амстердамской академии» появилась статья известного физика Пауля Эренфеста (1880—1933) под названием «Каким образом в фундаментальных законах физики проявляется то, что пространство имеет три измерения?». Рассмотрев «физику» в n -мерном евклидовом пространстве, он пришёл к выводу, что закон всемирного тяготения в общем случае должен иметь вид:

$$F = G \frac{m_1 m_2}{r^{n-1}},$$

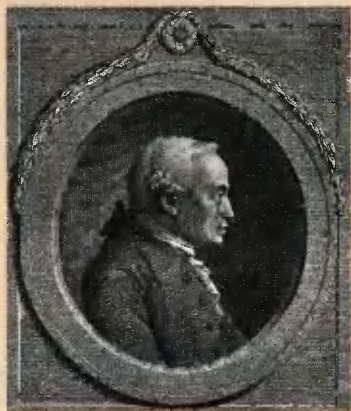
где n — размерность пространства, в котором рассматривается гравитационное взаимодействие. В нашем пространстве, как установил Ньютон, $n - 1 = 2$. Отсюда следует, что размерность пространства, в котором мы живём, равна 3.

А что бы мы почувствовали, если бы вдруг оказались в четырёхмерном мире? До Эренфеста считалось, что это привело бы лишь к появлению у людей дополнительных возможностей, которые выглядели бы как чудо.

Например, проникая через четвёртое измерение внутрь тела человека, хирурги смогли бы без труда лечить его внутренние органы и даже совершать пересадку сердца, не рассекая грудную клетку. Люди с криминальным мышлением нашли бы себя на поприсе грабежей: наличие четвёртого измерения позволило бы им «очистить» любой сейф, не утруждая себя его взломом, и т. д.

Работа Эренфеста положила конец подобным иллюзиям. В четырёхмерном пространстве сила гравитационного притяжения убывала бы пропорционально третьей степени расстояния. А это, как можно доказать, решив соответствующие уравнения движения, привело бы к тому, что все планеты либо упали бы на Солнце, либо улетели прочь: устойчивых орбит в четырёхмерном мире нет. Значит, не было бы и той Земли, на которой могла появиться жизнь, и человечество в том числе!

Так, спустя 230 лет после выхода в свет «Математических начал» Исаака Ньютона, удалось установить, что квадратичное убывание силы тяготения с расстоянием, оказывается, является необходимым условием существования человека!



Иммануил Кант.



Пауль Эренфест.



ВТОРОЙ ЗАКОН НЬЮТОНА КАК ИНСТРУМЕНТ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ

Второй закон Ньютона — это не просто формула $m\vec{a} = \vec{F}$, позволяющая из каких-либо двух известных величин найти третью. По словам американского физика-теоретика Ричарда Филлипса Фейнмана (1918—1988), этот закон «даёт нам хорошую программу анализа природы», он подсказывает, что в каждом конкретном случае прежде всего следует обратить внимание на силу, приложенную к телу, и, «если мы видим, что сила не равна нулю, мы ищем по соседству её источник».

С поиска источников сил и начинается, как правило, решение любой задачи в динамике.

Для решения большинства задач динамики достаточно уметь оперировать стандартным набором из четырёх сил.

Чаще всего встречается *сила тяжести* $\vec{F}_T$. Она действует на все тела в окрестности Земли, направлена вертикально вниз и равна произведению массы тела на ускорение свободного падения (вблизи поверхности Земли $g = 9,8 \text{ м/с}^2 \approx 10 \text{ м/с}^2$):

$$\vec{F}_T = m\vec{g}.$$

Следующий важный тип сил — *силы нормальной реакции* $\vec{N}$. Они всегда возникают при давлении одного тела на поверхность другого и направлены перпендикулярно к этой поверхности. Термин «нормальный» здесь понимается в геометрическом смысле: перпендикулярный чему-либо. Возникают силы реакции из-за деформации поверхности в точках соприкосновения тел и потому имеют упругую природу. Роль таких сил

особенно важна из-за их тесной связи с другим важнейшим типом сил — *силами трения*.

Они также возникают в точках соприкосновения поверхностей двух тел, но направлены по касательной к ним и препятствуют движению соприкасающихся тел относительно друг друга. При этом если тело остаётся в покое, несмотря на внешнее воздействие, то соответствующая сила называется *неполной силой трения* или *силой трения покоя*. Она всегда равна по модулю и направлена противоположно внешней силе, действующей параллельно соприкасающимся поверхностям. С ростом данной силы увеличивается и сила трения покоя. Её максимальное значение равно *силе трения скольжения*, возникающей в момент начала движения одного тела по поверхности другого. Модуль силы находится по закону Кулона—Амонтона:

$$F_{\text{тр}} = \mu N,$$

где μ — *коэффициент трения*, зависящий лишь от материала тел и качества обработки их поверхностей.

Следующий вид часто встречающихся сил — *силы натяжения нитей* $\vec{T}$. Они действуют на тела в точках их соединения с нитью (или тросом, верёвкой и т. д.) и всегда направлены вдоль неё.

В большинстве задач динамики используется идеализированное представление о невесомой и нерастяжимой нити. Тогда силы натяжения, возникающие на её концах, одинаковы. Это легко понять, если учесть, что по третьему закону Ньютона в конечных точках со стороны тел на нить действуют противоположно направленные силы. Если считать, что нить нерастяжима (и, следовательно, все её точки движутся с одинаковым ускорением), а её масса ничтожно

мала ($m = 0$), то, применив к ней второй закон Ньютона: $m\vec{a} = \vec{T}_1 - \vec{T}_2$, получим, что $\vec{T}_1 = \vec{T}_2$. Следовательно, равными должны быть и силы натяжения, приложенные к телам со стороны нити.

Если речь идёт о массивной верёвке, прикреплённой к телам, то для придания ей ускорения необходима результирующая сила, а значит, силы натяжения на её концах должны быть уже различными.

Умение работать с перечисленными силами — необходимое и достаточное условие для решения большинства школьных задач по динамике.

В механике достаточно знать величину силы и необязательно знать её природу (этим занимаются другие разделы физики). Однако, говоря о силе, мы всегда должны иметь в виду конкретное тело, к которому она приложена, и конкретные тела, со стороны которых она действует.

Например, в ситуации с двумя телами, соединёнными нитью, нельзя считать, что сила $\vec{F}$, приложенная к одному из тел, действует и на другое. К другому телу приложены лишь силы со стороны взаимодействующих с ним тел: сила натяжения нити, сила трения, сила нормальной реакции опоры и сила тяжести. Сила $\vec{F}$ может изменить значения некоторых из них, но она совсем не переносится вдоль нити, соединяющей тела подобно сигналу по телефонному проводу.

При решении задач все силы, действующие на тело, следует изобразить на рисунке. Если рассматривается только поступательное движение тела (без вращения), совершенно не важно, к какой из его точек приложены данные силы. Всё тело в этом случае можно считать материальной точкой, и потому векторы сил на рисунке можно

где G — фундаментальная физическая константа, называемая *гравитационной постоянной*.

Благодаря закону всемирного тяготения масса стала рассматриваться

не только как мера инертности тела, но и как величина, определяющая интенсивность гравитационного взаимодействия. В принципе подобная величина (её можно назвать *гра-*



проводить через центр фигуры, которая условно изображает рассматриваемое тело.

Кроме сил на рисунке следует изобразить вектор ускорения тела $\vec{a}$ и оси координат, на которые будет осуществляться их проецирование. Одну ось удобнее всего направить параллельно вектору $\vec{a}$, а другую (если она вообще необходима) — перпендикулярно первой. Тогда уравнения движения приобретают наиболее простой вид. В принципе можно использовать проекции на любые направления — на результат это не повлияет. Просто уравнения могут стать более громоздкими.

Рассмотрим конкретный пример. Пусть имеются два тела с массами m и M , которые связаны нитью, перекинутой через блок, установленный на вершине наклонной плоскости. Пренебрегая массами нити и блока, можно найти ускорение, с которым будет двигаться эта система тел.

Груз m взаимодействует с наклонной плоскостью, нитью и Землёй. Данные тела являются источниками четырёх сил: силы нормальной реакции опоры N , силы трения скольжения μN , силы натяжения нити T и силы тяжести mg . Груз M взаимодействует лишь с Землёй и нитью, поэтому к нему приложены только две силы — сила тяжести Mg и сила натяжения нити T .

Если сумма приложенных к грузам сил отлична от нуля, то грузы начнут двигаться с ускорением, которое можно найти с помощью второго закона Ньютона. Направление движения тел (совпадающее при начальной скорости $v_0 = 0$ с направлением их ускорения) в общем случае зависит от масс тел, угла наклона плоскости и коэффициента трения.

Если перетягивает груз M , то сила трения, приложенная к телу m , оказывается направленной вниз. Приме-

нительно к телу m второй закон Ньютона, записанный в проекциях на оси X и Y , даёт:

$$ma = T - mg \sin \alpha - \mu N,$$

$$0 = N - mg \cos \alpha.$$

Применяя тот же закон к телу M , получаем:

$$Ma = Mg - T.$$

Из этих уравнений находим ускорение:

$$a = \frac{M - m \sin \alpha - \mu m \cos \alpha}{M + m} g.$$

Если предположить, что перетягивает тело m (сила трения при этом изменяет своё направление на противоположное), получится другой ответ:

$$a = \frac{m \sin \alpha - M - \mu m \cos \alpha}{M + m} g.$$

Так как модуль ускорения $a > 0$, то при заданных значениях α и μ первое

из полученных выражений справедливо при условии:

$$M \geq m (\sin \alpha + \mu \cos \alpha),$$

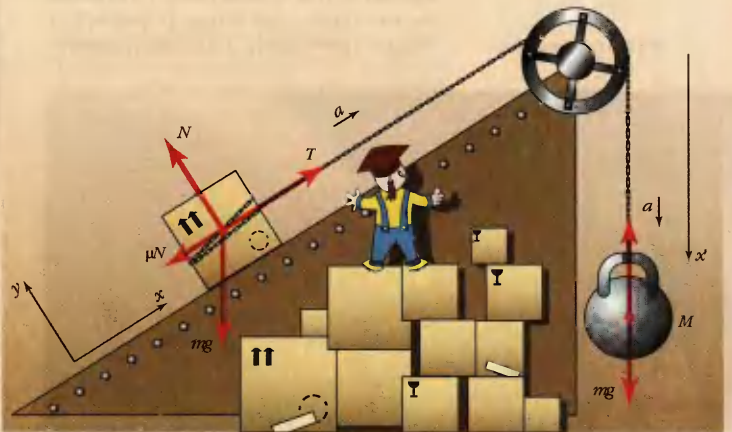
а второе — при условии:

$$M \leq m (\sin \alpha - \mu \cos \alpha).$$

Во втором случае необходимо учитывать также, что $M > 0$; поэтому обязательно должно выполняться неравенство $(\sin \alpha - \mu \cos \alpha) > 0$ или $\operatorname{tg} \alpha > \mu$.

Следовательно, второй закон Ньютона позволяет добыть массу информации о рассматриваемой системе. Решая задачу в общем (аналитическом) виде, с помощью полученных уравнений можно выяснить, при каких условиях тела будут двигаться, с каким ускорением, куда будет направлено это ускорение в разных случаях, как зависит характер движения тел от параметров системы (угла наклона, масс, коэффициента трения) и т. д.

Изменив значения этих параметров, можно заставить тела двигаться так, как этого требует на практике та или иная конкретная ситуация.



витационным зарядом) — совсем не обязана совпадать с инертной массой, и факт их равенства, точнее пропорциональности, следует считать фундаментальным законом природы.

В законе всемирного тяготения речь идёт о взаимодействии *частиц*, или *материальных точек*, т. е. тел, размеры которых значительно меньше расстояния r между ними. Однако



ГРАВИТАЦИЯ ВО ФЛАТЛАНДИИ

Флатландия (от *англ.* flat — «плоский» и land — «земля», «страна») — воображаемый мир в двух измерениях. В этом мире есть длина и ширина, но нет высоты. Пространство Флатландии двумерно, и потому закон тяготения здесь имеет вид:

$$F = G \frac{Mm}{r}.$$

Представим себе, что в этом мире существует всё то же, что и в нашем, только плоское: плоское Солнце (той же массы $M_{\odot} \approx 2 \cdot 10^{30}$ кг), плоская Земля (радиусом $R \approx 6,4 \cdot 10^6$ м, массой $M_{\oplus} \approx 6 \cdot 10^{24}$ кг, расположена на расстоянии от Солнца $r \approx 1,5 \cdot 10^{11}$ м) и т. д.

Принимая гравитационную постоянную Флатландии равной $G = 6,7 \cdot 10^{-11}$ Н·м/кг², опишите гравитационные явления, наблюдаемые в таком мире. Чему здесь равно ускорение свободного падения? Первая космическая скорость? Период обращения Земли вокруг Солнца? Будет ли в этом случае солнечный свет доходить до Земли?

Комета Галлея.
Вышивка на ковре.
Байё. Франция. XII в.

одна замечательная особенность этого закона позволяет использовать его и в ряде других случаев. Такой особенностью является обратно пропорциональная зависимость силы тяготения именно от квадрата расстояния между частицами, а не от третьей или четвертой степени расстояния. Проведённые Ньютоном расчёты показали, что благодаря этому формулу (1) можно применять и для нахождения

Комета Галлея. XVII в.



силы притяжения шарообразных тел со сферически-симметричным распределением вещества. Только под r в таком случае следует понимать расстояние между их центрами. Справедливой оказывается формула (1) и в промежуточном случае, когда сферическое тело произвольного радиуса взаимодействует с некоторой материальной точкой.

На доказательство всех этих фактов у Ньютона ушло несколько лет, поскольку оно потребовало применения новых математических методов, которыми в то время не владел ни один учёный. Эти методы, включая интегральное исчисление, Исаак Ньютон разработал самостоятельно,



что принесло ему славу величайшего математика эпохи.

В 1686 г. Ньютон завершил работу над теорией тяготения, и спустя год она была опубликована в фундаментальном трактате под названием «Математические начала натуральной философии».

Теория Ньютона описывала, как осуществляется притяжение тел, но ничего не говорила о том, почему эти тела притягиваются. Вместо ответа на последний вопрос Ньютон лишь кратко заметил: «Причину же свойств силы тяготения я до сих пор



не могу вывести из явлений, гипотез же я не измышляю... Довольно того, что тяготение на самом деле существует и действует согласно изложенным нами законам».

Однако, может быть, верны объяснения тяготения, предлагаемые другими учёными? Ньютон детально анализирует их гипотезы (как вихревую теорию Декарта, так и магнитную теорию Кеплера) и приходит к выводу, что они не согласуются с реальными законами движения планет, особенно с *третьим законом Кеплера*, гласящим, что квадраты периодов обращения планет вокруг Солнца относятся как кубы больших полуосей их орбит.

Любая научная теория должна уметь не только объяснять уже известные явления, но и предсказывать новые. Поэтому подлинный триумф

закона всемирного тяготения наступил в 1758 г., когда вернулась комета Галлея, которую ранее наблюдали в 1682 г. Ничего подобного в науке ещё не было. Её очередное появление было предсказано на основе теории Ньютона сначала Галлеем, а затем (более точно, с учётом влияния Юпитера и Сатурна) французским математиком и астрономом Алексисом Клодом Клеро (1713—1765). Появление кометы на небе именно тогда, когда её ожидали, оказалось решающим доказательством справедливости закона всемирного тяготения. По словам французского астронома Камилла Фламмарiona, комета Галлея явилась человечеству как «астрономическая Истина, воссиявшая теперь над забытой могилой своего пророка и провозвестника».

ДИНАМИЧЕСКИЕ ПЕРЕМЕННЫЕ И ЗАКОНЫ СОХРАНЕНИЯ

Уже на ранних этапах изучения свойств механических систем учёные поняли, что необходимо ввести физические величины, характеризующие эти свойства, и установить количественные связи между ними. Но это оказалось не так просто.

Сегодня любая научная статья по физике заполнена разнообразными математическими символами и уравнениями. Если же мы посмотрим физические труды древних авторов, то не увидим там ни одной формулы. «Везло же древним!» — может подумать какой-нибудь ленивый ученик. Отнюдь нет!

«Если А будет движущее, — писал Аристотель в своём трактате «Физика» (IV в. до н. э.), — В — движимое, Г — длина, на которую продвинуто движимое, и Δ — время, в течение которого движимое двигалось, тогда в равное время сила, равная А, продви-

нет половину В на удвоенную Г, а на целую Г в половину времени Δ: такова будет пропорция». Как видим, закон есть, а формулы нет. Но стоит ли этому радоваться? Ведь всё, что хотел сказать Аристотель, можно выразить лишь в одной короткой строчке:

$$F = k \frac{s}{t},$$

где k — постоянная для данного тела величина, пропорциональная его весу («движимое», по Аристотелю), F — сила («движущее»), s и t — соответственно путь и время движения. Правда, закон Аристотеля оказался неверным, однако речь сейчас не об этом.

Удивительно то, что потребовалось более 2 тыс. лет, прежде чем длинные и запутанные формулировки стало возможным представить в виде коротких и простых формул.



ГРАВИТАЦИЯ ВО ФЛАТЛАНДИИ

Чтобы найти ускорение свободного падения, надо силу тяготения F разделить на массу тела m . Первая космическая скорость находится из уравнения движения по окружности: $mv^2/R = F$, откуда $v = \sqrt{GM}$ (любопытно, что она не уменьшается с расстоянием). Период обращения T Земли вокруг Солнца находится по формуле: $T = 2\pi r/v$, где v — скорость орбитального движения Земли. Солнце при этом видно не было бы, так как даже первая космическая скорость будет для него выше скорости света. Поскольку наше Солнце является типичной звездой, можно сделать вывод, что большинство звёзд во Флатландии были бы чёрными дырами. Впрочем, при меньших значениях G во Флатландии вывод был бы иным.

Что этому мешало? Главным образом отсутствие математической символики, которая позволила бы выразить различные математические действия в виде определённых знаков. Даже простейшие знаки «+», «−» и «=», которые сегодня известны каждому первокласснику, впервые появились лишь на рубеже XV—XVI вв.

Между тем развитие механики требовало умения описывать и сравнивать движения тел задолго до того, как был создан язык математических символов. Когда Аристотель излагал механику, он понимал, что различные движения отличаются друг от друга скоростью. Термин «скорость» присутствует в его трудах, однако определения этого понятия там нет. Аристотель никогда не смог бы рассчитать скорость конкретного движения. Он мог только отметить, что из двух движений одно происходит быстрее, а другое — медленнее. «Быстрое, — писал Аристотель, — есть далеко продвигающееся в течение

малого времени, медленное же — мало [продвигающееся] в течение большого [времени]».

Примерно на таком же уровне понимал скорость и Галилео Галилей. Его четвёртая аксиома равномерно-го движения гласит: «Скорость, при которой за определённое время проходит большее расстояние, больше той, при которой за то же время проходит меньшее расстояние».

Во времена Галилея (и даже позднее) всё ещё считалось недопустимым делить друг на друга величины разного рода. Поэтому можно было делить путь на путь и время на время, но нельзя было делить путь на время. Между тем понятие скорости требовало именно этого. Все законы движения, которые тогда открывались, формулировались, как правило, в виде отношений (пропорций) между величинами одного рода.

Трудности, испытываемые древними при делении, можно понять. Представим себе две корзины с яблоками. Пусть в одной из них 20 яблок, в другой — 10. Разделив 20 яблок на 10 яблок, мы узнаем, во сколько раз их число в первой корзине больше, чем во второй. Смысл деления здесь совершенно ясен. Но теперь представим, что вместо второй корзины имеется сосуд с 2 л воды. Делить яблоки на литры вряд ли кому-нибудь придёт в голову. Однако метры на секунды делят!

Превращение скорости из интуитивно понимаемого качества движения (типа быстроты) в строго определённую физическую величину произошло благодаря Леонарду Эйлеру (1707—1783), великому швейцарскому учёному, работавшему в России и Германии. Именно он впервые указал, что скорость измеряется частным от деления пути на время, после чего это простое определение было сразу принято всеми учёными, работавшими в области механики. Тем самым человечество было избавлено от страха перед

Знак	Значение	Кто ввёл	Когда введён
+	Сложение	Я. Видман	1489 г.
−	Вычитание	Я. Видман	1489 г.
=	Равенство	Р. Рекорд	1557 г.
×	Умножение	У. Оутред	1631 г.
:	Деление	Г. В. Лейбниц	1684 г.
.	Умножение	Г. В. Лейбниц	1698 г.



делением разнородных величин, и путь к миру формул открылся.

В 1736 г. вышла в свет «Механика, или Наука о движении» Эйлера, в которой впервые появилась формула второго закона Ньютона. Вот как она выглядит:

$$dv = \frac{\lambda P dt}{A}.$$

Здесь буквой P Эйлер обозначил силу, буквой A — массу частицы («т ёльца», по Эйлеру), dt — «промежуток времени», dv — «приращение скорости, взятое по направлению действующей силы», λ — коэффициент пропорциональности, зависящий от выбора единиц измерения.

ПАРАМЕТРЫ И ПЕРЕМЕННЫЕ

Через несколько лет после смерти Эйлера в механике утвердилось представление, согласно которому скорости частиц наряду с их координатами определяют *состояние* механической системы, состоящей из этих частиц. Именно координаты и скорости настолько полно характеризуют изолированную систему частиц, что по их начальным значениям можно, решив соответствующие уравнения движения, определить всю эволюцию системы во времени. Как заметил известный российский математик и механик Владимир Игоревич Арнольд (родился в 1937 г.), «мы не успеваем удивиться этому факту, так как узнаём его очень рано. Можно представить себе мир, в котором для определения будущего системы нужно в начальный момент знать также и ускорения. Опыт показывает, что наш мир не таков».

Помимо координат и скоростей — их называют *переменными состояния* — механические системы характеризуются рядом других физических величин, которые делятся на две группы: первую образуют параметры сис-



темы, вторую — динамические переменные.

Параметрами системы называют физические величины, значения которых не зависят от состояния системы и определяются лишь природой составляющих её объектов. Сюда относятся прежде всего массы частиц (m) и их электрические заряды (q). Когда говорят о возможности определения будущего системы по её начальному состоянию, то имеют в виду, что все параметры этой системы заданы (их указание, по сути, и есть определение рассматриваемой системы).

Динамические переменные представляют собой физические величины, значения которых зависят от состояния и, вообще говоря, изменяются с течением времени. Все они





выражаются через переменные состояния и параметры системы.

Наиболее важными динамическими переменными являются *импульс*, *момент импульса* и *энергия*. Причиной введения этих величин послужило то, что для каждой из них в инерциальных системах отсчёта справедлив соответствующий закон сохранения.

Законы сохранения позволяют связать начальное и конечное состояния системы тел (приравнивая значения соответствующих динамических переменных в начале и в конце изучаемого процесса). Таким образом можно получить информацию о будущем системы, не рассматривая все детали происходящего в ней процесса.

Представление о существовании в природе чего-то неизменного и сохраняющегося (как альтернатива изменяющемуся и нарождающемуся) появилось ещё в античности. Например, древнегреческий философ Демокрит (460—371 до н. э.) писал: «Ничто из того, что есть, не может быть уничтожено. Всякое изменение есть только соединение и разделение частей». Демокрит и его последователи считали, что все тела состоят из атомов, между которыми находится пустота. Так как в пустоте нет никаких причин, в силу которых атомы могли бы остановиться, то их движение, по мнению атомистов, должно быть вечным. «Думая, что прекратить все движения могут на-

чала... — писал римский поэт и философ Тит Лукреций Кар, — ты уклоняешься очень далеко от верного взгляда».

На протяжении многих веков философские идеи о сохранении материи и движения оставались только догадками. И лишь в XVII—XIX столетиях они наконец обрели форму конкретных законов природы.

ИМПУЛЬС

Понятие импульса было введено в первой половине XVII в. Рене Декартом. Из-за отсутствия в то время физического понятия массы он определял импульс как произведение «величины тела на скорость его движения». Это произведение у Декарта выражало «количество движения» и появилось в его трудах при исследовании столкновений тел.

Определение импульса, данное Декартом, было уточнено Исааком Ньютоном. Согласно Ньютону, «количество движения есть мера такового, устанавливаемая пропорционально скорости и массе». В современных обозначениях это определение выглядит так:

$$\vec{p} = m\vec{v}.$$

Импульс — векторная величина, направленная в ту же сторону, что и скорость частицы. Единицей импульса в Международной системе единиц (СИ) является **килограмм-метр в секунду** (кг·м/с).

Если имеется не одна частица, а система из N частиц, то, складывая импульсы этих частиц, можно найти полный импульс всей системы:

$$\vec{P} = \vec{p}_1 + \vec{p}_2 + \dots + \vec{p}_N = \sum \vec{p}_i.$$

Именно для него и существует **закон сохранения импульса**. Он гласит: при любых процессах, происходящих в замкнутой системе, её полный импульс остаётся неизменным.





Докажем это. Замкнутость системы означает, что сумма всех внешних сил, приложенных к системе, равна нулю:

$$\sum \vec{F}_i = 0.$$

Подставив это значение в уравнение, выражающее второй закон Ньютона для системы тел

$$\frac{\Delta \vec{P}}{\Delta t} = \sum \vec{F}_i$$

(куда входят лишь внешние силы, так как внутренние силы вследствие третьего закона Ньютона в сумме дают нуль), получим

$$\frac{\Delta \vec{P}}{\Delta t} = 0,$$

откуда $\vec{P} = \text{const}$, что и требовалось доказать.

Полезно иметь ввиду, что в тех случаях, когда система не является замкнутой, но проекция внешних сил на какую-либо ось равна нулю, то сохраняется проекция импульса на эту ось. Например, у тела, брошенного под углом к горизонту, в однородном поле тяжести (при отсутствии сопротивления воздуха) сохраняется проекция импульса на горизонтальное направление.

В формулировке самого Декарта (1639 г.) закон сохранения импульса звучал так: «Во Вселенной, во всей созданной материи есть известное количество движения, которое никогда не увеличивается, не уменьшается, и, таким образом, если одно тело приводит в движение другое, то теряет столько своего движения, сколько его сообщает». Однако отсутствие представления о векторном характере данного закона не позволило Декарту дать правильную теорию столкновений тел. Впервые это удалось сделать лишь в 1669 г. Христиану Гюйгенсу. Любопытно, что при обосновании закона сохранения импульса он исходил не из законов Ньютона, которые в то время ещё не были опубликованы, а из принципов сим-

метрии пространства и относительности движения.

Метод Гюйгенса можно проиллюстрировать на примере столкновения двух одинаковых тел, слипающихся в процессе удара — такое столкновение называют *неупругим*.

Пусть тело массой m , двигаясь со скоростью $2v$ (относительно Земли), налетает на покоящееся тело, обладающее той же массой m . До столкновения тел их полный импульс равен $2v \cdot m$. Докажем, что он останется таким же и после того, как они столкнутся. Для этого перейдём в другую систему отсчёта, движущуюся относительно первой (связанной с Землёй) со скоростью v в направлении движения первого тела. Понятно, что в новой системе отсчёта оба тела будут двигаться навстречу друг другу с одной и той же скоростью, равной v . Из соображений симметрии ясно, что после того, как тела столкнутся и соединятся в одно целое, образовавшееся (составное) тело двигаться не будет. Но если его скорость окажется равна нулю в движущейся системе отсчёта, то в покоящейся системе отсчёта (связанной с Землёй) его скорость будет равна v . Умножив это значение на массу составного тела, получим общий импульс, равный $2m \cdot v = 2mv$, что совпадает с его первоначальным значением в полном соответствии с законом сохранения импульса.

ЭНЕРГИЯ

Введённым Декартом понятием импульса (количества движения) пользовались Гюйгенс, Ньютон и другие учёные. Однако в 1686 г. неожиданно появилась статья немецкого философа и учёного Готфрида Вильгельма Лейбница (1646—1716) под названием «Краткое доказательство примечательной ошибки Декарта и других относительно закона природы, согласно которому Бог всегда



Христиан Гюйгенс.

Журнал «Учёные записки», в котором была опубликована статья Г. Лейбница «Краткое доказательство...», 80-е гг. XVII в.





Готфрид Вильгельм Лейбниц.



Лазар Карно.

Картезианцы (от лат. *Cartesius* — латинизированное имя Декарта) — последователи учения Декарта.

1 фунт = 0,4536 кг.
1 локоть = 38–46 см.

сохраняет одно и то же количество движения и которым неправильно пользуются, между прочим, в механической практике».

Декарт мерой движения считал произведение массы на скорость (mv). Однако он не приписал этой величине никакого направления и обращался с ней как с обычным скаляром. В задачах о телах, движущихся до и после столкновения в одном и том же направлении, это не приводило к ошибкам. Но уже в простейшем случае неупругого столкновения двух одинаковых тел, движущихся навстречу друг другу, их суммарное количество движения после удара обращалось в нуль. Получалось, что декартова мера движения совсем не является сохраняющейся величиной. На это и обратил внимание Лейбниц.

По Лейбницу, основной закон природы «состоит не в сохранении одного и того же количества движения, но в том, что необходимо сохранять... одно и то же количество двигательной деятельности, которое означает совсем не то, что понимают картезианцы под количеством движения».

Выяснив, что декартова мера движения «не сохраняется», Лейбниц решил найти ей замену, и это ему удалось. Суть его рассуждений такова. Известно (по словам Лейбница, «это допускают все философы и математики нашего времени»), что для поднятия тела весом 1 фунт на высоту

4 локтя требуется такое же усилие (работа, сказали бы мы сейчас), как и для поднятия тела весом 4 фунта на высоту 1 локоть. Если же предоставить этим телам падать (первому телу с высоты 4 локтя, второму — с высоты 1 локоть), то в момент касания земли скорость первого тела будет в два раза больше скорости второго (здесь Лейбниц ссылается на труды Галилея, из которых следовало, что $v \sim \sqrt{h}$). Значит, они будут обладать разными количествами движения, зато произведения массы на квадрат скорости у них будут одинаковыми! Это произведение (mv^2) Лейбниц выбрал в качестве меры движения, дав ему название «живая сила». «Живая сила», по Лейбницу, выражает то «количество двигательной деятельности», которое сохраняется в природе.

Так возник спор о «мере движения», продолжавшийся в течение нескольких десятилетий. Итогом его было признание существования двух «мер движения»: векторной меры движения — импульса и скалярной меры движения — кинетической энергии.

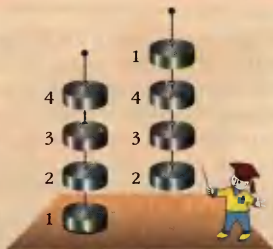
В современной механике *кинетическая энергия* определяется как физическая величина, равная половине произведения массы частицы на её скорость:

$$E_k = \frac{mv^2}{2}.$$

Это уже знакомая «живая сила» Лейбница, только разделённая пополам. Разделить её на 2 предложил в 1829 г. французский механик Гюстав Гаспар Кориолис (1792–1843). Основанием послужила теорема, доказанная за несколько лет до этого французским математиком Лазаром Николя Карно (1753–1823). Согласно его теореме, если тело движется под действием постоянной силы, то удвоенное произведение силы на перемещение и косинус угла между ними равно разности «живых сил» в конце и начале перемещения:

О РАБОТЕ СИЛЫ ТЯЖЕСТИ

Для подъёма четырёх одинаковых грузов на высоту 1 локоть требуется такая же работа, как и для подъёма одного груза на высоту 4 локтя. Ведь, можно считать, что, поднимая все грузы, мы три из них (с номерами 2, 3 и 4) оставляем на месте. И лишь один груз (под номером 1) как бы поднимается вверх, но уже на высоту 4 локтя.





$$2Fs \cos \alpha = mv^2 - mv_0^2. \quad (1)$$

Тогда это было новым словом в практической (технической) механике. Теперь теорему Карно можно увидеть в любом школьном учебнике.

Произведение силы на перемещение и косинус угла между ними в формуле (1) Кориолис вслед за другим французским механиком, Жаном Виктором Понселё (1788—1867), назвал *работой*. Если обозначить её буквой A и записать

$$A = Fs \cos \alpha, \quad (2)$$

то формулу (1) естественно переписать в виде

$$A = \frac{mv^2}{2} - \frac{mv_0^2}{2}. \quad (3)$$

Появившиеся в знаменателях этой формулы «двойки» дали основание Гюставу Кориолису принять за меру движения половину лейбницевской «живой силы».

Единицей работы в СИ является *джоуль* (Дж) — работа, совершаемая постоянной силой в 1 Н на пути в 1 м по направлению действия силы.

В векторной форме определение работы (постоянной силы) можно представить в виде

$$A = \vec{F} \cdot \vec{s}, \quad (4)$$

где точка между векторами силы и перемещения означает их скалярное произведение.

Теорему, выраженную формулой (3), принято называть *теоремой о кинетической энергии*. В соответствии с ней работа сил, действующих на тело (или систему тел), равна изменению кинетической энергии этого тела (или системы тел), т. е.

$$A = E_{K_2} - E_{K_1} = \Delta E_K. \quad (5)$$

Из теоремы следует, что кинетическая энергия равна работе, которую должна совершить сила, приложенная к покоящемуся телу, чтобы сообщить ему заданную скорость движения. Поскольку скорость — ве-

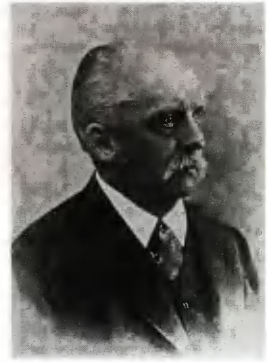
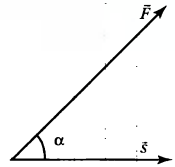
личина относительная, то относительной является и кинетическая энергия тела.

Следующий важный шаг в развитии понятия энергии был сделан в 1847 г. 26-летним немецким учёным Германом Людвигом Фердинандом Гельмгольцем (1821—1894). Изучая движение тел под действием сил, которые постоянны или зависят от расстояния, но не от времени и скорости, он обратил внимание на то, что левую часть уравнения (3) в таком случае всегда можно представить в виде разности значений некоторой величины, характеризующей взаимодействие рассматриваемых тел. Поскольку новая величина имела такую же размерность, что и «живая сила», Гельмгольц предложил и её назвать «силой», но не «живой», а «напряжённой». Впоследствии «напряжённая сила» Гельмгольца была переименована в *потенциальную энергию*.

Потенциальная энергия — это энергия взаимодействия. Она определяется работой, которую должны совершить силы, чтобы переместить тело (или систему тел) из данного положения в нулевое (то, в котором потенциальная энергия считается равной нулю):

$$E_{\Pi} = A_{10}.$$

Выбор нулевого положения произволен. Поэтому потенциальная энергия определена неоднозначно: по отношению к разным нулевым



Герман Людвиг Фердинанд Гельмгольц.

ТЕОРЕМА О КИНЕТИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ

Теорема. Работа сил, действующих на тело, равна изменению его кинетической энергии.

Доказательство. Докажем теорему на примере равноускоренного движения частицы — движения, которое происходит под

действием постоянной силы. В данном случае работу силы можно представить в виде $A = \vec{F} \cdot \vec{s}$. Но по второму закону Ньютона $\vec{F} = m\vec{a}$, следовательно, $A = m\vec{a} \cdot \vec{s}$. В то же время, как известно из кинематики равноускоренного движения, $2\vec{a} \cdot \vec{s} = v^2 - v_0^2$. Подстановка этого выражения в формулу работы даёт:

$$A = \frac{mv^2}{2} - \frac{mv_0^2}{2},$$

что и требовалось доказать.



ТЕОРЕМА О ПОТЕНЦИАЛЬНОЙ ЭНЕРГИИ

Силы, которые рассматривал Гельмгольц при введении понятия потенциальной энергии, обладают важной особенностью: их работа по перемещению частицы из одной точки в другую не зависит от формы траектории, соединяющей эти точки. Например, работа силы тяжести $A = m\vec{g} \cdot \vec{s}$ будет одной и той же независимо от того, какую форму имеет траектория, соединяющая начало и конец перемещения §.

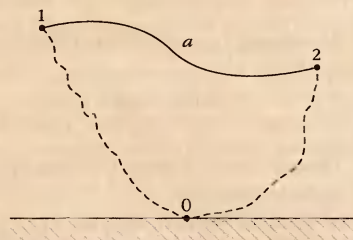
Силы, способные совершать работу и обладающие таким свойством, принято называть *потенциальными*. Большинство из них (сила тяжести, сила упругости, электростатические силы) являются стационарными, т. е. не зависят от времени t . Но есть и такие (как, например, электрическая сила, действующая в переменном электрическом

поле плоского конденсатора), которые с течением времени изменяются. Стационарные потенциальные силы называются *консервативными*. Именно для таких сил (но не сил трения и сопротивления) и формулируется теорема о потенциальной энергии.

Теорема. Работа консервативных сил равна изменению потенциальной энергии, взятому с обратным знаком.

Доказательство. Рассмотрим движение частицы из произвольной точки 1 в какую-либо точку 2 по некоторой траектории a . Обозначим работу, совершаемую при этом консервативными силами, через A . Однако работа консервативных сил не зависит от формы траектории. Следовательно, такая же работа будет совершена и в том случае, если частица станет перемещаться по любой другой траектории, например проходящей через нулевое положение (0). Таким образом, $A = A_{102}$. Но работа A_{102} скла-

дывается из работы на участке 1—0 и работы на участке 0—2. Поэтому $A = A_{10} + A_{02}$, или (если заметить, что работа A_{02} при перемещении частицы из точки 0 в точку 2 равна по модулю и противоположна по знаку работе A_{20} при перемещении частицы в обратном направлении) $A = A_{10} - A_{20}$. Работа же A_{10} — это потенциальная энергия тела в точке 1, а работа A_{20} — потенциальная энергия данного тела в точке 2. Получается $A = E_{П1} - E_{П2} = -\Delta E_{П}$, что и требовалось доказать.



уровням потенциальная энергия одного и того же тела (системы тел) будет различной.

Например, потенциальная энергия тела, взаимодействующего с Землей (когда сила тяжести $\vec{F} = m\vec{g} = \text{const}$), может быть найдена по формуле $E_{П} = mgh$, где h — высота центра тяжести тела, отсчитываемая от нулевого уровня. Принимая за нулевой уровень поверхность Земли, пола в комнате или, наконец, стола, над которым находится рассматриваемое тело, мы получим разные значения h и соответственно разные значения потенциальной энергии.

Для потенциальной энергии справедлива теорема, аналогичная теореме о кинетической энергии. По *теореме о потенциальной энергии* работа консервативных сил при любом движении тела (системы тел) равна разности потенциальных энергий в начальном и конечном состояниях:

$$A = E_{П1} - E_{П2} = -\Delta E_{П}. \quad (6)$$

Рассматривая *консервативные системы*, т. е. системы, в которых действуют лишь консервативные силы (наряду с силами, вообще не совершающими никакой работы), Гельмгольц пришел к выводу, что одна и та же величина (работа) может быть выражена и через приращение кинетической энергии системы, и через убыль её потенциальной энергии. Это означает, что всякое увеличение кинетической энергии рассматриваемой системы всегда сопровождается соответствующим уменьшением её потенциальной энергии, и наоборот:

$$E_{К2} - E_{К1} = E_{П1} - E_{П2}.$$

Если переписать равенство в виде

$$E_{К2} + E_{П2} = E_{К1} + E_{П1}, \quad (7)$$

станет ясно, что сумма кинетической и потенциальной энергий рассматриваемой системы в процессе её движения не меняется (сохраняется). На основании этого можно объеди-



нить обе величины в одну — полную механическую энергию системы:

$$E = E_K + E_{\Gamma}.$$

Из соотношения (7) следует, что $E = \text{const}$.

Итак, при любых процессах, происходящих в консервативной системе, её полная механическая энергия остаётся неизменной. Это утверждение называется *законом сохранения механической энергии*.

Поскольку кинетическую энергию Гельмгольц называл «живой силой», а потенциальную энергию — «напряжённой», то первая формулировка закона сохранения энергии, данная Гельмгольцем в 1847 г., звучала следующим образом: «Когда тела природы действуют друг на друга с силами притяжения или отталкивания, не зависящими от времени и скорости, то сумма живых сил и напряжённых сил остаётся постоянной».

МОМЕНТ ИМПУЛЬСА

Закон сохранения импульса (количества движения) был сформулирован Декартом применительно к поступательно движущимся телам. О сохранении вращательного движения он не говорил ничего. Лишь сто лет спустя Леонард Эйлер, а затем другой швейцарский учёный, физик и математик Даниил Бернулли (1700—1782), изучая вращение системы тел вокруг неподвижного центра, пришли к выводу, что и для вращательного движения существует свой закон сохранения. Оказалось, что при отсутствии внешних воздействий в процессе такого движения сумма произведений массы каждого тела на его скорость и расстояние от оси вращения остаётся постоянной. Немного позднее французский учёный Патрик Дарси выразил эти произведения через площади, заметаемые радиус-векторами частиц за одинаковое время, и тем

самым позволил установить связь нового закона с уже давно известным законом движения планет, открытым Иоганном Кеплером.

Действительно, ещё в начале XVII столетия Кеплер установил, что «площадь, описываемая отрезком Солнце — планета, является мерой времени, необходимого для прохождения планетой соответственной дуги орбиты». Иными словами, скорость изменения площади, заметаемой радиус-вектором планеты, есть величина постоянная:

$$\frac{\Delta S}{\Delta t} = \text{const}. \quad (8)$$

Для того чтобы понять, почему это так, выразим отношение $\Delta S/\Delta t$ через импульс планеты $p = mv$, где $v = \Delta l/\Delta t$. Из рисунка видно, что $\Delta S/\Delta t$ (где ΔS — площадь закрашенного сектора, который при бесконечно малых Δt неотличим от треугольника) может быть найдено следующим образом:

$$\begin{aligned} \frac{\Delta S}{\Delta t} &= \frac{1/2rh}{\Delta t} = \frac{r\Delta l \sin \varphi}{2\Delta t} = \\ &= \frac{rv \sin \varphi}{2} = \frac{rp \sin \varphi}{2m}. \end{aligned}$$

Полученное равенство показывает, что закон (8) будет выполняться лишь в случае, когда величина $rp \sin \varphi$ будет неизменной. Эта величина и есть *момент импульса*. Если обозначить его буквой L , то можно записать:

$$L = rps \sin \varphi$$

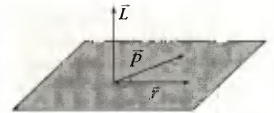
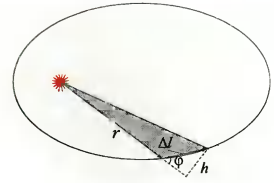
или в векторном виде

$$\vec{L} = \vec{r} \times \vec{p},$$

где крестик между векторами означает их векторное произведение.

Таким образом, *моментом импульса* частицы называется векторное произведение радиус-вектора частицы на её импульс.

Направление вектора $\vec{L}$ определяется по *правилу буравчика*: если приложить радиус-вектор частицы и





ЛЕОНАРД ЭЙЛЕР

На мемориальной доске в швейцарском городе Рихен, где прошли первые годы жизни Леонарда Эйлера, написано: «Он был большой учёный и добрый человек».

Выдающийся математик и физик Леонард Эйлер родился в 1707 г. в швейцарском городе Базеле. Его отец, пастор Эйлер, сам обучал сына математике. Леонард поражал своими способностями. Уже в 13 лет он поступил в Базельский университет; здесь его преподавателем был известный математик Иоганн Бернулли. В 17 лет Эйлеру присудили степень магистра за сравнение философских систем Рене Декарта и Исаака Ньютона. В 24 года Эйлер стал профессором и членом Петербургской Академии наук.

О работоспособности учёного слагли легенды. Однажды он за три дня выполнил для Петербургской Академии работу, на которую отводилось несколько месяцев. В период научного расцвета из-под его пера в год выходило до 100 статей, примерно 800 страниц текста! Эйлер вырастил пятерых детей и 38 внуков. Как заметил современник учёного, он писал свои бесмертные произведения «с ребёнком на коленях, с кошкой на спине».

Эйлер обладал великолепной фотографической памятью. Если учёного мучила бессонница, он не «считал стадо овец», а вычислял первые шесть степеней натуральных чисел до 20 и потом без труда называл их по памяти ещё несколько дней спустя (114 чисел, среди которых были и восьмизначные).

Слава одного из наиболее великолепных умов эпохи привлекала к нему внимание сильных мира сего. Начав свою научную карьеру в Петербурге, он затем состоял на службе у прусского короля Фридриха II, но Екатерина II снова переманила его, предложив учёному вернуться в Петербургскую Академию на любых, удобных ему условиях.

Леонард Эйлер мечтал создать единую картину мира, полагая, что все оптические, электрические, магнит-

ные, тепловые и другие явления суть взаимодействие «грубой» материи и более «тонкого» вещества — эфира.

В оптике Эйлер построил свою волновую теорию света, отвергнув корпускулярную теорию Ньютона. Он понял, что цвет тел напрямую зависит от частоты светового луча; максимальная длина волны соответствует красным лучам, а минимальная — фиолетовым.

Эйлер придумал, как описать положение твёрдого тела в пространстве с помощью трёх углов, получивших с тех пор название *углы Эйлера*. Он много сделал для развития математического анализа и его применения к задачам движения. Теория Эйлера была изложена в годы первого пребывания учёного в Петербурге в 1736 г. в сочинении «Механика, или Наука о движении, изложенная аналитически». Как известно, Ньютон в своих «Математических началах» старался избегать использования аналитических рассуждений, заменяя их, где только возможно, геометрическими. Это себя оправдало, поскольку в те времена применение сложного и ещё неразвитого аппарата исчисления бесконечно малых могло значительно затруднить восприятие теории современниками. Эйлеру удалось изложить классическую ньютоновскую механику в гораздо более компактном и систематизированном виде, чем у Ньютона. В частности, второму закону Ньютона привычный нам вид $F = ma$ придал именно Эйлер.

Учёный понял, что «теплота является некоторым движением мельчайших частиц тел». Вместе с Даниилом Бернулли он является создателем механики жидкостей и газов. Он также первый правильно рассчитал скорость звука.

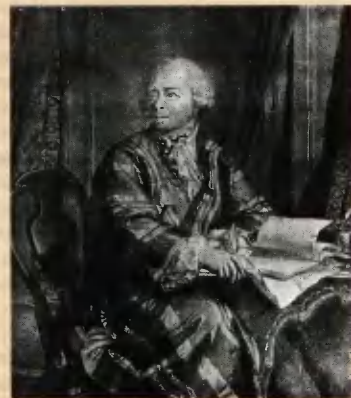
Несмотря на международное признание, Эйлер никогда не страдал такими характерными для учёных XVIII в. пороками, как заносчивость и чванство. Он был добр, скромен и крайне прост в общении, хотя и обладал большим чувством собственного достоинства. Эйлер был независим и знал себе цену. Иногда мог вспылить, но

быстро отходил и, как писал его самый известный ученик Николай Фусс: «Умение снять с себя учёный вид, скрыть своё превосходство и приспособиться в общении к другим, менее ярким индивидуальностям, является настолько редким, что наличие этого качества у Эйлера следует считать его заслугой».

В разговоре Эйлер мог без труда признать превосходство собеседника, в своих многочисленных работах часто восторгался успехами других математиков и со скрупулёзной честностью ссылался на них. Эти его качества и авторитет сыграли немалую роль в улучшении отношений между европейскими учёными того времени, большинство которых были очень самолюбивы, завистливы и с неприязнью относились к коллегам.

В характере Эйлера было немало детских черт. Один его родственник вспоминал, что Эйлеру доставляли удовольствие наивные кукольные спектакли, «на которые он бежал со всем рвением и где мог просиживать часами, лопаясь от смеха».

Эйлер был глубоко верующим человеком. Именно вера дала ему силы перенести выпавшие на его долю несчастия: смерть в младенчестве восьмерых детей, потерю зрения. Умер Леонард Эйлер в 1783 г.



Леонард Эйлер. Гравюра. XVIII в.



вектор её импульса к одной точке, то при вращении рукоятки буравчика от вектора $\vec{r}$ к вектору $\vec{r}'$ (по наименьшему углу) направление поступательного движения буравчика укажет направление момента импульса. Складывая моменты импульсов частиц, получаем полный момент импульса системы этих частиц.

Момент импульса является третьей динамической переменной, для которой существует фундаментальный закон сохранения. *Закон сохранения момента импульса* гласит: при любых процессах в изолированной системе её полный момент импульса остаётся неизменным, т. е. $\vec{L} = \text{const}$.

Момент импульса системы может изменяться лишь при наличии ненулевого момента внешних сил: $\vec{M} \neq 0$. Момент силы, т. е. векторное произведение радиус-вектора $\vec{r}$ на силу $\vec{F}$, по отношению к моменту импульса играет ту же роль, что и просто сила по отношению к импульсу.

Если сила определяет скорость изменения импульса

$$\frac{\Delta \vec{p}}{\Delta t} = \vec{F},$$

то момент силы определяет скорость изменения момента импульса

$$\frac{\Delta \vec{L}}{\Delta t} = \vec{M}.$$

Если применить последнее уравнение к системе частиц, то под $\vec{L}$ в нём следует понимать полный момент импульса всей системы, а под $\vec{M}$ — суммарный момент внешних сил, действующих на неё. При $\vec{M} = 0$ момент импульса $\vec{L} = \text{const}$.

Из закона сохранения момента импульса следует, что при $\vec{M} = 0$ в процессе вращения системы вокруг оси любое изменение расстояния от тел до оси вращения должно сопровождаться изменением скорости их обращения вокруг этой оси. С увеличением расстояния скорость вращения уменьшается, с уменьшением — возрастает. Например, гимнаст, совер-

шающий сальто, чтобы успеть сделать в воздухе несколько оборотов, во время прыжка свёртывается клубком. Балерина или фигуристка, кружась в пируэте, разводит руки, если хочет замедлить вращение, и, наоборот, прижимает их к телу, когда старается вращаться как можно быстрее.

ЗАКОНЫ СОХРАНЕНИЯ И СВОЙСТВА СИММЕТРИИ ПРОСТРАНСТВА И ВРЕМЕНИ

Законы сохранения оказались столь универсальными, что после надлежащего обобщения стали применяться не только в классической механике, но и в теории относительности и даже в квантовой физике. Причины этой универсальности были неясны до тех пор, пока не установили их связь со свойствами симметрии пространства и времени. Впервые на существование такой связи в 1904 г. указал Г. Гамель, однако его работа в течение многих лет оставалась практически неизвестной. В более общем виде природа законов сохранения была вскрыта в 1918 г. немецким математиком Эмми Нётер (1882—1935).



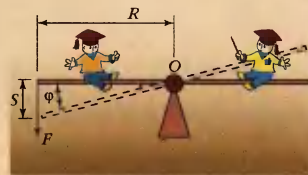
Эмми Нётер.

РАБОТА И ВРАЩЕНИЕ

Найдём работу, которую совершает сила $\vec{F}$ при повороте рычага на малый угол φ . Если измерять этот угол в радианах, то его можно представить в виде отношения длины дуги s к радиусу R : $\varphi = s/R$. При малом φ длина дуги s практически совпадает с величиной перемещения конца рычага. Подставляя значение $s = R\varphi$ в формулу работы $A = Fs$, получаем: $A = FR\varphi$. Но произведение FR есть момент M силы относительно оси вращения, проходящей через точку O . Окончательно находим:

$$A = M\varphi.$$

Данная формула справедлива не только для рычага, но и любого другого твёрдого тела, совершающего вращение вокруг какой-либо оси. Во всех случаях совершаемая при этом работа оказывается равной произведению суммарного момента сил на угол поворота.





Изотропия (от греч. «изос» — «равный», «одинаковый» и «тропос» — «поворот», «направление») — независимость свойств пространства от направления.

«Отыскивание законов физики — это вроде детской игры в кубики, из которых нужно собрать целую картинку. У нас огромное множество кубиков, и с каждым днём их становится всё больше. Многие валяются в стороне и как будто бы не подходят к остальным. Откуда мы знаем, что все они из одного набора? Откуда мы знаем, что вместе они должны составить цельную картинку? Полной уверенности нет, и это нас несколько беспокоит. Но то, что у многих кубиков есть нечто общее, вселяет надежду. На всех нарисовано голубое небо, все сделаны из дерева одного сорта. Все физические законы подчинены одним и тем же законам сохранения».

Ричард Фейнман

Согласно *теореме Нётер*, каждому непрерывному преобразованию симметрии физических законов соответствует сохранение определённой динамической величины. Наиболее важными примерами подобных преобразований являются параллельный перенос в пространстве (трансляция), сдвиг во времени и поворот в пространстве. Первое из этих преобразований является преобразованием симметрии вследствие однородности пространства, второе — вследствие однородности времени, а третье — вследствие изотропии.

1. Симметрии законов физики по отношению к параллельному переносу в пространстве соответствует сохранение импульса изолированной системы.

В рамках представлений ньютоновской механики это объясняется тем, что при параллельном переносе изолированной системы как целого из одного места в другое никаких изменений в характере взаимодействий частиц системы произойти не должно (все места в однородном пространстве физически эквивалентны). Следовательно, при параллельном переносе потенциальная энергия системы останется неизменной. А если так, то работа действующих в системе сил, совершаемая при рассматриваемом перемещении, будет равна нулю. Но при произвольном перемещении такое возможно, лишь когда эти силы в сумме дают нуль. Последнее является условием сохранения импульса.

2. Симметрии законов физики по отношению к сдвигу во времени соответствует сохранение полной механической энергии изолированной потенциальной системы.

Действительно, в результате сдвига во времени свойства изолированной системы должны оставаться неизменными (все моменты времени физически эквивалентны). Поэтому потенциальная энергия взаимодействия частиц системы не должна

PERPETUUM MOBILE

Мартын:

— Что такое *perpetuum mobile*?

Бертольд:

— *Perpetuum mobile*, то есть вечное движение. Если найду вечное движение, то я не вижу границ творчеству человеческому...

А. С. Пушкин.

Сны из рыцарских времён

Сегодня поиски конструкции вечного двигателя могут показаться нам забавными. Однако на протяжении многих веков человек наблюдал вокруг себя «вечные» процессы: восход и заход светил, движение облаков, течение воды... Кажется, что они не требуют никаких затрат для своего поддержания. Неудивительно, что многие изобретатели были увлечены идеей создания машины, которая работала бы сама по себе вечно, не требуя вмешательства извне.

Увы, все попытки сводил на нет немолотый закон сохранения энергии. Правда, большинство дошедших до нас вариантов «вечного подвижного» (именно так переводится с латыни название этой статьи) появилось тогда, когда этот закон известен не был. Зато знали и использовали многое другое: например, водяное мельничное колесо, которое вращается под действием падающей на него с плотины воды.

Но разность уровней воды можно создать и другим способом. С античных времён известно такое устройство, как архимедов винт (сейчас он применяется, в частности, в мясорубках). Архимедов винт не только улучшил античные ирригационные системы, но и породил массу проектов вечного двигателя. В общих чертах их конструкция такова: архимедов винт вращается водяным колесом и поднимает воду, которая падает и заставляет это колесо крутиться, вращать винт и поднимать следующую порцию воды...

Этот проект скрупулёзно рассмотрел в середине XVII в. Джон Уилкинс (1614—1672), епископ Честерский (подобно многим духовным лицам своего времени, он также был писателем и учёным). Уилкинс обнаружил, что поднимаемая вода не об-



разует значительного потока и не может вращать винт, даже если на нём укрепить несколько колёс.

Предлагались и другие механизмы для подъёма воды: в них пытались использовать силы поверхностного натяжения. Такие силы действуют, например, на границе раздела жидкости и твёрдого тела: именно они втягивают чернила в промокашку, держат на воде жучков-водомеров и заставляют поверхность налитой в стакан воды изгибаться вверх возле его стенок. Однако машина, в которой используется подъём жидкости по тонкой трубке (капилляру) или волокнистому фитилю, не может работать вечным двигателем по очень простой причине: те же силы поверхностного натяжения, поднимающие жидкость вверх, не дадут её каплям оторваться у конца фитиля или трубки.

Ещё один тип «жидкостного» вечного двигателя основан на применении закона Архимеда. В таких конструкциях используется замкнутая в кольцо верёвка или цепочка из тел (как правило, шаров) легче воды, часть которой

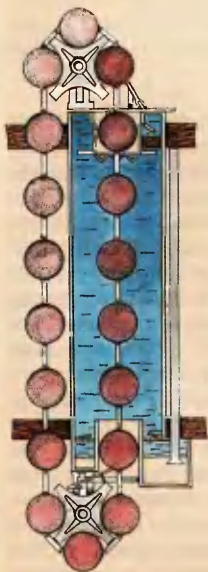
находится в жидкости, а часть — вне её. По замыслу изобретателей, архимедова сила должна выводить эту цепочку из равновесия. Увы, такая система не может прийти в движение: ведь для того чтобы жидкость не выливалась из неё, внизу необходимо предусмотреть какое-нибудь «запирающее устройство», удерживающее воду, — например, клапан. Однако, чтобы шар прошёл через клапан, потребуются затраты энергии — причём тем большие, чем выше столб воды и крупнее погружаемые в неё тела. Выталкивающей силы не хватит даже на это.

Но, пожалуй, самая «долгоживущая» идея конструкции вечных двигателей — это использование неравновесных грузов. В простейшем её варианте предлагается замкнутую цепочку шаров (а лучше — цилиндров) поместить на призму. На каждой её грани нужно расположить неодинаковое количество шаров. Тогда цепочка должна начать скользить: на первый взгляд 14 шаров с одной стороны и лишь 8 — с другой не могут уравновесить друг друга.

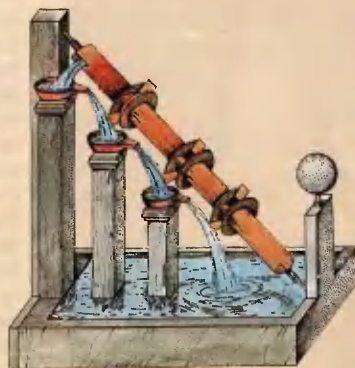
Однако в этом рассуждении есть физическая ошибка. Её обнаружил нидерландский математик и механик Симон Стевин (1548—1620): если одна часть цепочки перетягивает другую, то шары должны двигаться всё быстрее и

быстрее. Значит, не прикладывая никаких усилий, их можно разогнать до бесконечной скорости — но это явно противоречит здравому смыслу. Рассуждая таким образом, Стевин пришёл к выводу, с которым сейчас знаком любой школьник, умеющий решать задачи по динамике: в механике важна не сама величина силы, а её проекция на интересующее нас направление. Поэтому два шара и способны уравновесить остальные. Кстати, идея о невозможности вечного движения помогла Стевину решить задачу, с которой не могли справиться самые выдающиеся механики античности: каким грузом можно удерживать в покое тело, находящееся на наклонённой к горизонту плоскости.

Так что «перпétуум мобиле», вечный двигатель, остаётся лишь мечтой — недостижимой, красивой и манящей. Многие ловкачи использовали привлекательность идеи вечного движения, зарабатывая деньги показом моделей «самодвижущихся» агрегатов. В действительности в каждом из них были спрятаны или часовой механизм с пружиной, или незаметно подключённый электродвигатель, позволявшие им двигаться довольно долго — однако же не вечно. Можно ввести в заблуждение простаков, но природе тем не менее не обманешь...



Водяной вечный двигатель.



Вечный двигатель на основе винта Архимеда.



Машина Стевина. Музей физического факультета МГУ.



зависеть от времени. Её изменение $\Delta E_{\text{п}}$ может быть обусловлено лишь перемещениями частиц внутри системы. Однако в таком случае оно будет совпадать с совершаемой работой, взятой с обратным знаком (по теореме о потенциальной энергии). Сама же эта работа равна изменению кинетической энергии системы $\Delta E_{\text{к}}$ (по теореме о кинетической энергии). Таким образом, $\Delta E_{\text{к}} = -\Delta E_{\text{п}}$, откуда $\Delta(E_{\text{к}} + E_{\text{п}}) = 0$ и, следовательно, $E_{\text{к}} + E_{\text{п}} = \text{const}$.

3. Симметрии законов физики по отношению к пространственным вращениям соответствует сохранение момента импульса изолированной системы.

В самом деле, повернув изолированную систему на некоторый угол, мы не обнаружим в её свойствах никаких изменений (все направления в изотропном пространстве физически эквивалентны). Значит, изменение её потенциальной энергии и, следовательно, работа сил, действу-

ющих в системе, окажутся равными нулю. Но работа сил A , совершаемая при повороте, определяется произведением угла поворота на суммарный момент сил M . Поскольку $A = 0$, то, следовательно, и $M = 0$. Последнее является условием сохранения момента импульса.

Итак, мы рассмотрели три фундаментальных закона — закон сохранения импульса, закон сохранения энергии и закон сохранения момента импульса. Однако ими не исчерпываются законы сохранения, существующие в природе. Особенно ими богата физика элементарных частиц, имеющая в своём распоряжении законы сохранения чётности, странности и даже очарования. В данной области физики подобные законы часто являются основными источниками информации о свойствах изучаемых объектов. Поэтому поиски симметрии, из которой они вытекают, являются важнейшей задачей современной физики.

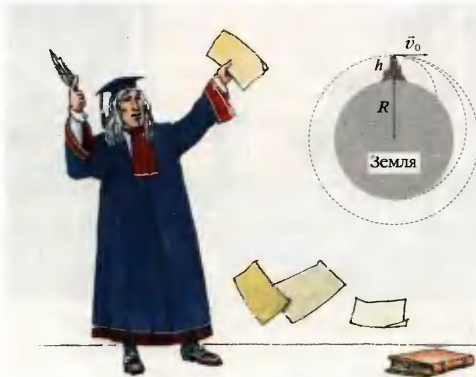
ДИНАМИКА КОСМИЧЕСКИХ ПОЛЁТОВ

Космодром Байконур ныне находится на территории Казахстана и используется Россией на правах аренды.

В XVII столетии Исаак Ньютон в «Математических началах натуральной философии» привёл рисунок, изображающий траекторию движения яд-

ра, вылетевшего в горизонтальном направлении из пушки, расположенной на высокой горе. Учёный заметил, что если пренебречь сопротивлением воздуха, то по мере возрастания начальной скорости ядро будет падать всё дальше и дальше от места выстрела. Поэтому при некотором значении начальной скорости ядро может «окружить всю Землю и даже уйти в небесные пространства и продолжать удаляться до бесконечности».

Через несколько столетий фантастическая ситуация, рассмотренная Ньютоном, стала реальностью. Весной 1955 г. в Советском Союзе было принято решение о строительстве космодрома Байконур, а 4 октября 1957 г. с него стартовала ракета, с по-





мощью которой запущен первый в мире искусственный спутник Земли.

Теория движения спутника по круговой орбите довольно проста. Согласно второму закону Ньютона, произведение массы спутника m на его ускорение a равно действующей на спутник силе тяжести F , т. е. $ma = F$. Но ускорение при равномерном движении по окружности находится по формуле $a = v^2/r$, где $r = R + h$ — радиус этой окружности, R — радиус Земли, h — высота орбиты. Сила тяжести определяется выражением

$$F = mg = GMm/r^2,$$

где M — масса Земли.

Таким образом,

$$m \frac{v^2}{r} = G \frac{Mm}{r^2},$$

откуда

$$v = \sqrt{G \frac{M}{r}} = \sqrt{G \frac{M}{R+h}}.$$

Это так называемая *круговая скорость* спутника. Её значение на высоте h , пренебрежимо малой по сравнению с радиусом Земли R , называется *первой космической скоростью*:

$$v_1 = \sqrt{G \frac{M}{R}} = 7,9 \text{ км/с}.$$

Для запуска искусственных спутников применяют ракеты, поднимающие спутник на заданную высоту и сообщаящие ему в горизонтальном направлении требуемую скорость. После этого спутник отделяется от ракеты-носителя и продолжает дальнейшее движение под действием гравитационного поля планеты.

Если запускать спутники с разными скоростями, то с увеличением скорости (по сравнению с первой космической) тело сначала будет двигаться по эллипсам с фокусом в центре Земли, а затем перейдёт на параболическую орбиту. В этом случае тело (космический аппарат) покинет пределы земного притяжения и сможет направиться к другой планете.

РАСЧЁТ ВТОРОЙ КОСМИЧЕСКОЙ СКОРОСТИ

Вторая космическая скорость может быть найдена с помощью закона сохранения механической энергии. Эта энергия включает в себя как кинетическую энергию движения ($E_k = mv^2/2$), так и потенциальную энергию взаимодействия тела с Землёй ($E_{\text{п}} = -GMm/r$):

$$E = \frac{mv^2}{2} - \frac{GMm}{r}.$$

В момент сообщения телу второй космической скорости его полная механическая энергия равна:

$$E_1 = \frac{mv_2^2}{2} - \frac{GMm}{R}.$$

По мере удаления от Земли абсолютная величина потенциальной энергии тела, а также его скорость будут убывать, стремясь к нулю при $r \rightarrow \infty$. Поэтому на бесконечности $E_2 = 0$. По закону сохранения энергии $E_1 = E_2$ и, следовательно,

$$\frac{mv_2^2}{2} - \frac{GMm}{R} = 0, \text{ откуда } v_2 = \sqrt{2 \frac{GM}{R}} = \sqrt{2} v_1.$$

Минимальная скорость, которую нужно сообщить телу вблизи поверхности Земли, чтобы оно покинуло нашу планету, двигаясь по незамкнутой траектории, называется *второй космической скоростью*. Вторая космическая скорость в $\sqrt{2}$ раз больше первой космической и составляет 11,2 км/с.



Старт ракетно-космической системы «Энергия» — «Буран». СССР. 1988 г.



Получив вторую космическую скорость, тело уходит из области земного притяжения и становится спутником Солнца. Минимальная скорость, которую нужно сообщить телу вблизи поверхности Земли, чтобы оно смогло покинуть Солнечную систему, двигаясь по незамкнутой траектории, называется *третьей космической скоростью*. Если космический корабль запускается в направлении, совпадающем с направлением скорости орбитального движения Земли, то $v_3 = 16,6$ км/с. В системе отсчёта, связанной с Землёй, эта скорость обеспечит уход по гиперболической траектории.

ДВИЖЕНИЕ В ОКОЛОЗЕМНОМ ПРОСТРАНСТВЕ

Так выглядит
Земля из космоса.



В наше время полёты космических аппаратов стали делом обыденным. Десятки спутников различного назначения постоянно движутся в околоземном пространстве. Они осуществляют связь на огромных территориях земной поверхности; передают данные о перемещениях циклонов и антициклонов в атмосфере, необходимые для точного предсказания погоды; ведут наблюдения за процессами в околоземном пространстве и выполняют массу

другой полезной работы. Спутниковое телевидение и спутниковая антенна стали такими же привычными, как радио или телефон.

Рассмотрим, например, движение спутника по *геостационарной* (от греч. «ге» — «земля» и лат. stationarius — «стоящий», «неподвижный») орбите, когда он, двигаясь в экваториальной плоскости, находится всё время над одной и той же точкой земного экватора. Уравнение движения спутника при этом имеет вид

$$m \frac{v^2}{r} = G \frac{mM}{r^2},$$

где $v = 2\pi R/T$, $T = 24$ ч. Приведённое уравнение позволяет определить радиус орбиты геостационарного спутника:

$$r = \sqrt[3]{T^2 GM / 4\pi^2} = 42\,300 \text{ км.}$$

Прямолинейно распространяющиеся высокочастотные сигналы могут связать через такой спутник точки, находящиеся чуть ли не на противоположных сторонах земной поверхности. А три таких спутника, расположенные на экваториальной орбите, обеспечивают глобальную круглосуточную радио- и телевизионную связь.

Движение искусственных спутников на малых высотах отличается от траекторий, описываемых законами Кеплера. Из-за осевого вращения Земли при каждом следующем обороте спутник движется над разными точками её поверхности. Если бы строго выполнялись законы Кеплера, то *трасса* (нем. Trasse) движения спутника, т. е. проекция его орбиты на земную поверхность, смещалась бы вследствие этого на запад примерно на 15° в час. Но на практике смещение оказывается иным. Одна из причин — несферичность Земли.

Другой причиной, приводящей к изменению траекторий движения спутников по сравнению с кеплеровскими орбитами, является тормозящее действие земной атмосферы.

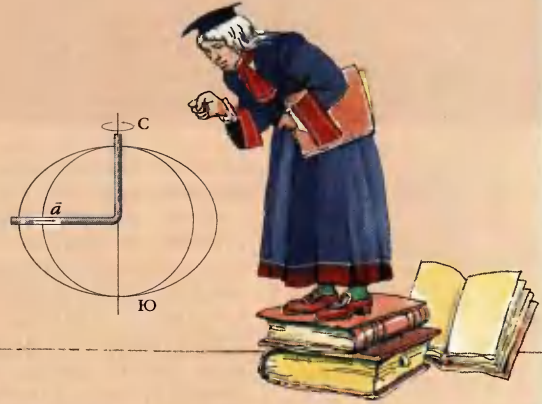


ЗЕМЛЯ НЕ ЯВЛЯЕТСЯ ШАРОМ

Степень отклонения формы Земли от шарообразной впервые оценил ещё Исаак Ньютон. Для своих расчётов он провёл следующий мысленный эксперимент. Пусть трубка с водой, изогнутая под прямым углом, проходит через Северный полюс к центру Земли и оттуда к экватору. Трубка заполнена водой так, что уровень воды у Северного полюса совпадает с поверхностью Земли. Каким будет он в этом случае в трубке у экватора? Давление на дне осевой трубки (в центре Земли) обусловлено весом воды в ней. Однако каждый элемент воды в экваториальной трубке вращается по окружности вместе с Землёй и на него должна действовать результирующая сила, направленная к центру. Данная сила может возникнуть только за счёт разности давлений. Поэтому, чтобы обеспечить равенство давлений в центре Земли, уровень воды в экваториальной трубке должен быть выше, чем в осевой.

Отсюда Ньютон сделал вывод, что Земля не является шаром. Она слегка сплюснута с полюсов. Для отношения разности земных диаметров к экваториальному диаметру учёный нашёл значение $\Delta D/D = 1/298$. Современные данные, полученные на основании измерений траекторий спутников, дают значение $\Delta D/D$, заключённое между

$1/298,2$ и $1/298,3$. Из-за сплюснутости Земли плоскость орбиты спутника перестаёт сохранять неизменное положение относительно удалённых звёзд. Происходит её поворот вокруг земной оси в направлении, противоположном вращению спутника.

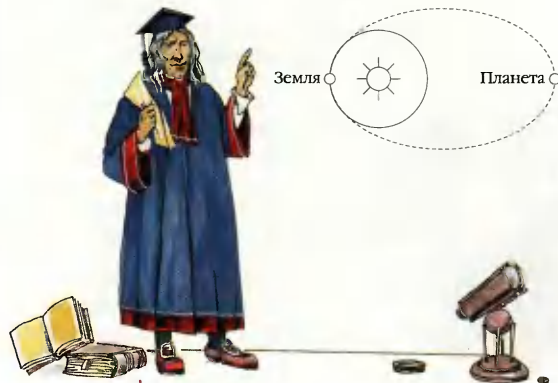


Хотя плотность воздуха в атмосфере и уменьшается с высотой, из-за большой скорости спутники быстро теряют энергию под действием силы трения вплоть до высот порядка 160 км. При этом сначала происходит переход от эллиптической орбиты к круговой, а затем траектория начинает быстро приближаться к Земле и спутник падает на её поверхность. Защитные покрытия и парашюты обеспечивают при необходимости его мягкую посадку. Анализ движения спутников в атмосфере позволяет получить точные данные о её плотности в широком интервале высот.

Земля, движение в простейшем случае происходит по эллипсу с Солнцем в одном из фокусов. Пытаясь сократить время полёта, можно так выбрать траекторию, чтобы она проходила вблизи других планет. Их сила притяжения приведёт к дополнительному ускорению корабля. Например, если при полёте на Уран использовать траекторию, проходящую

ПОЛЁТЫ К ДРУГИМ МИРАМ

При межпланетных полётах целесообразно производить запуск космического корабля в направлении движения Земли вокруг Солнца, чтобы максимально использовать энергию этого движения. При полёте к планетам, более удалённым от Солнца, чем





Марсоход «Соджнер» на поверхности Марса (справа у большого камня). Снимок с борта спускаемого аппарата АМС «Марс Пасфайндер». США. 1996 г.

вблизи Юпитера, можно сократить время перелёта в три раза.

Полёт человека к другим планетам становится вполне реальным и даже планируемым событием. Такие проекты уже давно разрабатываются и в России, и в США. Наибольший интерес представляет Марс, где, несмотря на крайне суровые условия, возможно существование простейших форм жизни. Их обнаружение позволило бы лучше понять происхождение и эволюцию жизни на Земле. Полёт на Марс может состояться в первые десятилетия XXI в.

Но главной мечтой человека всегда был полёт к звёздам. Однако на пути к достижению этой цели возникает ряд принципиальных трудностей.

Первая проблема — это фактор времени. Расстояния до ближайших звёзд, где, возможно, существует разумная жизнь на окружающих их планетах (если таковые имеются), в лучшем случае исчисляются десятками световых лет. Световой год равен расстоянию, которое проходит свет за один год, т. е. $9,46 \cdot 10^{15}$ м. Даже если двигаться со скоростью, сравнимой со световой, и учесть релятивистское замедление времени, всё равно путешествие продлится довольно много лет. Ко всему прочему, эффект замедления времени имеет серьёзный морально-психологический аспект. Космонавты вернутся на Землю, где пройдёт уже несколько сотен или даже тысяч лет. Если

учесть, как изменился мир за последние столетия, то возвращение космонавтов будет равноценно прибытию на новую, незнакомую планету, не говоря о том, что для близких людей они будут потеряны навсегда уже в момент старта с Земли.

Вторая принципиальная трудность состоит в прохождении космического корабля через газовые и пылевые облака, каких в космосе немало. Если корабль движется со скоростью, близкой к световой, воздействие этих облаков приведёт к испарению любых защитных экранов и его торможению. Совершить какой-либо обходной манёвр при таких скоростях невозможно.

Но главная проблема межзвёздных перелётов заключается в самом способе доставки космонавтов. Для того чтобы понять её, нужно вернуться к истокам космонавтики, заложенным нашим знаменитым соотечественником — Константином Эдуардовичем Циолковским (1857—1935). Это был удивительный человек, мечтатель и практик в одном лице. Вся его жизнь посвящена единственной цели — полёту к звёздам. Он впервые обосновал возможность использования ракет для межпланетных полётов и нашёл их конкретные инженерные решения. Полученное им в 1897 г. соотношение, позволяющее рассчитать запасы топлива, необходимые для достижения ракетой той или иной скорости, в космодинамике называют *формулой Циолковского*.

Согласно формуле Циолковского, отношение начальной массы, которой должна обладать ракета на старте, к её конечной массе (после сгорания топлива) m_0/m очень быстро растёт с увеличением отношения скорости v , развиваемой ракетой, к скорости w истечения газов. У современных ракет на химическом топливе скорость истечения не превосходит 4 км/с. Но даже если принять заведомо завышенное значение $w = 10$ км/с, то межзвёздные полёты

Константин Эдуардович Циолковский.





на кораблях с таким топливом совершенно нереальны по причине колоссальных стартовых масс. Для достижения скорости корабля, равной, например, $1/10$ скорости света ($v = 0,1c$), по формуле Циолковского получается значение $m_0/m \approx$

$\approx 7,6 \cdot 10^{1302}$. Можно сравнить: масса Галактики составляет «всего лишь» величину порядка 10^{41} кг. Таким образом, стартовая масса корабля должна в невообразимое число раз превосходить массу всей нашей звёздной системы!

ФОРМУЛА ЦИОЛКОВСКОГО

Ракета — это тело переменной массы. По мере сгорания топлива из ракетного двигателя выбрасывается газовая струя, уносящая с собой часть начальной массы ракеты. Общая теория движения тел переменной массы была разработана профессором Петербургского политехнического института Иваном Всеволодовичем Мешерским (1859—1935). Его труд был опубликован осенью того же года, когда Циолковский вывел свою знаменитую формулу. Содержащееся в данной работе уравнение (*уравнение Мешерского*) позволяет получить формулу Циолковского более простым способом, чем это было сделано её автором.

Когда из ракеты с некоторой скоростью w (относительно неё) выбрасываются продукты сгорания топлива, они (в соответствии с третьим законом Ньютона) действуют на ракету с силой, противоположной по направлению скорости их истечения. Эту силу называют *реактивной силой тяги*.

В отсутствие внешних сил импульс системы, состоящей из ракеты и выбрасываемых из неё газов, должен оставаться неизменным. Следовательно, импульс, уносимый газовой струей, должен компенсироваться соответствующим приращением импульса ракеты. Значит, чем больше скорость истечения газа w и масса газа, выбрасываемая за каждую секунду движения, т. е. $-dm/dt$, тем больше будет импульс, приобретаемый ракетой за единицу времени. Последний определяет силу, действующую на ракету. Таким образом, реактивная сила тяги оказывается равной

$$F = -w \frac{dm}{dt}$$

и уравнение движения ракеты (уравнение Мешерского) имеет вид

$$m \frac{dv}{dt} = -w \frac{dm}{dt}, \text{ или } \frac{dm}{m} = \frac{dv}{w}$$

где m и v — соответственно масса и скорость ракеты в момент времени t .

Если допустить, что в начальный момент времени $v = 0$, $m = m_0$ и что ракета движется прямолинейно в направлении, противоположном скорости истечения газов, то путём интегрирования уравнения Мешерского можно получить следующее соотношение:

$$\frac{m_0}{m} = e^{v/w}, \quad (1)$$

где $e = 2,71828\dots$ — постоянное число (основание натуральных логарифмов). Полученное соотношение и называют *формулой Циолковского*.

Формула (1) справедлива лишь для скоростей, много меньших скорости света в вакууме ($v \ll c$). Релятивистским обобщением формулы Циолковского является соотношение

$$\frac{m_0}{m} = \left(\frac{1+v/c}{1-v/c} \right)^{c/2w}, \quad (2)$$

из которого, в частности, следует, что ни при какой конечной стартовой массе космического корабля он никогда не достигнет скорости света c .



Иван Всеволодович Мешерский.





Возможно, таким будет фотонный космический корабль.

Казалось бы, выход простой — увеличивать скорость продуктов сгорания топлива. Однако повышение этой скорости является чрезвычайно трудной задачей. Даже у ядерных двигателей она вряд ли будет превышать 20 км/с.

Идеальный случай, когда $w = c$. Так было бы в фотонном двигателе. Роль газовой струи в нём должен играть мощный поток света, образующийся при аннигиляции веществ

ва и антивещества. Уже при отношении $m_0/m = 4,36$ с его помощью можно было бы достичь скорости $v = 0,9c$!

На рисунке представлена одна из воображаемых конструкций звездолёта с фотонным двигателем («фотонной ракеты»). Его длина составляет более 9,5 км, численность экипажа 300—500 человек. Насколько подобные идеи могут стать реальными, покажет время.

НЕИНЕРЦИАЛЬНЫЕ СИСТЕМЫ ОТСЧЁТА

До сих пор движение тел описывалось только в инерциальных системах отсчёта. Однако на практике все реальные измерения выполняются в системах отсчёта, движущихся относительно инерциальных с тем или иным ускорением и потому инерциальными не являющихся. Например, любая лаборатория, в которой работают физики-экспериментаторы, совершает (вместе с Землёй) ускоренное движение относительно Солнца и звёзд. Да и обыденная жизнь человека представляет собой непрерывные переходы из одной неинерциальной системы отсчёта в другую (например, из квартиры в ускоренно движущийся лифт, оттуда на поверхность Земли, затем в трогающийся с места автобус или тормозящий автомобиль и т. д.).

Что нового привносит в динамику использование неинерциальной системы отсчёта?

ПОСТУПАТЕЛЬНОЕ ДВИЖЕНИЕ

Любой человек сталкивался с простейшими проявлениями силы инерции, например в движущемся лифте. Если внутри лифта, который перемещается с ускорением, направленным

вертикально вверх, к пружинным весам подвесить груз массой m , то на него со стороны пружины будет действовать упругая сила $\vec{F}$. Тогда в системе, неподвижной по отношению к Земле (инерциальной), груз приобретёт ускорение, равное ускорению лифта $\vec{a}$, и, согласно второму закону Ньютона,

$$m\vec{a} = \vec{F} + m\vec{g}.$$

Наблюдатель же, находящийся внутри кабины лифта (в неинерциальной системе отсчёта), увидит, что груз неподвижен, т. е. его ускорение равно нулю, но в то же время весы покажут, что вес тела стал больше, чем в неподвижном лифте: $F > mg$. Почему же это произошло? Пассажир лифта может рассуждать так: если полагать, что в системе отсчёта, связанной с движущимся лифтом, по-прежнему выполняется второй закон Ньютона, но вес груза изменился, значит, появилась ещё одна, направленная вниз сила, которая вместе с силой тяжести уравнивает упругую силу. Новую силу называют *силой инерции*:

$$\vec{F}_{\text{ин}} = -m\vec{a}.$$

Однако создаётся впечатление, что в данном случае использован ло-



Автоматическая межпланетная станция «Кассини». США.



гический трюк: раз для равновесия нужна сила, то необходимо вообразить, что она есть. Но где тело, со стороны которого она действует? Его нет. Наверное, можно было бы поступить и по-другому: например, изменить законы динамики Ньютона в неинерциальных системах. Но учёные решили ввести понятие «силы инерции» как формальной (или «фиктивной») силы, не связанной с каким-либо конкретным телом. Впрочем, для космонавта, находящегося в стартовой ракете, сила инерции совсем не формальная. Эта сила придавливает его к креслу так, что нет никаких сомнений в её реальности! Но с точки зрения стоящих на космодроме людей на него действует только огромная сила реакции со стороны сиденья.

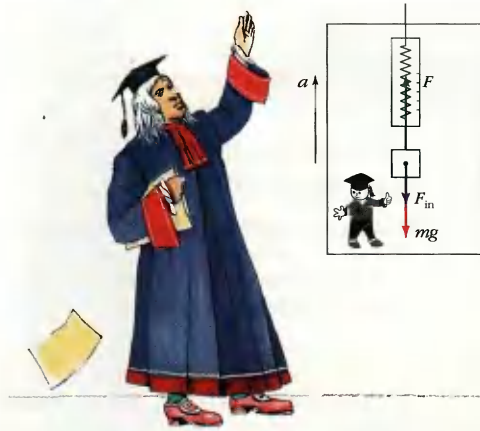
Можно рассмотреть и более общий случай, когда тело движется с некоторым ускорением $\vec{a}'$ относительно лифта. Например, оно падает вниз. Измерив путь и время падения, наблюдатель установит, что

$$\vec{a}' = \vec{g} - \vec{a}.$$

Это не что иное, как кинематическая формула сложения ускорений. Умножив все её составляющие на массу, получим обобщение второго закона Ньютона для случая свободного падения тела в неинерциальной системе отсчёта

$$m\vec{a}' = m\vec{g} + \vec{F}_{\text{ин}}.$$

Если лифт будет падать с ускорением $\vec{g}$, то находящиеся внутри него тела потеряют вес и наступит состояние *невесомости*. В этом случае $\vec{F}_{\text{ин}} = -m\vec{g}$, т. е. сила тяжести компенсируется силой инерции. Такая компенсация наступит во всех точках внутри лифта, что позволяет говорить о поле сил инерции, эквивалентном полю тяготения. Любое из них будет сообщать всем телам, независимо от их массы, одно и то же ускорение. Поэтому никакие опыты по изучению падения тел в лифте не позволят вы-



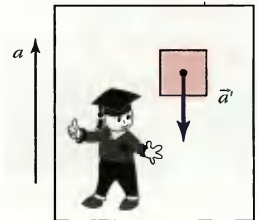
яснить, под действием которого из этих полей оно происходит.

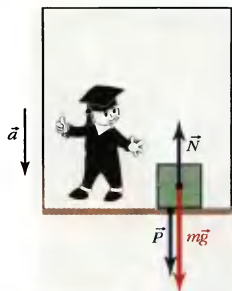
Альберт Эйнштейн обобщил данное утверждение в виде *принципа эквивалентности* сил тяготения и сил инерции: все физические явления в гравитационном поле происходят совершенно так же, как и в соответствующем поле сил инерции, если напряжённости обоих полей совпадают, а начальные условия одинаковы для всех тел замкнутой системы. (Напряжённость поля — сила, действующая со стороны этого поля на материальную точку массой 1 кг.) Отметим, что принцип эквивалентности касается только однородных полей, напряжённость которых везде одинакова.

В общем случае на тело в неинерциальной системе отсчёта помимо силы инерции может действовать любая «реальная» сила $\vec{F}$. При этом второй закон Ньютона в такой системе следует записывать в виде

$$m\vec{a}' = \vec{F} + \vec{F}_{\text{ин}}.$$

Выражение для силы инерции $\vec{F}_{\text{ин}} = -m\vec{a}$ справедливо только для поступательного движения, т. е. когда отсутствует вращение и все точки системы отсчёта движутся (относительно инерциальной системы)





с одним и тем же ускорением. Для вращающейся системы отсчёта это уже не так, и силы инерции будут неодинаковы в различных её точках.

ВРАЩАЮЩИЕСЯ СИСТЕМЫ ОТСЧЁТА

В качестве примера рассмотрим систему отсчёта, связанную с диском, совершающим равномерное вращение с угловой скоростью ω . Пусть

некоторая частица движется с постоянной скоростью v' по его краю. Тогда для наблюдателя в инерциальной системе отсчёта эта частица будет перемещаться со скоростью $v = v' + \omega r$ и с ускорением

$$a = \frac{v^2}{r} = \frac{(v' + \omega r)^2}{r} = \frac{v'^2}{r} + 2\omega v' + \omega^2 r.$$

С точки зрения наблюдателя, находящегося на диске, частица будет двигаться с ускорением $a' = v'^2/r$.

ВЕС И НЕВЕСОМОСТЬ

Измерять вес люди научились давно. Изображение весов можно найти даже на древнеегипетских пирамидах, построенных более 4 тыс. лет назад! В те времена с весом тел «ближе всего» были знакомы рабы, перетаскивавшие на спине тяжёлые тюки и мешки с грузом. Заменяв спину какой-либо опорой или чашей, подвешенной к коромыслу весов, и введя понятие силы, можно получить современное определение веса, появившееся после открытия Исааком Ньютоном основных законов механики.

Весом тела называют силу $\vec{P}$, с которой оно давит на горизонтальную опору или растягивает вертикальный подвес. Важно иметь в виду, что вес тела приложен не к самому телу, а к его опоре (или подвесу) и потому не входит в правую часть второго закона Ньютона, записанного для данного тела.

Вес тела находят с помощью третьего закона Ньютона. Из него следует, что сила, с которой тело давит на свою опору, равна по модулю и противоположна по направлению силе реакции опоры:

$$\vec{P} = -\vec{N}, \quad P = N.$$

Если тело покоится (или совершает равномерное и прямолинейное движение) относительно инерциальной системы отсчёта, то его вес равен силе тяжести. В случае ускоренного движения это равенство нарушается.

Пусть, например, тело массой m находится внутри лифта, движущегося с ускорением $\vec{a}$ относительно Земли. Если ускорение направлено вертикально вверх, то при любом направлении движения самого лифта (вверх или вниз) для тела на его полу второй закон Ньютона даёт

$$ma = N - mg,$$

откуда

$$P = N = m(g + a) > mg.$$

Вес тела в рассматриваемом случае превышает силу тяжести. Такое увеличение веса, называемое *перегрузкой*, испытывает, например, космонавт в момент старта космического корабля. Его вес увеличивается в несколько раз, что может вызвать довольно неприятные и даже болезненные ощущения.

Ускорение лифта, направленное вниз и по модулю не превышающее g (опять при любом направлении движения самого лифта), равно

$$ma = mg - N_2,$$

откуда

$$N_2 = N = m(g - a) < mg.$$

В данном случае вес тела уменьшается и при $a = g$ (когда лифт свободно падает) оказывается равным нулю: $P = 0$. Такое состояние называют *невесомостью*. В космическом корабле-спутнике невесомость наступает вследствие его «падения» по круговой орбите (соответствующее

движение также происходит с ускорением, равным g).

Если направленное вниз ускорение лифта превысит ускорение свободного падения, пол лифта уйдёт из-под находящихся на нём предметов и те, отстав от лифта, через некоторое время окажутся на его потолке. Сила реакции опоры (потолка) совпадёт здесь по направлению с силой тяжести, и второй закон Ньютона запишется в виде

$$ma = mg - N_2,$$

откуда

$$N_2 = N = m(a - g).$$

Подобное превращение «пола» в «потолок» и наоборот имеет место также в верхней точке «мёртвой петли», которую описывает самолёт, движущийся с центростремительным ускорением $a > g$.

Из-за вращения Земли вес одного и того же тела оказывается различным на разных широтах. Например, на экваторе тела весят меньше, чем на полюсах. На полюсах вес покоящегося тела совпадает с силой притяжения к Земле: $P = F$. На экваторе тело, лежащее на Земле, участвует в её суточном вращении и потому обладает центростремительным ускорением $a = \omega^2 R$, направленным к центру Земли. По второму закону Ньютона $ma = F - N$, и, значит, $P = N = F - ma < F$.

Впрочем, уменьшение веса, наблюдающееся на экваторе Земли, невелико и по отношению к весу на полюсе составляет всего лишь 0,3 %.



Подставив это выражение в предыдущее равенство, найдём

$$a' = a - 2\omega v' - \omega^2 r.$$

Отсюда после умножения на массу частицы m получим

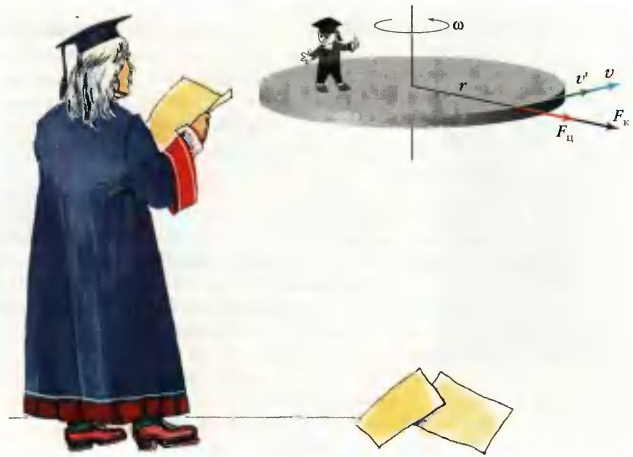
$$ma' = ma - 2m\omega v' - m\omega^2 r.$$

Проанализируем правую часть полученного уравнения. По второму закону Ньютона $ma = F$, где F — некоторая реальная сила, удерживающая точку на окружности. Два других слагаемых отрицательны, т. е. соответствующие силы направлены противоположно $\vec{F}$ (в сторону от центра диска). Первая из них $F_K = 2m\omega v'$ называется *силой Кориолиса*, а вторая $F_{ц} = 2m\omega^2 r$ — *центробежной силой*. Центробежная сила не зависит от скорости частицы относительно вращающейся системы, а вот сила Кориолиса действует только на движущуюся частицу (когда $v' \neq 0$). В случае произвольного направления скорости $\vec{v}'$ она определяется выражением

$$\vec{F}_K = 2m[\vec{v}' \times \vec{\omega}],$$

где вектор угловой скорости $\vec{\omega}$ направлен вдоль оси вращения и связан с направлением вращения правилом правого винта. Из определения векторного произведения следует, что $\vec{F}_K \perp \vec{v}'$. Поэтому сила Кориолиса не производит работы и не изменяет энергию материальной точки, а лишь влияет на направление её скорости. В этом она очень похожа на силу Лоренца, действующую на заряженную частицу в магнитном поле.

Центробежные силы всегда стремятся сместить тела от оси вращения к периферии и возрастают с увеличением угловой скорости и расстояния от указанной оси. По этой причине массивные, быстро вращающиеся части машин (роторы турбин, лопасти винтов вертолётов и т. п.) приходится делать очень прочными. Если центробежные силы



превысят предел прочности таких деталей, то могут разорвать их на части. Подобный процесс происходит и в центрифуге во время отжима белья: при большой скорости вращения решётчатого барабана частички влаги отрываются от ткани и вылетают из него через отверстия.

Земля благодаря суточному вращению тоже представляет собой неинерциальную систему отсчёта. И хотя угловая скорость её вращения мала, проявления центробежных сил и сил Кориолиса можно наблюдать на практике. Центробежное ускорение на экваторе равно $a_{ц} = \omega^2 R \approx 0,034 \text{ м/с}^2$. По сравнению с экваториальным ускорением свободного падения $g_0 = 9,78 \text{ м/с}^2$ это величина малая, но тем не менее она заметно влияет на изменение веса тела на экваторе по сравнению с его весом на полюсе. Если, например, взвешивать на пружинных весах тело массой 10 кг, то уменьшение веса на экваторе за счёт действия центробежной силы составит около 35 г.

Сила Кориолиса наглядно проявляется в движении маятника Фуко, представляющего собой массивный шар, подвешенный на длинной нити. Его подвес способен вращаться,

Кориолиса сила — одна из сил инерции, вводимая для того, чтобы учесть влияние вращения подвижной системы отсчёта на относительное движение тела.

Гюстав Гаспар Кориолис (1792—1843) — французский учёный, занимавшийся теорией относительного движения. Ввёл понятия так называемой силы Кориолиса и ускорения Кориолиса.



Гюстав Гаспар Кориолис.



В «ЗАКОЛДОВАННОМ» ШАРЕ

Один предприниматель в Америке устроил для развлечения публики очень забавную и поучительную карусель в форме шарообразной вращающейся комнаты. Люди внутри неё испытывают такие необыкновенные ощущения, какие мы считаем возможными разве только во сне или в волшебной сказке.

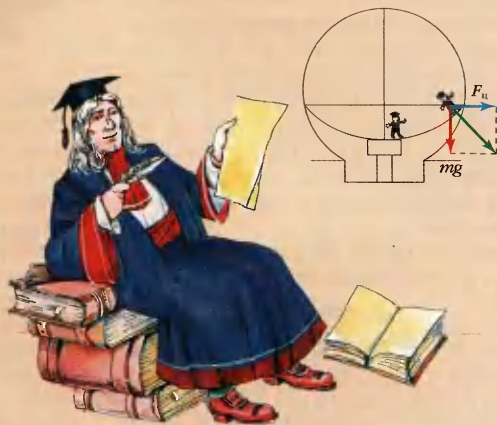
На человека, находящегося на вращающейся платформе, действуют две силы: центробежная сила, направленная от оси вращения, и сила тяжести. Результирующая сила будет направлена вниз под некоторым углом к оси вращения. Если платформе придать такую кривизну, чтобы при определённой скорости её поверхность была перпендикулярна к результирующей силе, то помещённый на ней человек будет чувствовать себя во всех её точках как на горизонтальной плоскости. Можно вычислить, что такой криволинейной поверхностью будет параболоид вращения. Эта поверхность образуется при вращении параболы вокруг её оси симметрии. Её можно получить, если быстро вращать стакан, до половины наполненный водой: вода у краёв поднимется, а в центре опустится, и поверхность её примет форму параболоида.

Теперь легко понять устройство «заколдованного» шара. Дно его составляет большая вращающаяся платформа, которой придана форма параболоида. Чтобы у людей не возникало головокружения, платформу помещают внутри большого шара с непрозрачными стенками, который вращается с такой же скоростью, как и сама платформа. Что же испытываете вы, находясь на платформе внутри шара? Когда он вращается, пол под вашими ногами горизонтален, в какой бы точке вы ни находились, — у оси, где пол действительно горизонтален, или у края, где он наклонён под углом 45° . Глаза ясно видят вогнутость, а чувство равновесия свидетельствует, что под вами ровное место. Если вы перейдёте с одного края платформы на другой,

то вам покажется, будто весь огромный шар с лёгкостью мыльного пузыря перевалится на другой бок под тяжестью вашего тела: ведь во всякой точке вы чувствуете себя как на горизонтальной плоскости. А положения других людей, стоящих на платформе наклонно, должно представляться вам до крайности необычным: вам буквально будет казаться, что люди, как мухи, ходят по стенам. Вода, вылитая на пол «заколдованного» шара, растекается ровным слоем по его поверхности. Кажется, что вода здесь стоит перед вами наклонной стеной.

Привычные представления о законах тяготения словно отменяются в этом удивительном шаре, и мы переносимся в сказочный мир чудес.

(По книге Я. И. Перельмана
«Занимательная физика».)



чтобы предотвратить закручивание нити. С помощью такого маятника можно наблюдать поворот плоскости колебаний, вызванный суточным вращением Земли. В наиболее простом случае, если маятник поместить на Северном полюсе, можно считать, что его скорость всегда перпендикулярна земной оси. При этом векторы $\vec{v}$ и $\vec{\omega}$ взаимно перпендикулярны и сила Кориолиса оказывается равной $F_K = 2m\vec{v} \times \vec{\omega}$. Она лежит в горизонтальной плоскости и сориентирована вправо по отношению к направлению движения маятника. Траектория колебаний, возникающих, если отпустить

маятник из отклонённого положения, под действием силы Кориолиса приобретёт вид розетки с заострёнными вершинами. Плоскость колебаний поворачивается по часовой стрелке относительно Земли, совершая один оборот в сутки. Если колебания такого маятника наблюдать не на полюсе, а на широте φ , то, для того чтобы найти значение силы Кориолиса, необходимо вместо угловой скорости Земли взять её проекцию на направление вертикали в данном месте: $\omega \sin \varphi$. Таким образом, угол поворота плоскости колебаний за сутки равен $2\pi \sin \varphi$. На экваторе сила Кориолиса направ-

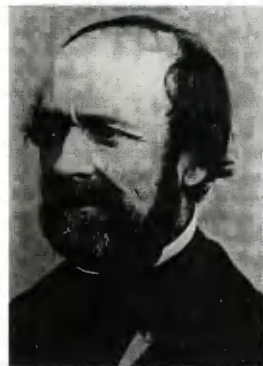
Жан Бернар Леон Фуко (1819—1868) — французский физик, иностранный член-корреспондент Петербургской Академии наук. Определил скорость света в воде и в воздухе, подтвердил суточное вращение Земли на опыте с так называемым маятником Фуко.



лена перпендикулярно поверхности Земли и не вызывает поворота плоскости колебаний маятника Фуко.

Впервые такие опыты были проведены французским учёным Жаном Фуко в 1851 г. в Парижской обсерватории. Маятник здесь имел вид металлического шара массой 28 кг, подвешенного на нити длиной 67 м. Период его колебаний составлял 16,4 с. Опыты Фуко позволили наблюдать проявления суточного вращения Земли и доказали неинерциальность земной системы отсчёта.

Действие силы Кориолиса заметно и во многих других явлениях, связанных с движением тел на Земле. Так, например, поток воды в реках Северного полушария прижимается данной силой к правому берегу, что приводит к его подмыванию. Поэтому правый берег таких рек обычно более крутой по сравнению с левым. Под действием кориолисовой силы на железнодорожных линиях правый рельс стирается изнутри, если по каждому пути поезд идёт только в одном направлении.



Жан Бернар Леон Фуко.

ДВИЖЕНИЕ ТВЁРДОГО ТЕЛА

Существуют ли твёрдые тела? Этот вопрос может вызвать недоумение — ведь окружающий нас мир полон твёрдых тел, например деревянная доска, стальной прут. И всё же деревянная доска хотя бы немного, но прогнётся под тяжестью севшего на неё человека. Стальной прут сложно растянуть руками, однако не невозможно: мастер настраивает рояль, натягивая металлические струны. Тело называется твёрдым, если оно сохраняет свою форму. То есть расстояние между любыми точками *твёрдого тела* остаётся неизменным, что бы с ним ни происходило.

Абсолютно твёрдых тел в природе нет, но при описании многих явлений можно пренебречь изменением формы и пользоваться моделью твёрдого тела. Знакомая всем модель — материальная точка. Однако даже самый маленький объект нельзя считать материальной точкой, если он вращается: точка не может вращаться.

ПОСЛЕДСТВИЯ ВРАЩЕНИЯ

Галилео Галилей доказывал, что если бы не сопротивление воздуха, то все тела падали бы с одним и тем же

ускорением независимо от их массы, заставляя «падать» гладкий шарик из твёрдой бронзы совершенно правильной формы» вдоль наклонной плоскости. Он полагал, что такое падение есть частный случай свободного, которое получится, если наклонную плоскость поставить вертикально, как стену. А что произойдёт, если шарик будет не падать, а катиться вдоль наклонной плоскости?

Для опыта понадобятся доска (подняв один из её концов, получим наклонную плоскость) и два цилиндра. Цилиндры в опыте с качением лучше шариков, так как они имеют выделенную ось и их легко заставить вращаться вокруг неё. Пусть один цилиндр будет сплошным, другой — полым. Желательно, чтобы цилиндры имели одинаковые размеры и примерно одинаковую массу. Это возможно, если они сделаны из разных материалов, например из дерева и металла, причём сплошной цилиндр нужно изготовить из более лёгкого материала, чем полый.

Теперь положим оба цилиндра на наклонную плоскость и одновременно отпустим. Когда доска и поверхность цилиндров очень гладкие и угол наклона достаточно велик, то





Деформация кручения (вверху) и сгиба.



они начнут скользить по плоскости без вращения (как говорил Галилей, «падать») и достигнут нижней точки одновременно. Следует добиться того, чтобы цилиндры катились, а не скользили. И вот неожиданный результат: сплошной цилиндр всегда достигает финиша раньше полого, даже если они совпадают по размерам и весу. Но почему? Описанный опыт отличается от проведённого Галилеем только тем, что тела, скатываясь с доски, вращаются. Значит, во всём «виновато» вращение.

Каким образом вращение изменяет результаты Галилея? Рассмотрим для примера скатывающийся с горки полый цилиндр с массой M и радиусом R (для простоты будем считать, что толщина его стенки очень мала). Скатывание этого цилиндра можно представить как поступательное движение его оси вдоль наклонной плоскости со скоростью $\vec{v}$ и вращение вокруг этой оси с угловой скоростью ω .

Скорость i -й точки обруча, обусловленная только вращательным движением, равна $v_{\text{вращ}} = \omega R$, а её полная скорость определяется векторной суммой скоростей поступательного и вращательного движений, на кото-

рые разложено истинное движение тела: $\vec{v} + \vec{v}_{\text{вращ}}$. Кинетическая энергия цилиндра равна сумме кинетических энергий всех его точек, т. е.

$$E = \sum_i \frac{m_i (\vec{v} + \vec{v}_{\text{вращ}})^2}{2} = \sum_i \frac{m_i (v^2 + 2\vec{v} \cdot \vec{v}_{\text{вращ}} + v_{\text{вращ}}^2)}{2}.$$

Знак $\sum_i$ означает суммирование

написанного выражения по всем точкам. Поскольку массы противоположных точек цилиндра равны, а их скорости, обусловленные вращением, равны по модулю и направлены в противоположные стороны, то

$$\sum_i m_i \vec{v} \cdot \vec{v}_{\text{вращ}} = 0.$$

С учётом того, что $\sum_i m_i = M$ —

полная масса цилиндра, кинетическая энергия скатывающегося полого цилиндра равна

$$E = \frac{Mv^2}{2} + \frac{Mv_{\text{вращ}}^2}{2}.$$

ВИДЫ ДВИЖЕНИЙ ТВЁРДЫХ ТЕЛ

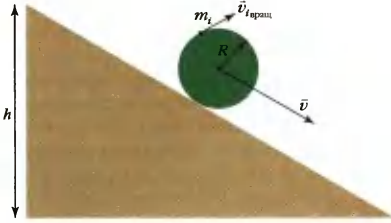
Поступательным движением твёрдого тела называется движение, при котором все точки тела двигаются по одинаковым траекториям. В этом случае отрезок, соединяющий две любые точки тела, перемещается параллельно самому себе. Пример такого движения — перемещение кабинки аттракциона «колесо обозрения», т. е. поступательное движение необязательно является прямолинейным.

Точки обода колеса осуществляют **вращательное движение**, при котором все они двигаются по окружностям. Центры этих окружностей лежат на одной прямой, называемой **осью вращения**.

Если траектории всех точек лежат в параллельных плоскостях (как у цилиндра, скатывающегося с наклонной плоскости, каждая точка перемещается в своей плоскости), это **плоское движение**. В соответствии с принципом Эйлера плоское движение всегда можно бесчисленным количеством способов разложить на поступательное и вращательное движения.

Если шарик падает или скользит вдоль наклонной плоскости, он двигается только поступательно; когда же шарик катится — он ещё и вращается.





Если бы цилиндр скользил без вращения, то его кинетическая энергия определялась бы только первым слагаемым. При вращении потенциальная энергия mgh , которой обладал цилиндр в начале наклонной плоскости, распределилась между кинетической энергией поступательного движения и кинетической энергией вращения. Поэтому вращающийся цилиндр доберётся до финиша с меньшей поступательной скоростью.

От чего зависит энергия вращения? Перепишем последний член

$$\frac{Mv_{\text{вращ}}^2}{2} = \frac{M\omega^2 R^2}{2} = \frac{I\omega^2}{2}.$$

Величина $I = MR^2$ называется *моментом инерции* тела. Он зависит от того, относительно какой оси вращается тело и как распределена масса вдоль этой оси. Чем больше расстояние от оси вращения до точки заданной массы, тем больше момент инерции и тем больше кинетическая энергия, которой обладает раскрученное до угловой скорости ω тело.

В этом кроется секрет опыта с двумя цилиндрами. Их массы одинаковы, но у полого цилиндра вся масса расположена на расстоянии, почти равном его радиусу R (если пренебречь толщиной стенок), у сплошного же цилиндра часть массы расположена ближе к оси вращения. Поэтому момент инерции сплошного цилиндра относительно данной оси меньше и, следовательно, меньше та часть полной энергии, которая уйдёт на вращение, а часть энергии, которая уйдёт на поступательное

движение, больше. Значит, сплошной цилиндр всегда докатится до финиша быстрее, чем полый.

ДОВЕРИМСЯ АВТОПИЛОТУ?

Часто ли вам приходилось делать что-либо на автопилоте? Вряд ли найдётся человек, который никогда не употреблял такого выражения. А что вообще делает автопилот? Назначение автопилота — держать заданный курс, не позволяя воздушному судну отклониться от него. Как механическое устройство может придерживаться какого-либо направления? Это тем более странно, что все направления в пространстве абсолютно равноправны и, следовательно, нет выделенного направления, от которого можно было бы отсчитывать угол поворота.

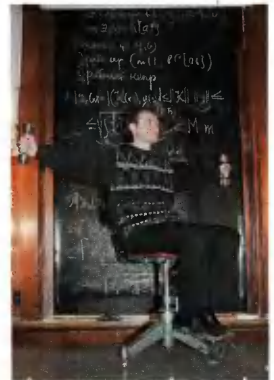
Если у вас дома имеется вращающийся стул, то вы легко можете провести простой опыт. Сядьте на стул (который в этом опыте имеет вполне научное название — «скамья Жуковского»), держа в вытянутых в стороны руках какие-нибудь тяжёлые грузы, например пару гантелей. Оттолкнувшись ногой, приведите себя вместе со стулом во вращение. Вращаясь, прижмите руки с гантелями к груди. Что произойдёт? Скорость вращения заметно увеличится. Разведя руки в сторону, вы её опять уменьшите. Почему это происходит?

Существенным в таком эксперименте является изменение расстояния от оси вращения, проходящей вдоль тела человека, до двух гантелей. Чем меньше расстояние от гантелей до оси вращения, тем быстрее скорость вращения. В принципе можно обойтись и без гантелей, просто разводя руки в сторону и сводя их у груди. Именно так поступают в фигурном катании: начинают вращение с широко разведёнными руками и потом, сомкнув их, ускоряют своё вращение. Изменение скорости



Г. Галилей. Гравюра.

Скамья Жуковского.





КАК РАССЧИТАТЬ МОМЕНТ ИНЕРЦИИ

Проще всего рассчитать момент инерции I относительно какой-либо оси, если все точки тела удалены от неё на одно и то же расстояние R , как это было в примере с тонкостенным цилиндром. В таком случае надо лишь умножить массу этого тела на квадрат расстояния: $I = MR^2$. Несложно рассчитать момент инерции и для системы точек с массой m_i , расстояние которых до оси l_i известно:

$$I = \sum m_i l_i^2.$$

Знак $\sum$ обозначает сумму всех точек, каждая из которых помечена индексом i . Например, момент инерции материальной точки массой m , подвешенной на невесомой нити длиной l (математический маятник) относительно точки подвеса $I = ml^2$. Таким же моментом инерции будет обладать обруч или тонкостенный цилиндр массой m относительно своей оси: действительно, каждая из точек, которые мысленно можно разделить обруч, находится на одном и том же расстоянии l от оси, а их полная масса равна массе обруча.

Когда расстояние от оси до точек меняется непрерывно (как в случае сплошного цилиндра), для расчёта

момента инерции приходится мысленно разбивать тело на отдельные точки массой dm и суммировать произведение этих масс на квадрат расстояния до оси. Под суммой здесь, конечно, подразумевается интеграл

$$I = \int R^2 dm.$$

Для примера можно рассчитать момент инерции однородного стержня массой m и длиной l относительно оси, проходящей через его конец. Разделим стержень на очень маленькие кусочки длиной dr . Каждый такой кусочек находится на расстоянии r от оси вращения. Масса единицы длины стержня равна $\frac{m}{l}$, значит, масса кусочка длиной dr равна $\frac{m}{l} dr$. Момент инерции кусочка составляет $\frac{m}{l} dr \cdot r^2$, где расстояние от оси вращения r изменяется от 0 до l . Момент инерции всего стержня

$$I = \int_0^l \frac{m}{l} r^2 dr = \frac{m}{l} \int_0^l r^2 dr = \frac{ml^2}{3}.$$

Теперь рассчитаем момент инерции стержня относительно оси, проходящей через его середину. На одном и том же расстоянии r от оси найдутся два кусочка массой dm , но само расстояние теперь меняется от 0 до $l/2$. Момент инерции равен

$$I = 2 \int_0^{l/2} \frac{m}{l} r^2 dr = \frac{ml^2}{12}.$$

Момент инерции стержня относительно его середины оказался меньше, чем относительно конца. Это означает, что стержень легче раскручивать, держа его за середину, а не за конец.

Насколько различаются моменты инерции относительно выбранных двух осей?

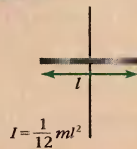
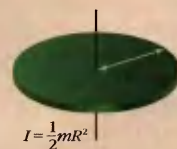
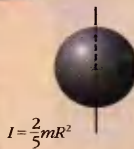
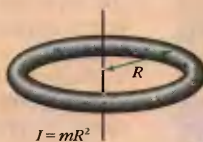
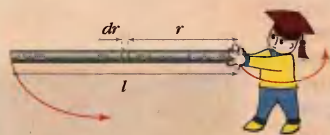
$$\frac{ml^2}{3} - \frac{ml^2}{12} = \frac{ml^2}{4} = m \left(\frac{l}{2} \right)^2.$$

Однако $l/2$ — это половина длины стержня, расстояние между рассматриваемыми осями! Значит, рассчитав момент инерции I относительно какой-либо оси, можно вычислить момент инерции I' для любой другой параллельной оси, отстоящей на расстояние a :

$$I' = I + Ma^2.$$

Данное утверждение называется *теоремой Штейнера*.

На рисунке указаны моменты инерции для обруча (такой же момент, как у тонкостенного цилиндра), диска (как у сплошного цилиндра), шара и стержня относительно отмеченных осей. С помощью теоремы Штейнера эти моменты инерции можно пересчитать для любой другой оси, параллельной данной.



вращения тем больше, чем больше перемещаемая масса.

Величину, равную произведению расстояния от точки до оси вращения на массу этой точки и на ско-

рость движения, т. е. расстояния на импульс точки, $L = \mathbf{r}p = \mathbf{r}mv$, называют *моментом импульса* рассматриваемой точки относительно данной оси. Твёрдое тело представляет со-



бой совокупность точек. Их скорости равны только при поступательном движении. В случае вращения модуль скорости точки прямо пропорционален расстоянию от оси вращения r :

$$v = \omega r,$$

где ω — угловая скорость. В отличие от линейной скорости v угловая скорость ω одинакова для всех точек, из которых состоит твёрдое тело, поэтому момент импульса предпочтительнее выразить через неё:

$$L = rmv = rm(\omega r) = mr^2\omega = I\omega,$$

где I — момент инерции. В данном опыте момент импульса сохраняется,

поэтому, прижимая гантели массой m к груди (уменьшая тем самым расстояние r и момент инерции I), человек увеличивает скорость ω .

Момент импульса может «удержать» направление, поскольку он является векторной величиной. Руль двухколёсного велосипеда легко поворачивается из стороны в сторону, если колесо не вращается (оно при этом должно быть приподнято над полом так, чтобы руль мог свободно поворачиваться). Но «поругить» невозможно, когда колесо предварительно раскручено свободной рукой!

Если же попытаться крутить не руль, а раму велосипеда, то обнаружится



АНАЛОГИЯ ДВУХ ДВИЖЕНИЙ

Интересно, что для любой физической величины, описывающей поступательное движение тела, можно указать сходную по физическому смыслу величину, описывающую движение вращательное. Например, угол поворота соответствует координате; следовательно, его изменение за малый

промежуток времени, отнесённое к этому промежутку, физически аналогично отношению изменения координаты и малого промежутка времени, т. е. скорости. Действительно, введённая таким образом величина является угловой скоростью — скоростью изменения угла поворота.

Введение каких-либо величин, описывающих новое физическое явление,

по аналогии с другими величинами, описывающими явление с подобным физическим смыслом, помогает осмыслить и запомнить новые величины. Вот ещё один пример. При поступательном движении инерционные свойства тела характеризуются его массой. Чем больше масса, тем больше силу нужно приложить, чтобы, скажем, разогнать это тело до заданной скорости за заданное время (сообщить заданное ускорение). Точно так же, чтобы раскрутить тело до заданной угловой скорости (она аналогична скорости поступательного движения) за заданное время, нужно приложить тем больший момент силы, чем больше момент инерции тела.

Таким образом, момент инерции — физическая величина, аналогичная массе. Установив это, можно без особых проблем записать выражение для кинетической энергии вращающегося тела. Нужно всего лишь заменить в хорошо известной формуле для кинетической энергии $E_k = mv^2/2$ все входящие в неё величины на аналогичные. Получится $E_k = I\omega^2/2$. Можно самим установить аналогии между другими известными величинами, описывающими поступательное движение, и неизвестными, которые описывают вращательное. Результат стоит сравнить с приведённой таблицей.

Координата движущейся точки в выбранной системе отсчёта x	Угол поворота движущейся точки вокруг координатной оси α_x
Скорость поступательного движения $v_x = dx/dt = x'$	Угловая скорость $\omega_x = d\alpha_x/dt = \alpha'_x$. Для точки, находящейся на расстоянии R от центра вращения, её линейная скорость связана с угловой соотношением $v_x = \omega_x R$
Ускорение $a = dv/dt = x''$	Угловое ускорение $\epsilon_x = d\omega_x/dt = \alpha''_x$
Масса m определяет инерционные свойства тела при поступательном движении: при одинаковом значении внешней силы F_x тело с большей массой приобретает меньшее ускорение: $F_x = ma_x$	Момент инерции $I = \sum m_i r_i^2$ определяет инерционные свойства тела при вращении: при одинаковом значении момента сил M_x тело с большим моментом инерции приобретает меньшее угловое ускорение: $M_x = I\epsilon_x$
Кинетическая энергия поступательного движения $E_k = mv^2/2$	Кинетическая энергия вращательного движения $E_k = I\omega^2/2$
Импульс $p_x = mv_x$	Момент импульса $L_x = I\omega_x$
Сила $F_x = dp_x/dt$	Момент силы $M = \vec{r} \cdot \vec{F}$; $\vec{M} = d\vec{L}/dt$



В. Паули и Н. Бор
с игрушкой «тип-топ».



вообще фантастическая вещь: руль будет поворачиваться сам по себе, стремясь выдержать направление, заданное в момент раскрутки колеса. Плоскость, в которой вращается колесо, «противится» попытке её пово-

рота. Это происходит потому, что момент импульса вращающегося колеса пытается сохранить не только свою величину (модуль), но и направление. Куда же направлен момент импульса? В рассмотренном случае вращающегося велосипедного колеса он направлен вдоль оси колеса и составляет с направлением вращения правый винт. Угловая скорость ω также является вектором, направленным вдоль оси вращения и образующим с ним правый винт. Поэтому связь между моментом импульса и угловой скоростью в векторном виде выглядит следующим образом:

$$\vec{L} = I\vec{\omega}$$

Однако так просто, к сожалению, бывает не всегда. Приложив внешние силы, например со стороны закреплённой в подшипниках оси, любое тело можно заставить вращаться так,

ЗАКОН СОХРАНЕНИЯ МОМЕНТА ИМПУЛЬСА

В общем случае вектор момента импульса определяется векторным произведением $\vec{L} = \vec{r} \times m\vec{v}$. Результатом является вектор, перпендикулярный обоим перемножаемым векторам; его направление определяется по правилу правого винта (или буравчика). Вращение правого винта от первого сомножителя ко второму по кратчайшей дуге приводит к его ввинчиванию в ту же сторону, в которую направлен результат векторного произведения. Модуль получившегося вектора равен произведению модулей векторов сомножителей на синус угла между ними:

$|\vec{L}| = |\vec{r}| \cdot |m\vec{v}| \cdot \sin(\vec{r}, m\vec{v})$, $\vec{L}$ всегда перпендикулярен плоскости, где лежат $\vec{r}$, начало которого взято в какой-либо точке на оси вращения, и $m\vec{v}$.

При каких условиях момент импульса сохраняется? Для ответа на этот вопрос можно рассмотреть его изменение за малый промежуток времени (найти производную) и увидеть, когда это изменение равно нулю, что означает сохранение определённого значения момента импульса. Используя правило нахождения производной от произведения, получаем:

$$\frac{d\vec{L}}{dt} = \frac{d}{dt}(\vec{r} \times m\vec{v}) = \frac{d\vec{r}}{dt} \times m\vec{v} + \vec{r} \times \frac{d}{dt}(m\vec{v}) = \vec{v} \times m\vec{v} + \vec{r} \times \frac{d}{dt}(m\vec{v}).$$

Первое слагаемое в правой части результата равно нулю, потому что представляет собой векторное произ-

ведение параллельных $\vec{v}$ и $m\vec{v}$. (Одним из свойств векторного произведения является равенство нулю произведения параллельных векторов.) Второе слагаемое — это векторное произведение того же радиус-вектора, который брали при расчёте момента инерции, на изменение импульса за малый промежуток времени, т. е. на силу:

$$\frac{d}{dt}m\vec{v} = \vec{F}.$$

Величина $\vec{M} = \vec{r} \times \vec{F}$ называется моментом силы относительно точки, из которой проведён вектор $\vec{r}$. Если он равен нулю, то равна нулю производная момента импульса

$\frac{d\vec{L}}{dt}$ и, следовательно, момент импульса остаётся неизменным. Таким образом, момент импульса относительно какой-либо точки сохраняется в том случае, если равен нулю момент внешних сил относительно этой точки. В частности, он сохраняется, когда внешние силы совсем отсутствуют и система является замкнутой.

Встречаются очень интересные ситуации, когда тело, первоначально не имеющее вращения (с нулевым моментом импульса), необходимо заставить вращаться, не используя внешние силы. Этого можно добиться, заставив отдельные части тела вращаться в противоположные стороны. Тогда каждая часть тела приобретёт собственный момент импульса, однако суммарный момент по-прежнему останется равным нулю.



ПАДАЮЩАЯ КОШКА

Все знают, что как кошку ни брось, она всё равно опустится на лапы. На первый взгляд это кажется удивительным. Если кошку бросили, с самого начала не придав ей вращения, а значит, и момента импульса, то как же она может повернуться лапами вниз? Ведь для этого ей нужно, падая, какое-то время вращаться, т. е. приобрести угловую скорость, хотя её момент импульса должен быть всё время равен нулю. Как это кошка ухитряется получить угловую скорость, не имея момента импульса?

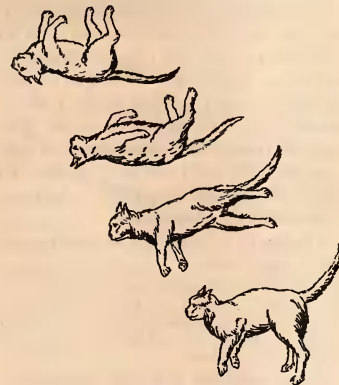
Всё объясняется удивительной гибкостью кошки. Предположим, что сначала кошка оттопырит задние лапы, поджав передние и вытянув вперёд шею, и станет, скручивая тело, поворачивать переднюю часть туловища. Момент импульса у кошки в целом, конечно, не появится, как его не было и вначале. Но поскольку масса её задних ног отодвинута далеко от оси вращения, то очень маленькая угловая

скорость задней половины тела кошки даст такой же момент импульса, что и большая угловая скорость его передней половины, так как масса передних лап придвинута близко к оси вращения. Направления этих вращений противоположны, и оба момента импульса взаимно уничтожаются, давая полный момент, равный нулю. Однако при этом передняя половина кошки поворачивается в одном направлении гораздо сильнее, чем задняя половина — в противоположном.

Затем кошка оттопыривает передние лапы, поджимает задние и перекручивается в обратную сторону. Теперь с большей угловой скоростью движутся задние лапы, а с меньшей — передние, так как задние лапы приближены к оси вращения, а передние удалены от неё. На этом втором этапе передняя часть кошки повернётся, конечно, намного меньше, чем её задняя часть. Когда в конце этого этапа кошка оттопырит задние лапы и подожмёт передние, её положение

будет тем же, что в самом начале, только вся она окажется повернутой на заметный угол. Быстро повторяя раз за разом такие движения, кошка правильно ориентирует себя в пространстве и приземляется на лапы.

(По книге Г. Бонди «Относительность и здравый смысл».)



чтобы векторы $\vec{L}$ и $\vec{\omega}$ не совпадали по направлению. На рисунке изображено колесо, вращающееся вокруг «сбитой» оси. Вектор момента импульса этого колеса будет описывать в пространстве конус, а связь между ним и вектором угловой скорости по-прежнему отражается уравнением $\vec{L} = I\vec{\omega}$. Но поскольку направления векторов $\vec{L}$ и $\vec{\omega}$ в общем случае не совпадают, ясно, что связывающий их момент инерции I представляет собой не скалярную величину. Может быть, он является вектором, состоящим из трёх компонент $\{I_x, I_y, I_z\}$? Это тоже неверно, поскольку в таком случае по законам векторного произведения перемножаемые векторы и результат были бы взаимно перпендикулярны, а векторы $\vec{L}$ и $\vec{\omega}$ могут быть направлены под любым углом друг к другу.

Момент инерции является *тензорной величиной*. В общем случае он

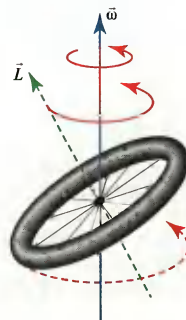
состоит из девяти компонентов, которые записываются в виде

$$\begin{pmatrix} I_{xx} & I_{xy} & I_{xz} \\ I_{yx} & I_{yy} & I_{yz} \\ I_{zx} & I_{zy} & I_{zz} \end{pmatrix}.$$

При вращении вокруг той или иной оси «работают» соответствующие компоненты тензора, которые подразумевались в записи $\vec{L} = I\vec{\omega}$. При попытке раскрутить тело вокруг другой оси нужно будет взять другую компоненту.

Почему момент инерции является такой сложной величиной? Необходимость введения тензоров появляется, когда физический объект обладает *анизотропией* (от греч. «анизос» — «неравный» и «тропос» — «свойство») — различием свойств вдоль разных направлений, задаваемых пространственными осями X, Y, Z . Тензор связывает между собой

Тензоры — величины более общие, чем векторы. Они описываются в каждой системе координат несколькими числами, причём закон преобразования этих чисел при переходе от одной системы координат к другой аналогичен векторному, но более сложен.





ФИЗИЧЕСКИЙ МАЯТНИК

Маятником называется твёрдое тело, совершающее колебания около положения равновесия под действием приложенных к нему сил. Если колебания должны осуществляться под действием силы тяжести, то ось маятника не может проходить через его центр тяжести. Если маятник представляет собой груз, подвешенный на нити, масса которой пренебрежимо мала по сравнению с массой груза, и при этом размеры груза пренебрежимо малы по сравнению с длиной нити, т. е. он может рассматриваться как материальная точка, то такой маятник называется *математическим*. Когда эти условия не выполняются, маятник именуется *физическим*.

Период колебаний математического маятника

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{l}{g}}$$

хорошо известен каждому школьнику. Как рассчитать период физического маятника, массой подвеса которого пренебречь нельзя?

Примером такого маятника может служить однородный жёсткий (в частности, металлический) стержень, закреплённый за один конец с помощью шарнира. При отклонении стержня от положения равновесия на угол α сила тяжести mg стремится вернуть его в исходное состояние. Можно рассчитать момент силы тяжести относительно точки подвеса. Поскольку стержень однородный, центр тяжести — точка приложения силы тяжести — расположен на середине стержня и плечо силы тяжести равно $l/2 \sin \alpha$. Таким образом,

$$M = -mg \frac{l}{2} \sin \alpha.$$

Знак «минус» появился потому, что сила тяжести пытается вернуть маятник в положение равновесия, т. е. повернуть его против направления, в котором увеличивается угол α . Момент силы вызывает изменение мо-

мента импульса: $\frac{dL}{dt} = M$, но $L = I\omega$. Следовательно,

$$M = I \frac{d\omega}{dt} = I\alpha''.$$

Знак «двойной штрих» здесь означает вторую производную по времени. Момент инерции однородного стержня относительно его конца (точки подвеса

маятника) равен: $I = \frac{ml^2}{3}$. Подставив

это значение и значение момента силы тяжести, получим уравнение

$$-mg \frac{l}{2} \sin \alpha = \frac{ml^2}{3} \alpha''$$

или, после сокращений,

$$\alpha'' + \frac{3}{2} \frac{g}{l} \sin \alpha = 0.$$

При малых углах отклонения от положения равновесия $\sin \alpha \approx \alpha$ (если α выражен в радианах). Сделав такое упрощение, можно прийти к уравнению гармонических колебаний

$$\alpha'' + \frac{3}{2} \frac{g}{l} \alpha = 0.$$

В нём коэффициент, стоящий перед α , равен квадрату циклической частоты, откуда легко получается выражение для периода колебаний:

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{2}{3} \frac{l}{g}}.$$

Так же просто можно получить уже известную формулу для периода колебаний математического маятника. Поскольку вся его масса сосредоточена на невесомой нити длиной l , то момент инерции такого маятника $I = ml^2$, а момент силы тяжести относительно точки подвеса $M = -mgs \sin \alpha$. Подставив эти выражения в уравнение

$$M = I \frac{d\omega}{dt} = I\alpha'',$$

получим

$$\alpha'' + \frac{g}{l} \sin \alpha = 0.$$

Если опять заменить синус на его аргумент, считая колебания малыми, результатом будет уравнение гармонических колебаний

$$\alpha'' + \frac{g}{l} \alpha = 0,$$

период которых равен

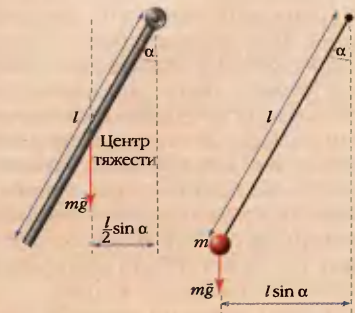
$$T = 2\pi \sqrt{\frac{l}{g}}.$$

Выражения для периодов окажутся равными, если длина стержня будет в $3/2$ раза больше, чем длина невесомой нити математического маятника.

Это был частный случай колебаний физического маятника — с однородным стержнем. В общем случае весомый подвес может иметь любую форму. Пусть центр тяжести доски C находится на расстоянии s от точки подвеса. При малых углах период колебаний такого маятника равен

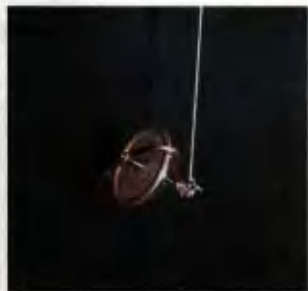
$$T = 2\pi \sqrt{\frac{I}{mgs}},$$

где I — момент инерции относительно точки подвеса, s — расстояние от точки подвеса до центра тяжести. Сравнив эту формулу с периодом колебаний математического маятника, легко заметить, что физический маятник совершает колебания с тем же периодом, с которым колебался бы математический маятник длиной $l = I/mgs$. Эта величина называется *приведённой длиной маятника*.





две векторные величины, которые пропорциональны по модулю, но могут различаться по направлению, как это было с векторами $\vec{L}$ и $\vec{\omega}$. Анизотропия в этом случае обусловлена формой тела. Если же твёрдое тело будет обладать симметрией относительно какой-либо из осей X, Y, Z , то соответствующие компоненты тензора инерции окажутся равными друг другу.



ТАЙНА ВОЛЧКА

Поведение игрушечного волчка в высшей степени удивительно. Если он не вертится, то заставить его удержаться на оси невозможно: волчок опрокидывается. Если же его удастся закрутить так, что ось вращения волчка будет строго вертикальна, то при вращении он не только не упадёт, но, наоборот, окажет удивительное сопротивление попыткам изменить положение своей оси. Поэтому вращающийся волчок можно подстегнуть кнутом, не опасаясь, что удар его опрокинет. Но если закрутить волчок, немного наклонив его ось, то она будет вращаться в ту же сторону, что и волчок, только с меньшей угловой скоростью! Почему так происходит?

Когда волчок вращается строго вертикально, сила тяжести, приложенная к его противоположным точкам A и B , одинакова по величине и имеет равные плечи относительно оси вращения волчка, проходящей через точку опоры O . Поэтому она создаёт для каждой пары точек вращающегося волчка одинаковые опрокидывающие усилия — моменты силы относительно точки опоры. В результате волчок продолжает вращаться вертикально и устойчиво из-за сохранения момента импульса.

Иное дело, когда волчок закручен так, что его ось наклонена. Силы тяжести, приложенные к точкам A и B , по-прежнему равны по величине, но их плечи относительно вертикаль-

ной линии, проходящей через точку опоры O , теперь разные! Результирующий момент этих сил пытается опрокинуть игрушку. И ему это почти удаётся: к импульсу точек A и B , обусловленному их вращением, добавляется небольшой по сравнению с ним импульс, направленный вниз. Результирующий импульс заставляет ось волчка вращаться вокруг вертикальной оси в ту же сторону, в которую направлено вращение самого волчка. Такое движение оси волчка под действием внешней силы называется его *прецессией* (от лат. praecessio — «предшествование»).

Прецессия — не единственное возможное движение волчка. Она наблюдается в чистом виде, только если колесо запущено очень аккуратно, без толчков. В противном случае ось колеса, прецессируя, описывает ещё и циклоиду (кривая, которую описывает точка колеса автомобиля при его движении без проскальзывания). Такое похожее на колебания движение волчка именуется *нутацией* (от лат. nutatio — «качание», «колебание»). Обычно это очень быстрое и незаметное для глаз движение (потому мы не наблюдаем его у детского волчка), к тому же оно быстро затухает за счёт неизбежного трения в точке крепления оси.

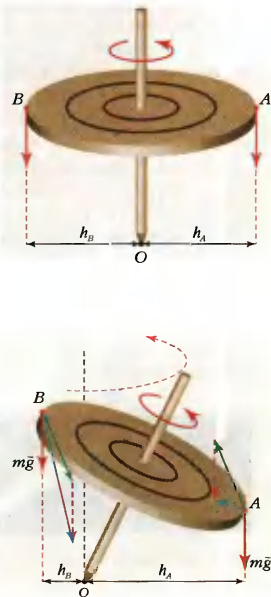
Земной шар тоже представляет собой большой волчок, несколько сплюснутый у полюсов. Его ось вращения наклонена к плоскости земной орбиты под углом $23^\circ 27'$ и



Тележка с вращающимся гироскопом не опрокидывается, несмотря на то что её центр тяжести расположен выше проволоки.



Раскрученный вокруг горизонтально расположенной оси гироскоп сохраняет своё положение, даже если его подвесить за концы оси.





прецессирует. Период прецессии — время, за которое ось нашей планеты опишет полный конус, — 26 тыс. лет. За половину указанного времени — 13 тыс. лет — земная ось наклонится в противоположную сторону.

Не означает ли это, что школьникам будущего, проживающим в Северном полушарии, придётся устраивать летние каникулы в январе? Конечно нет. В календаре учитывается сдвиг времён года вдоль земной орбиты. Для этого вводятся високосные годы (но не каждый четвёртый год; так, 1900-й не был високосным), а в 1998 г. мы прожили целую лишнюю секунду. Вообще, календарь — очень сложная вещь, и во многом потому, что Земля ведёт себя как волчок.

Однако некоторые изменения всё-таки произойдут. Например, из-за



ЗАГАДКА КЕЛЬТСКОГО КАМНЯ

В I тысячелетии до н. э. Западную Европу заселяли кельтские племена. Кто-то из археологов, спасаясь от скуки, крутил на подвернувшейся под руку доске найденный при раскопках предмет, получивший название *кельтского камня* (предполагается, что кельты использовали его в качестве топора). На вид кельтский камень ничем не примечателен, но он обладает интересным свойством: легко вращается в одну сторону, но отказывается вращаться в другую. Если его закрутить в «неправильном» направлении, то, сделав несколько оборотов, он быстро остановится, покачается несколько секунд и начнёт вращаться в «правильном» направлении. Закрученный в «правильном» направлении, он продолжает вращаться так до остановки.

Кельтский камень можно купить в магазинах, где продаются познавательные игры. Но его нетрудно сконструировать и в домашних условиях. Нужно взять половинку эллипсоида (подойдёт тело, имеющее форму половинки яйца, или даже столовая ложка с оторванной ручкой) и прикрепить к нему что-либо, имеющее форму параллелепипеда, так, чтобы продольные оси этих тел были бы сдвинуты относительно

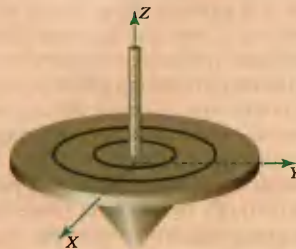


но друг друга на 5—10°. Вместо параллелепипеда можно использовать металлический штырь. Не составит особого труда найти кельтские камни в природе, например в речной гальке.

В чём же кроется секрет кельтского камня? Дело в том, что любое твёрдое тело имеет три взаимно перпендикулярные оси, проходящие через его центр масс, вокруг которых оно может свободно вращаться, не вращаясь при этом вокруг других осей. Они называ-

ются главными осями. Когда тело имеет оси симметрии, то главные оси совпадают с ними.

Если рассчитать момент инерции I тела для всех возможных осей, проходящих через его центр масс, то самые большие и самые маленькие значения получатся для осей, совпадающих с двумя из трёх главных осей тела. На рисунке ось Z соответствует самому большому моменту инерции параллелепипеда, X — наименьшему, Y — промежуточному. Действительно, момент инерции тем больше, чем дальше части тела находятся от соответствующей оси. Например, кусочки параллелепипеда A и B находятся дальше от оси Z , чем от оси Y , а от Y дальше, чем от X .



Кельтский камень.



небольшой вытянутости земной орбиты Земля в январе находится на несколько миллионов километров ближе к Солнцу, чем в июле, поэтому лето в Северном полушарии прохладнее, чем в Южном, а зима теплее. Через 13 тыс. лет будет наоборот. Когда мы ориентируемся по звёздам, то знаем, что Полярная звезда, находящаяся на «рукоятке ковша» созвездия Малой Медведицы, указывает на север. А древним грекам на север указывала не Полярная звезда, а β Большой Медведицы. Пройдёт несколько тысяч лет, и место Полярной звезды займёт Вега — главная звезда в созвездии Лиры. И всё потому, что земная ось «выбирает» в ходе прецессии разные звёзды.

Но самое большое разочарование ждёт любителей гороскопов. Из-за



прецессии «земного волчка» даты прохождения Солнцем тех или иных созвездий медленно, но постоянно меняются. Поэтому предсказания средневековых астрологов, связанные с определёнными знаками Зодиака, теперь относятся к другим датам календаря, нежели тогда.

Хотя тело свободно вращается вокруг любой главной оси, не всегда это вращение является устойчивым. В реальных условиях любое движение подвергается небольшим возмущениям. И оказывается, что вращение тела вокруг главных осей с самым большим и

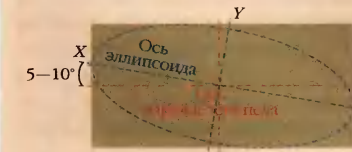
самым маленьким моментами инерции является устойчивым. А заставить тело вращаться вокруг оси с промежуточным моментом инерции так же трудно, как заставить карандаш стоять на острие (хотя чисто теоретически возможно): такое движение неустойчиво.

Если тело обладает круговой симметрией, как, например, игрушечный волчок, то у него только одна ось соответствует устойчивому вращению. Эта ось с максимальным моментом инерции совпадает с осью волчка, две другие осью ничем не различаются и выбираются произвольно. Вращение вокруг них будет неустойчивым.

Загадка кельтского камня объясняется расположением его главных осей, которые делают вращение неустойчивым. Кельтский камень вращается на основании, имеющем форму половинки эллипсоида. Но из трёх осей симметрии эллипсоида только одна совпадает с направлением главной оси всего камня — вертикальная. Две другие главные оси сдвинуты от осей симметрии в сторону, вдоль которой смещён и лежащий сверху параллелепипед. Это не имело бы никакого значения, если бы дно было сферой. Однако эллипсоид имеет разные радиусы кривизны в направлениях двух главных осей.

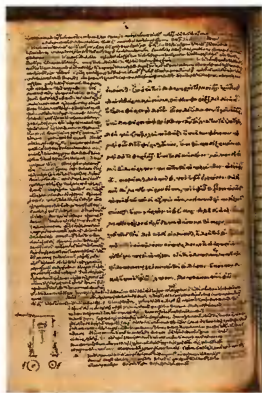
Следовательно, вращение вокруг вертикальной оси становится неустойчивым. Небольшие возмущения, полу-

ченные от первоначального толчка или из-за неровностей стола, на котором раскручивали камень в «неправильном» направлении, быстро нарастают и заставляют его колебаться вокруг оси Y . Силы трения, действующие на камень во время колебаний, тормозят вращение в одну сторону и затем вызывают вращение в противоположную. Как только вращение началось, силы трения останавливают колебания. Вращение в «правильном» направлении возбуждает аналогичный процесс, но теперь колебания должны происходить вокруг оси X . И если бы камень не остановился так быстро, то можно было бы наблюдать переменное изменение направления вращения камня.



самым маленьким моментами инерции является устойчивым. А заставить тело вращаться вокруг оси с промежуточным моментом инерции так же трудно, как заставить карандаш стоять на острие (хотя чисто теоретически возможно): такое движение неустойчиво.

Убедиться в этом можно, подбрасывая вверх тело, имеющее форму параллелепипеда, например спичечный коробок. Если его подбросить, закрутив вокруг оси X или Z , то он так и будет вращаться в течение всего полёта. Когда подбросят коробок, вращающийся вокруг оси Y , он «не захочет» вра-



Трактат Аристотеля «О физике». Греческая рукопись. XV в.

Сопротивление среды «затуманивает» понимание не только принципа инерции, но и закона всемирного тяготения. В соответствии с ним притяжение Земли сообщает любому телу вблизи её поверхности постоянное ускорение $g = 9,8 \text{ м/с}^2$. Однако повседневные наблюдения говорят о другом: стальной шарик падает на Землю гораздо быстрее, чем птичье перышко. И только одновременное падение этих тел в стеклянной трубке, из которой выкачан воздух, убедительно доказывает правоту Галилея и Ньютона.

СОПРОТИВЛЕНИЕ ДВИЖЕНИЮ И СИЛЫ ТРЕНИЯ

ПРАВ ЛИ АРИСТОТЕЛЬ?

«Всякое тело сохраняет состояние покоя или равномерного прямолинейного движения, пока и поскольку оно не будет вынуждено под действием других тел изменить это состояние». Это утверждение очевидно для неподвижного тела — оно без посторонней помощи никуда не сдвинется.

Однако опыт свидетельствует: если предоставленное самому себе тело начало двигаться, то оно рано или поздно остановится. Казалось бы, прав Аристотель: чтобы тело перемещалось равномерно, его надо тянуть или толкать в направлении этого движения. Лишь Галилей и Ньютон объяснили наблюдаемое замедление любого «свободного» движения тела действием на него *сил сопротивления*. Сила, которую Аристотель считал необходимой для поддержания движения, на самом деле лишь нейтрализует их.

Исаак Ньютон искал пример «вечного движения», чтобы окончательно доказать принцип инерции. Он обратил внимание на небесные тела, ведь они движутся в вакууме практически без сопротивления. Земля, например, за время своего существо-

вания совершила миллиарды оборотов вокруг Солнца, тем не менее её орбита почти не изменилась. Для описания движений небесных тел Ньютону «пришлось» установить закон всемирного тяготения. Получается, что само существование силы сопротивления стимулировало развитие механики.

ЛОБОВОЕ СОПРОТИВЛЕНИЕ

На нашей планете всякое перемещение происходит или в воздухе, или в воде, и на движущееся тело всегда действует сила, противоположная направлению его движения относительно окружающей среды. Эта сила называется *лобовым сопротивлением*. Именно из-за неё для поддержания равномерного движения любого транспортного средства необходима работа двигателя: если его выключить, тело потеряет скорость и остановится.

Лобовое сопротивление зависит от формы и размеров тела, свойств среды и, что очень важно, от скорости относительного движения. При небольших размерах тела и медленном движении величина силы сопро-

ПАРАШЮТ

Благодаря лобовому сопротивлению человек может безопасно прыгать с большой высоты, используя парашют. При затяжном прыжке парашют раскрывается не сразу. На первой стадии прыжка сопротивление воздуха определяется формой и размерами человеческого тела. Согласно экспериментальным измерениям, коэффициент α в этом случае составляет примерно $0,2 \text{ кг/м}$. Пусть масса человека равна 70 кг , тогда скорость его падения будет 60 м/с . Такая скорость устанавливается после того, как парашютист пролетит около 500 м . Но если бы он продолжал падать с той же скоростью, то разбился бы при ударе о землю.

Специальная форма и большая площадь поперечного сечения парашюта уменьшают скорость падения до 6 м/с . Эта скорость вполне безопасна: с ней приземляется человек, когда прыгает без всякого парашюта с высоты около 2 м .





тивления F_c пропорциональна скорости v :

$$\vec{F}_c = -\beta \vec{v} = -C_1 \eta \vec{v}.$$

Такая зависимость силы сопротивления от скорости соблюдается, если жидкость или газ плавно обтекает движущееся тело. Коэффициент C_1 определяется формой тела, а «эффektivная длина» l — его размерами.

Для маленького шарика l равна его радиусу, а $C_1 = 6\pi$. Так что $\vec{F}_c = -6\pi\eta\vec{v}$ (формула Стокса). Постоянная η характеризует способность среды препятствовать движению тела и называется **вязкостью** (или **внутренним трением**). Вязкость характеризует трение между соседними слоями жидкости (газа), скользящими друг относительно друга (подробнее об



Автомобиль «Ягуар ХКВ». Создатели автомобилей стремятся придать им обтекаемую форму для уменьшения лобового сопротивления воздуха.

ПРИРОДА ТРЕНИЯ В ЖИДКОСТЯХ И ГАЗАХ

Каждая молекула жидкости плотно окружена со всех сторон своими ближайшими соседями, находящимися на расстояниях порядка её диаметра. Она колеблется вокруг положения равновесия, а затем резко перепрыгивает к новому центру колебаний. За секунду молекула успевает сменить место осёдлой жизни около 100 млн раз, совершив между перескоками от 1 тыс. до 100 тыс. колебаний. Чем сильнее межмолекулярное взаимодействие, тем ниже подвижность молекул и больше вязкость жидкости.

Если на колеблющуюся молекулу действует постоянная внешняя сила (скажем, со стороны соседнего движущегося слоя), то в направлении этой силы частица будет совершать больше скачков, чем в противоположном. Поэтому и на её хаотические блуждания наложится упорядоченное перемещение со скоростью

$$v = (N_1 - N_2)\delta,$$

где δ — длина одного скачка, N_1 и N_2 — среднее число скачков за одну секунду в направлении силы и в противоположном направлении соответственно.

Приложенная сила совершает работу по раздвиганию тех молекул, между которыми протискивается рассматриваемая частица. Эта работа в конечном счёте идёт на увеличение скорости беспорядочного теплового движения молекул. Скорость упорядоченного движения v не меняется со временем, т. е. течение жидкости — равномерное, несмотря на действие

внешней силы. Значит, приложенную силу уравнивает сила сопротивления, которая как раз и определяется вязкостью.

При увеличении температуры подвижность молекул возрастает. Это приводит к уменьшению силы сопротивления, так как в нагретой жидкости чаще создаются благоприятные условия для перемещения частиц в направлении приложенной силы, — подобно тому, как человеку легче протиснуться в толпе беспорядочно движущихся людей, чем в неподвижной.

Газы тоже обладают вязкостью, но обусловлена она иными, чем в жидкостях, причинами. Среднее расстояние между молекулами газа обычно велико, и большую часть времени они перемещаются свободно, изредка сталкиваясь друг с другом. Расстояние между последовательными столкновениями молекул (*длина свободного пробега*) в тысячи раз превышает их размеры.

Когда соседние слои газа скользят друг относительно друга, между ними происходит обмен молекулами, в результате которого медленные слои должны ускоряться, а быстрые — замедляться. Суть этого процесса можно понять, рассмотрев движение двух железнодорожных платформ по параллельным путям в одну и ту же сторону. Одна едет быстрее, другая — медленнее. Они везут пассажиров, которые прыгают с одной платформы на другую. На человека, прыгнувшего с «медленной» платформы на «быструю», платформа должна подействовать некоторой силой в направлении движения, чтобы, разогнав его, уравни-

вать его скорость со своей. При этом и сама платформа испытывает противодействие со стороны человека, замедляющее её движение. Напротив, человек, попадающий на «медленную» платформу с «быстрой», ускоряет её. Таким образом, обмен пассажирами приводит к выравниванию скоростей платформ.

Вязкость газа выражается соотношением

$$\eta = \frac{1}{6} \rho \lambda v_t,$$

где v_t — средняя скорость теплового движения молекул газа. Чем выше его плотность, тем меньше длина свободного пробега ($\lambda \sim 1/\rho$), поэтому вязкость газа не зависит от плотности и пропорциональна ей давлению. В то же время средняя кинетическая энергия молекул $\frac{mv_t^2}{2}$ пропорциональна абсолютной температуре газа T .

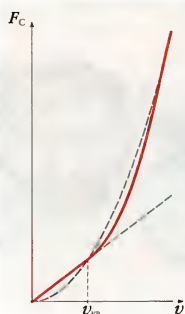
Следовательно, тепловая скорость v_t (а с ней и вязкость η) пропорциональна $\sqrt{T}$, $\eta \sim \sqrt{T}$. Значит, при нагревании вязкость газов, в отличие от жидкостей, возрастает.





«Съедающая» скорость движущихся тел, сопротивление среды не всегда играет отрицательную роль. Оно, например, защищает Землю от потока метеоритов, которые сгорают в плотных слоях атмосферы.

График зависимости силы сопротивления среды от скорости движения тела.



этом рассказано в разделе «Механика жидкостей и газов»).

Если скорость движущегося тела превышает некоторое критическое значение, то его лобовое сопротивление будет пропорционально уже не первой степени скорости, а её квадрату:

$$\vec{F}_c = -\alpha \vec{v} = -C_2 \rho S v \vec{v}.$$

В данном выражении коэффициент C_2 также зависит от формы тела, причём гораздо больше, чем C_1 . Величина силы сопротивления F_c пропорциональна произведению плотности среды ρ на площадь поперечного сечения тела S . Сопротивление движению возникает в этом случае не из-за взаимного трения слоёв жидкости, а вследствие разницы давлений впереди и позади тела. Давление перед телом (где жидкость покоится) превышает давление позади него (здесь жидкость движется в завихрениях с большой скоростью) на величину $\frac{\rho v^2}{2}$.

При больших скоростях лобовое сопротивление имеет такую же природу, что и архимедова сила. Последняя тоже является результатом разности давлений под телом и над ним, только создаётся она благодаря действию силы тяжести, а не разности скоростей.

Итак, лобовое сопротивление зависит от скорости:

$$\vec{F}_c = \begin{cases} -\beta \vec{v}, & v < v_{kp} \\ -\alpha v \vec{v}, & v > v_{kp} \end{cases},$$

где v_{kp} — критическое значение скорости, при котором одна закономерность сменяется другой. Оно определяется формой и размерами тела, а также вязкостью жидкости (или газа) и её плотностью. Значение v_{kp} зави-

сит от отношения $\frac{\eta}{\rho}$, которое называется *кинематической вязкостью*. Для одного и того же тела критическая скорость при движении в воздухе в 14 раз выше, чем в воде. Это означает, что прямая пропорциональность между F_c и v при перемещении в воздухе сохраняется для гораздо больших скоростей, чем при движении в воде.

График зависимости $F_c(v)$ проходит через начало координат, поскольку на неподвижные тела сила сопротивления не действует. Это основной признак *жидкого трения*, благодаря которому плавающее тело приходит в движение даже при самом малом воздействии. Например, лёгкий ветерок может поддерживать перемещение огромных айсбергов, и те, медленно дрейфуя в океане даже в тихую погоду, представляют большую опасность для морских судов (достаточно вспомнить трагедию «Титаника»).

СУХОЕ ТРЕНИЕ И ТРЕНИЕ ПОКОЯ

Сопротивление движению оказывает не только вязкая среда. Оно возникает и при скольжении одного твёрдого тела по поверхности другого. Если соприкасаются твёрдые поверхности или твёрдые прослойки между телами (плёнки окислов, полимерные покрытия), трение называют *сухим*.

Сила трения, действующая вдоль поверхности соприкосновения твёрдых тел, направлена против скольжения тела. Но не надо думать, что



трение всегда препятствует движению — часто оно ему способствует.

При прокручивании колёс автомобиля сила трения шин о поверхность земли, препятствуя их проскальзыванию, действует со стороны дороги и направлена вперёд, обеспечивая поступательное движение автомобиля. Чем сильнее трение, тем больше соответствующая сила, поэтому его стараются не уменьшать, а увеличивать: покрытие дороги делают шероховатым, наносят на поверхность шины рельефные рисунки (протекторы). Вспомните, как трудно идти по скользкой дороге или как буксует автомобиль, стоящий на льду или в грязи: колёса проскальзывают на месте, хотя мотор исправно вращает их.

Что определяет величину силы сухого трения? Повседневный опыт свидетельствует: чем сильнее прижать поверхности тел друг к другу, тем труднее вызвать их взаимное скольжение и поддерживать его (например, лист бумаги, вложенный между страницами лежащей на столе толстой книги, проще вытащить из верхней части фолианта, чем из нижней). Прижимающая сила, действующая со стороны соседнего тела на трущуюся поверхность, перпендикулярна ей и называется *силой нормального давления*.

В 1781 г. Шарль Кулон, изучая трение деталей и верёвок, которые в то время были существенными частями механизмов, экспериментально установил, что сила трения $F_{\text{тр}}$ прямо пропорциональна прижимающей силе N :

$$F_{\text{тр}} = \mu N.$$

Коэффициент пропорциональности μ — *коэффициент трения* — определяется шероховатостью соприкасающихся поверхностей; для более гладких поверхностей он меньше. Например, после удара хоккейной клюшкой скользящая шайба быстрее останавливается на деревянном полу, чем на льду.

Самым существенным отличием сухого трения от жидкого является его поведение при уменьшении скорости до нуля. Если к лежащей на столе очень тяжёлой книге приложить небольшую горизонтальную силу, то книга не сдвинется. Это значит, что и при отсутствии движения на тело действует сила трения покоя $F_{\text{тр}}^0$, компенсирующая действие остальных сил. Чем сильнее внешнее воздействие, направленное вдоль поверхности, тем эта сила больше. Однако она не растёт бесконечно (если тело не приклеили), а достигает предела, зависящего от силы нормального давления:

$$\max \{F_{\text{тр}}^0\} = \mu_0 N,$$

где *коэффициент трения покоя* μ_0 немного превышает коэффициент трения скольжения μ . Если внешние силы превысят это максимальное значение, тело начнёт двигаться ускоренно. Таким образом, величина силы трения покоя ограничена неравенством

$$F_{\text{тр}}(v = 0) \leq \mu_0 N.$$

Она меняется в зависимости от действующих сил и может принимать любые значения от нуля до $\mu_0 N$.

Ещё одно интересное отличие сухого трения от вязкого: эта сила не зависит от площади соприкосновения трущихся поверхностей. Если



Рельефные рисунки на поверхности шины служат для увеличения трения.





ТРЕНИЕ И АВТОМОБИЛЬ

Когда автомобиль разгоняется, вращающее усилие от мотора передаётся ведущим колёсам в виде некоторого момента сил. Под действием этого момента они поворачиваются, а точки их соприкосновения с дорогой стремятся проскользнуть назад. В результате возникает сила трения, направленная вперёд, против возможного скольжения. Она и разгоняет автомобиль.

Когда желаемая скорость движения достигнута, шофёр сбрасывает газ, т. е. уменьшает передаваемый колёсам момент до минимума, достаточного для преодоления лобового сопротивления и трения качения в подшипниках и шинах.

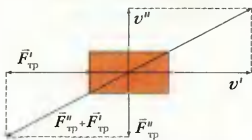
Чтобы уменьшить скорость или совсем остановить автомобиль, к дискам колёс прижимают шероховатые тормозные колодки. При этом появляется момент сил трения скольжения, замедляющий вращение колёс. Торможение часто сопровождается весьма опасным явлением — заносом (например, когда неопытный водитель до отказа давит на тормоз и колёса начинают проскальзывать). При заносе даже незначительное случайное воздействие может заставить тело двигаться поперёк основного скольжения.

Понять, почему происходит занос, можно, если рассмотреть силы, действующие на скользящее тело. Пусть автомобиль при торможении скользит по дороге со скоростью $\vec{v}'$. Действующая на него сила трения скольжения $\vec{F}'_{\text{тр}}$ будет направлена противоположно вектору $\vec{v}'$. Если помимо основного, продольного, скольжения появляется дополнительное скольжение вбок с маленькой скоростью $\vec{v}''$ (например, в результате наклона дороги), то возникнет дополнительная сила $\vec{F}''_{\text{тр}}$, направленная против поперечного скольжения. Однако полная сила трения $\vec{F}_{\text{тр}} = \vec{F}'_{\text{тр}} + \vec{F}''_{\text{тр}}$ должна быть направлена противоположно результирующей скорости $\vec{v} = \vec{v}' + \vec{v}''$ и иметь величину не больше μN . Поэтому продольная сила трения $\vec{F}'_{\text{тр}}$ немного уменьшится, а поперечная будет пропорциональна скорости v'' и более похожа на жидкое, чем на сухое трение.

Занос возникает и в том случае, когда автомобиль буксует на грязной дороге. Наравняв скорость вращения колёс, можно (хотя и медленно) двигаться вперёд, увеличивая силу трения скольжения с ростом скорости. Если пассажиры или прохожие пытаются помочь этому движению, подталкивая автомобиль сзади, он обычно начинает съезжать с дороги или «рыскать» по сторонам из-за случайных воздействий.

Некоторые машины имеют устройство противоскольжения, автоматически регулирующее силу F' притяжения колодок к тормозному диску и не допускающее блокировки колёс. Благодаря этому тормозной момент не может превысить критическую величину (при которой начинается проскальзывание), с какой бы силой водитель ни нажал на педаль.

Трение в автомобиле работает не только при торможении и разгоне. Поворачивая передние колёса, водитель «включает» силы трения, изменяющие направление движения. Трение обеспечивает сцепление колёс с полотном дороги и преобразует вращательное движение колёс в поступательное движение автомобиля.



кирпич скользит вниз по наклонной крыше, его ускорение не зависит от того, движется ли он плашмя, стоя на торце или на боку. В чём причина такого неожиданного поведения?

Трение возникает из-за взаимодействия между соприкасающимися частями тел. Даже на отполированной твёрдой поверхности имеются беспорядочно расположенные микроскопические выступы и впадины. Их высота (или глубина) порядка сотен атомных диаметров; если бы они были меньше, прилегающие друг к другу поверхности слиплись бы из-

за притяжения между молекулами. Соприкосновение твёрдых тел в действительности происходит не по всей поверхности, а лишь в отдельных «пятнах касания», т. е. вершинах выступов. Суммарная площадь реального касания в 100—1000 раз меньше, чем общая «площадь соприкосновения».

Поскольку площадь зон касания мала, то давления, созданные прижимающей силой, весьма высоки и выступы сплющиваются. Их суммарная площадь увеличивается, уменьшая давление на каждую площадку кон-



такта. Чем больше общая площадь, тем больше бугорков и тем меньшая часть общей нагрузки приходится на каждый из них, поэтому деформация отдельного «пятна касания» уменьшается. Таким образом, реальная площадь соприкосновения тел зависит только от силы, которая прижимает эти тела, а не от общей площади поверхности.

После того как возникает скольжение, выступы в «пятнах прилипания» наклоняются вдоль направления движения. Таким образом они подминают друг друга, а «мостики», возникающие в зонах контакта, непрерывно срезаются и образуются вновь. Каждое «пятно касания» — *фрикционная связь* — существует короткое время. При скольжении твёрдых тел микронеровности разрушаются, трущиеся поверхности становятся более гладкими — они шлифуются и полируются.

Сухое трение приводит к нагреву поверхностей, так как выделяющаяся при деформации выступов теплота не успевает распространиться в глубь вещества. Это приводит к размягчению тонкого поверхностного слоя, который становится смазкой, уменьшающей силу трения. Именно потому, в частности, так легко скользят коньки по льду и лыжи по снегу.

ТРЕНИЕ СКОЛЬЖЕНИЯ

Если поставить деревянный кубик на книгу, лежащую на столе, и поднимать её за один край, постепенно увеличивая угол наклона α её поверхности к плоскости стола, то кубик заскользит вниз не сразу. Как рассчитать критическое значение угла $\alpha_{кр}$, при котором кубик начнёт движение?

Сила трения покоя находится из условия равновесия всех сил, действующих на тело. Когда кубик покоится, на него действует сила тяжести mg , направленная вертикально вниз. Притяжение Земли компенси-



руется равной ему по величине силой $\vec{R}$, действующей на кубик со стороны книги и направленной вверх. Эту силу можно считать векторной суммой двух компонент: силы реакции книги $\vec{N}$ и силы трения $\vec{F}_{тр}$. Учитывая, что в состоянии покоя $R = mg$, получим

$$N = mg \cos \alpha, F_{тр} = mg \sin \alpha.$$

Поскольку сила трения покоя $F_{тр} \leq \mu_0 N$, то получим следующее неравенство для определения $\alpha_{кр}$:

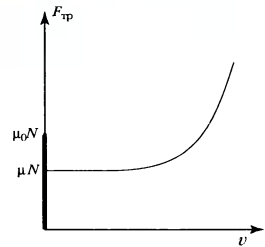
$$mg \sin \alpha \leq \mu_0 mg \cos \alpha, \text{ т. е. } \operatorname{tg} \alpha \leq \mu_0.$$

Когда угол наклона достигнет значения $\alpha_{кр} = \operatorname{arctg} \mu_0$, малейшее возмущение приведёт кубик в движение. При этом сила трения покоя $\mu_0 N$ сменяется силой трения скольжения, которая также направлена вверх по склону, но имеет несколько меньшую величину $\mu N = \mu mg \cos \alpha$ ($\mu \leq \mu_0$).

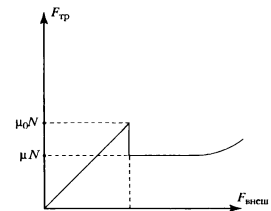
ТРЕНИЕ КАЧЕНИЯ

Тела могут не только двигаться поступательно, но и вращаться вокруг той или иной оси. Вращательное действие любой силы определяется её *моментом*, зависящим от расстояния между осью вращения до той прямой, вдоль которой действует сила.

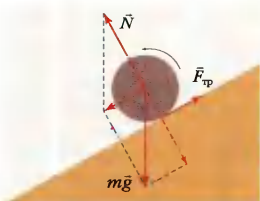
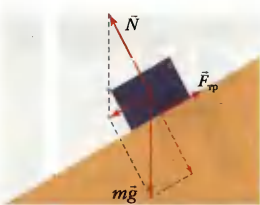
На наклонной плоскости сила трения покоя, направленная вверх по склону, мешает скольжению и удерживает тело неподвижно. Если поместить на плоскость не кубик, а шарик радиусом R , то касание произойдёт



Зависимость силы сухого трения от относительной скорости скольжения соприкасающихся поверхностей. Наиболее характерной чертой этой зависимости является «ступенька» при $v = 0$, когда сила трения может иметь любое значение между $-\mu_0 N$ и $\mu_0 N$. При небольших скоростях сила трения при скольжении меньше, чем сила трения покоя. Поэтому тяжёлое тело сдвинуть с места труднее, чем потом поддерживать его скольжение.



Зависимость силы сухого трения от внешней силы, приложенной к телу.



всего в одной точке. Действующую со стороны наклонной плоскости силу снова можно разложить на нормальное давление и силу трения, приложенные к телу в точке касания. Векторная сумма двух сил — $\vec{N}$ и $m\vec{g}$ — направлена вниз по склону. Если бы трения не было ($\mu = 0$), шарик скользил бы по плоскости под действием этой суммарной силы, двигаясь только поступательно. Вращение без трения возникнуть не может, так как обе силы, $m\vec{g}$ и $\vec{N}$, проходят через центр шарика и моменты их равны нулю. Если же трение существует, то сила трения направлена противоположно скольжению. Момент этой силы, $F_{\text{тр}}R$, стремится вращать тело против часовой стрелки. Никаких компенсирующих моментов нет, и шарик катится по склону, совершая одновременно поступательное и вращательное движение.

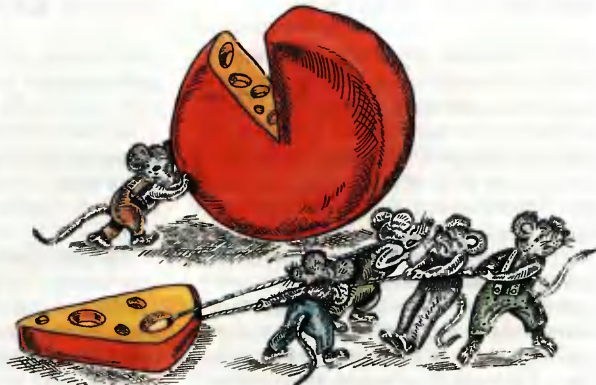
Необходимо отметить важную особенность качения. Если два одинаковых стальных шарика скатываются с наклонной плоскости, но один из них движется по твёрдой поверхности, а другой — по мягкой и упругой (например, по резине), то первый скатится гораздо быстрее. Значит, мягкая поверхность оказывает большее сопротивление, чем жёсткая, ведь трение качения обусловлено не столько разрывами «мостиков

сцепления», сколько меньшей работой на деформирование соприкасающихся поверхностей. Плоскость, по которой движется круглое тело, прогибается под нагрузкой, поэтому тело при своём движении постоянно выбирается вверх из образующейся под ним ямки. Само тело тоже сплющивается под действием реакции опоры, что дополнительно замедляет его движение.

Чем больше деформация соприкасающихся поверхностей, тем выше потери энергии движущегося тела. Поэтому коэффициент трения качения зависит не от гладкости (как коэффициент трения скольжения), а от твёрдости соприкасающихся поверхностей.

Трение качения зависит от того, какая деформация происходит — упругая или неупругая, и от скорости качения.

Сила сопротивления при качении гораздо меньше, чем при скольжении, только в том случае, если само круглое тело и поверхность, по которой оно катится, являются достаточно твёрдыми. По плохим (мягким) дорогам колёсный транспорт быстро двигаться не может. Для передвижения по бездорожью были изобретены гусеничные машины, танки и тракторы. Они «несут с собой» твёрдое покрытие, расстелив его перед колёсами.





КАЧЕНИЕ ВМЕСТО СКОЛЬЖЕНИЯ. КОЛЕСО И ПОДШИПНИК

При скольжении твёрдого тела по неподвижной твёрдой поверхности его замедляет сила трения μN , где безразмерный коэффициент μ зависит от гладкости соприкасающихся поверхностей. При качении вращение тормозит момент сил $M = \mu^* N r$, т. е. коэффициент трения качения μ^* должен иметь размерность длины.

Для равномерного скольжения к телу следует приложить силу, уравновешивающую силу трения. Равномерное качение круглого тела можно поддерживать с помощью силы F' , момент которой уравновешивает тормозящий момент силы трения качения.

Сравним затраты энергии, необходимые для поддержания скольжения и качения с одинаковыми скоростями двух тел, производящих одинаковое давление N на поверхность соприкосновения.

Поскольку при чистом качении угловая скорость $\omega = \frac{v}{R}$, отношение мощностей ($W = Fv$) скольжения и качения составляет:

$$\frac{W}{W'} = \frac{\mu N v}{\mu^* N \omega} = \frac{\mu R}{\mu^*}$$

Так, для колеса радиусом $R = 50$ см при $\mu = 0,5$ и $\mu^* = 0,05$ см отношение равно

$$\frac{W}{W'} = \frac{0,5 \times 50}{0,05} = 500.$$

Следовательно, поддерживать качение оказывается в 500 раз легче, чем тащить то же тело волоком. Поэтому люди издавна используют колёса — диски или кольца со спицами, насаженные на ось. Однако вдоль боковой поверхности колёсной оси продолжает действовать трение скольжения. Чтобы уменьшить его, ось смазывают (сухое трение заменяют жидким) или используют подшипники. В них трение скольжения заменено трением качения.

Шарикоподшипник состоит из двух соосных колец, пространство между которыми заполнено одинаковыми шариками или цилиндриками (роликами). Внутреннее кольцо туго насаживается на ось, а внешнее закрепляется в теле и вращается вместе с ним. Каж-

дый шарик катится одновременно по выпуклой поверхности внутреннего кольца и по вогнутой — внешнего.

Деформацию колец и шариков в точках касания сокращают, изготовляя их из твёрдых материалов. При значительных нагрузках на подшипник (например, в большегрузных автомобилях) давление на шарики и кольца достигает огромных значений, так как область их контакта имеет очень малую площадь. В этих случаях вместо шариков применяют цилиндрические ролики, соприкасающиеся с кольцами не в одной точке, а вдоль отрезка прямой (образующей цилиндра). Площадь касания увеличивается — давление уменьшается.

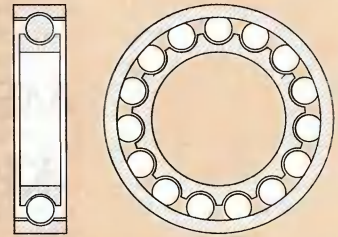


Схема подшипника.

СИЛА ТРЕНИЯ И НЕОБРАТИМОСТЬ ВРЕМЕНИ

Если бы трения не было, то движение тел было бы обратимым. Значит, только изменив знак скорости тела, можно было бы заставить его вернуться из конечного положения в исходное, пройдя все промежуточные состояния в обратном порядке. Засняв и прямое, и обратное движения на киноплёнку и прокрутив одну из них в обратную сторону, мы не обнаружили бы никаких различий.

Однако силы трения изменяют эту ситуацию. Рассмотрим, например, соскальзывание тела с наклонной плоскости, у нижнего края которой стоит упругая стенка — отражатель. Двигаясь вниз, тело налетает на стенку, отскакивает от неё и поднимается вверх по плоскости. В отсутствие трения оно, конечно, вернулось бы на ту же высоту, с которой начало движение. Однако в действительности его кинетическую энергию поглощает сила трения скольжения.

Её работу легко рассчитать: величина силы равна $F_{\text{тр}} = \mu mg \cos \alpha$, направление противоположно соверша-

емому перемещению, а путь, который проходит тело, со-

ставляет $s = \frac{h}{\sin \alpha}$, где h — изменение высоты тела. Следовательно, работа силы трения составляет

$$A = -F_{\text{тр}} s = -\mu mgh \operatorname{ctg} \alpha.$$

Именно на такую величину уменьшается энергия скользящего тела.

Поскольку на обратном пути тело «не дотягивает» до исходной точки, скольжение бруска по наклонной плоскости является необратимым. С физической точки зрения необратимость является следствием перехода энергии в немеханические формы (теплоту), её рассеяния в окружающем пространстве (диссипации энергии). Закон сохранения механической энергии в этих случаях «не работает», и приходится применять общий закон сохранения энергии. Но это требует привлечения термодинамики и выводит нас из мира механики.



МЕХАНИКА ЖИДКОСТЕЙ И ГАЗОВ

ВВЕДЕНИЕ

Когда прокладывают туннель сквозь скалу, самый волнующий момент — сбойка (соединение) встречных отрезков штрека. Едва слышный вначале, шум работы с противоположной стороны становится всё сильнее — и наконец стена скального грунта рушится, объединяя два участка в один общий туннель. Весьма похожие чувства, вероятно, испытали в XIX в. учёные-физики, когда положения кинетической теории газов совпали с экспериментальными результатами, полученными в рамках термодинамики. Два физических подхода — макроскопический (термодинамический) и микроскопический (молекулярно-кинетический) — дополнили друг друга. Идея о том, что вещество состоит из мо-

лекул и атомов, нашла убедительное подтверждение.

Казалось, путь исследования вещества найден: поскольку все предметы состоят из молекул, а те — из атомов, достаточно знать свойства этих атомов, чтобы установить физические свойства вещества, составленного из них, — ведь различных химических элементов всего около ста. На основе кинетической теории удалось определить некоторые свойства газов — например, вывести уравнение состояния газа, описывающее связь параметров состояния между собой. Таким образом, отпадает необходимость определять уравнение состояния экспериментальным способом.

В действительности всё оказалось не так просто. Нужно серьёзно потру-



даться, чтобы определить с помощью кинетической теории важные характеристики газов, такие, как коэффициенты теплопроводности, вязкости и диффузии. Для конденсированных сред — жидкостей, твёрдых тел и сжатых газов — получить результаты ещё труднее, поскольку необходимо учитывать, что молекулы взаимодействуют между собой не только при ударах. Поэтому говорить о том, что эксперимент устарел и все физические явления макромира могут быть объяснены и рассчитаны на основе молекулярно-кинетических представлений, не приходится.

Вещество, строго говоря, не является сплошной средой — оно состоит из молекул и атомов. Что же тогда изучает механика сплошных сред, если таких в природе не встречается?

Дискретное (не сплошное) строение вещества было обнаружено лишь в конце XIX в., а опыты, доказывающие существование молекул, проведены в 1908 г. французским физиком Жаном Батистом Перреном (1870—1942). С этого времени предположение о том, что вещество непрерывно заполняет пространство, казалось бы, должно потерять смысл.

На самом деле обнаружение дискретной структуры строения вещества позволило определить границы применимости механики сплошных сред. Она работает только в тех случаях, когда систему можно разбить на малые (по сравнению с её размерами) объёмы (элементы среды), в каждом из которых содержится всё же достаточно большое количество частиц (молекул, атомов), чтобы оно подчинялось статистическим (макроскопическим) закономерностям. Тогда элементы среды находятся в состоянии термодинамического равновесия, и поэтому их свойства описываются небольшим числом макроскопических параметров. Изменения в таком малом объёме должны про-

исходить достаточно медленно, чтобы термодинамическое равновесие сохранялось.

Если все эти условия выполняются, справедлива гипотеза о сплошности среды, которая и лежит в основе механики сплошной среды. Предметом исследования данного раздела физики может быть всё, что нас окружает: воздух, вода, сооружения, построенные людьми на Земле, сама Земля (её внутренние слои, гидросфера, атмосфера), планеты Солнечной системы и само Солнце — любые тела, состоящие из огромного числа молекул.

Мысленно покинем пределы атмосферы Земли. В околосолнечном пространстве концентрация молекул очень низкая, и можно подумать, что там гипотеза сплошности неприменима. В действительности это неверно. Солнце испускает так называемый солнечный, или звёздный, ветер, состоящий в основном из ядер атомов водорода (протонов), гелия (α -частиц) и электронов. Хотя размеры этих частиц очень малы, они имеют заряд, как бы увеличивающий их размеры. Но что самое важное — такие частицы излучают кванты энергии, которые увеличивают расстояние их взаимодействия. Представьте ситуацию, когда автобус должен перевезти большое количество пассажиров. Если





дело происходит летом, то по салону можно передвигаться, не очень беспокоя стоящих людей. Если столько же человек поедет в том же автобусе зимой в мороз, когда все одеты в тёплые шубы, — свободного места станет меньше. И если кто-то из середины салона захочет пробраться к выходу, начнётся движение не только около этого человека, но и во всём автобусе — пассажиры будут, перемещаясь, толкать соседей. С точки зрения кинетической теории в автобусе люди в шубах представляют собой сплошную среду — возмущение в одной части автобуса быстро распространяется на весь салон. Такую роль шубы играют электрическое поле и электромагнитные волны, создаваемые движущимися заряженными частицами. Следовательно, сплошной средой можно считать не только твёрдое тело, жидкость и газ, но и плазму — даже очень разрежённую, как, например, звёздный ветер. Число частиц в элементе объёма такой среды невелико, однако благодаря большому радиусу действия сил между заряженными частицами макроскопические параметры меняются от элемента к элементу непрерывно.

Научное исследование можно сравнить с географическим открытием. Христофор Колумб в поисках нового пути в Индию добрался до

Америки; объединение методов кинетической теории и термодинамики, т. е. микроскопического и макроскопического подходов, открыло новый путь для изучения целой «части света» в физике — механики сплошных сред. Она, подобно Америке, состоит из двух больших «материков» — механики твёрдого деформируемого тела и механики жидкостей и газов. Словно Панамский перешеек, их объединяют



общие законы и понятия. Первооткрывателями и исследователями этих «материков» стали учёные разных стран и эпох.

Как движется в вакууме материальная точка — тело относительно небольших размеров, досконально известно со времён Исаака Ньютона. Например, тело, брошенное под углом к горизонту, движется по параболе. Гораздо сложнее описать его движение в воздухе, воде или другой среде. Даже великий Ньютон был не в состоянии точно ответить на вопрос, какова будет траектория тела с учётом сопротивления воздуха. В этом случае траектория движения похожа на параболу, но не совпадает с ней. Однако Ньютон сделал много полезного для того, чтобы выяснить, как надо решать подобные задачи. Он, наряду с Архимедом и Леонардо да Винчи, Паскалем и Бернулли, стал одним из первых исследователей «континента» под названием гидроаэромеханика, или механика жидкостей и газов.

Первооткрывателем же другого «континента» — механики твёрдого деформируемого тела — следует, пожалуй, назвать английского естествоиспытателя, изобретателя и архитектора Роберта Гука (1635—1703), установившего линейную связь механического напряжения тела и деформации. После работ матема-

тика, механика и астронома Леонарда Эйлера (1707—1783), швейцарца по происхождению, и французского математика и механика Жозефа Луи Лагранжа (1736—1813) учёные получили представление о том, как надо решать задачу движения твёрдого недеформируемого тела. Однако, чтобы ответить на вопрос, как ведёт себя реальное тело, которое можно деформировать, необходима механика твёрдого деформируемого тела. И к первой половине XIX в. благодаря усилиям французских учёных Симона Дени Пуассона (1781—1840), Огюстена Луи Коши (1789—1857) и Адемара Жана Клода Сен-Венана (1797—1886) началось серьёзное исследование этого раздела науки.

Здесь мы познакомимся более подробно с частью механики сплошной среды — гидроаэромеханикой.

Дирижабль
«Цепелин NT».
Германия. 1998 г.





ЧТО ИЗУЧАЕТ ГИДРОАЭРОМЕХАНИКА

Вода (*греч.* «хидор») и воздух (*греч.* «аэр») играют в нашей жизни очень важную роль. Мы живём надне огромного воздушного океана, называемого атмосферой. Поверхность планеты Земля примерно на $2/3$ покрыта водой. Свойства воздуха и воды — причина многих природных явлений. Эти свойства используются или по крайней мере учитываются почти во всех технических устройствах.

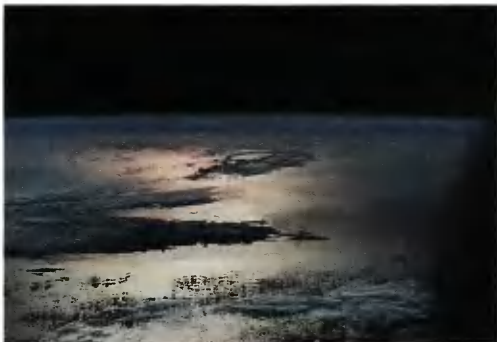
Газ (воздух) и жидкость (вода) — разные фазовые состояния вещества. Естественно было бы исследовать их в различных разделах механики, подобно тому как механика твёрдого деформируемого тела — отдельная часть механики сплошной среды. Но для механики текучих веществ — гидроаэромеханики — нет большой разницы между жидкостью и газом. Жидкости более тяжелы, но вес газов часто тоже необходимо учитывать. Газы довольно легко сжимаются, но их сжимаемость проявляется только при относительно больших скоростях потока. Поэтому для механики наиболее важным оказалось общее свойство газов и жидкостей — способность легко менять форму.

Итак, раздел физики, изучающий механические свойства жидкостей и газов, их взаимодействие между собой и с граничащими с ними твёр-

дыми телами, называется *гидроаэромеханикой*. Гидроаэромеханика тоже состоит из нескольких разделов. Движение со скоростью, много меньшей скорости звука, изучает *гидродинамика* — при таких скоростях сжимаемость среды практически не проявляется и плотность вещества считается постоянной. В воздухе при обычных условиях скорость звука равна примерно 330 м/с (впервые эта величина определена ещё Ньютоном). Плотность воздуха скольконнибудь существенным образом начинает меняться при скоростях, больших 60 м/с (≈ 220 км/ч); при меньших скоростях учитывать сжимаемость воздуха не имеет смысла. Если же воздух (или тело в воздухе) движется со скоростью, сравнимой со скоростью звука или превышающей её, такое движение исследует *газовая динамика*. Кроме того, в гидроаэромеханике можно выделить *аэромеханику*, которая изучает движение летательных аппаратов и тел (например, метеоритов) в атмосфере, полёт насекомых и птиц.

Конечно, границы между всеми разделами гидроаэромеханики условны и нечётки. Объединяет их цель: улучшить форму летательных аппаратов, кораблей, автомобилей; добиться наибольшей эффективности устройств, использующих жидкость или газ (двигателей реактивных самолётов или впрыскивателей топлива в двигателях внутреннего сгорания); оптимизировать производственные процессы, связанные с использованием жидкости или газа (аэрозольное нанесение покрытий, создание оптических волокон и др.). Законы гидроаэромеханики оказываются полезными не только в технике и промышленности — они помогают предсказать или хотя бы объяснить многие природные явления, связанные с динамическими свойствами

Вид на Землю с орбиты.





воздуха и воды. Гидроаэромеханика работает практически во всех отраслях деятельности человека.

Механика сплошной среды основывается на трёх главных законах — сохранения массы, сохранения энергии и втором законе Ньютона. Но, в отличие от механики материальной точки, в законе сохранения энергии учитывается помимо потенциальной и кинетической ещё и внутренняя энергия, а в законе изменения импульса кроме «обычных» объёмных сил — тяжести, электромагнитных и инерционных — на вещество действуют дополнительно и поверхностные силы (поверхностные напряжения). В случае гидроаэромеханики примером поверхностной силы является давление — нормальное напряжение.

Давление p в газе и жидкости создается за счёт хаотических столкновений молекул и связано с другими параметрами состояния вещества — например, температурой T и плотностью ρ — уравнением состояния. Для идеального газа таким уравнением состояния является уравнение Клапейрона — Менделеева:

$$p = \frac{\rho RT}{M},$$

где R — газовая постоянная, M — молярная масса. Для жидкости, учитывая её малую сжимаемость, вместо этого соотношения обычно используют условие несжимаемости, которое существенно упрощает уравнения гидроаэромеханики:

$$\rho = \text{const.}$$

Внутренняя энергия u также определяется уравнением состояния. В небольшом диапазоне температур можно считать, что внутренняя энергия 1 моля вещества линейно зависит от температуры:

$$u = c_v T,$$

где c_v — молярная теплоёмкость вещества при постоянном объёме.



Подводная лодка. Крейсер типа «Тайфун». Россия.

РАВНОВЕСИЕ ЖИДКОСТЕЙ И ГАЗОВ

Гидроаэромеханика — довольно сложная наука, и начать знакомство с ней следует с наиболее простой из её частей — *гидростатикой* (от греч. «статике» — «учение о равновесии»). Гидростатика исследует ситуации, когда движение отсутствует или скорость пренебрежимо мала.

Гидростатика как наука была достаточно хорошо известна ещё в античные времена, поскольку она тесно связана с практической деятельностью людей. Для строительства лодок и кораблей, колодцев и различных гидравлических аппаратов (например, поршневых насосов) необходимо знать основы гидростатики.

Гидростатика позволяет понять некоторые свойства такой важной гидродинамической величины, как давление. Давление на опору оказывают и твёрдые, и сыпучие вещества, но оно отличается от гидростатического. Давление твёрдого тела определяется его весом, давление жидкости — её глубиной. Сила давления p на дно сосуда не зависит от его формы, а определяется только уровнем налитой в сосуд жидкости в соответствии с *гидростатической формулой*:

$$p = p_0 + \rho gh,$$

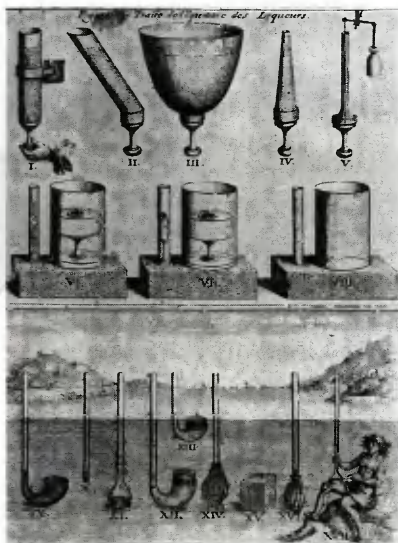
где ρ — плотность жидкости, g — ускорение свободного падения, h —

Шар Паскаля — прибор, демонстрирующий действие закона Паскаля. Он представляет собой заполняемый водой шар с маленькими отверстиями, соединённый с цилиндрической ручкайкой, внутри которой движется поршень. Внешнее давление, производимое поршнем, передаётся во все точки жидкости одинаково. Поэтому струйки воды, вытекающие из отверстий, расположенных в горизонтальной плоскости, оставляют на полу следы равной длины.





Иллюстрации из «Трактата о равновесии жидкостей» Б. Паскаля. 1663 г.



Различие между давлением твёрдого тела и давлением жидкости очень эффектно пояснил на опыте Блез Паскаль: всего лишь стакан воды, вылитый в высокую тонкую трубку, соединённую с наполненной водой закрытой бочкой, создал такое избыточное давление, что вода через щели брызнула наружу.

глубина погружения, p_0 — атмосферное давление.

Сыпучие тела, подобно жидкости и газу, могут оказывать давление на боковую поверхность, но для такого давления не выполняется *закон Пас-*

каля, утверждающий, что давление в любом месте покоящейся жидкости или газа по всем направлениям одинаково, причём давление одинаково передаётся по всему объёму жидкости или газа. В законе Паскаля вес жидкости или газа не учитывается.

К основным законам гидростатики помимо гидростатической формулы и закона Паскаля можно отнести *закон Архимеда*: на погружённое в жидкость (или газ) тело действует выталкивающая сила, равная по величине весу вытесненной жидкости (или газа), направленная против силы тяготения и приложенная к центру тяжести вытесненного объёма.

Закон Архимеда и гидростатическую формулу несложно вывести, используя стандартный для механики сплошной среды приём, называемый иногда правилом РОЗУ. Это сокращение до начальных букв алгоритма — *Разрежем, Отбросим, Заменим, Уравновесим*. Выведем гидростатическую формулу, следуя данному алгоритму.

Разрежем. Мысленно вырежем объём жидкости, представляющий

ФОРМА ПОВЕРХНОСТИ ЖИДКОСТИ ВО ВРАЩАЮЩЕМСЯ СТАКАНЕ

Казалось бы, эта задача не имеет никакого отношения к гидростатике, поскольку жидкость движется. Но если перейти в неинерциальную систему отсчёта, которая связана со стаканом, то по отношению к ней жидкость будет покоиться.

Однако теперь давление p растёт не только при увеличении глубины h , но также и при увеличении расстояния r до оси вращения, потому что в такой системе координат на элемент жидкости действует дополнительно инерционная сила $m\omega^2 r$ (ω — угловая скорость вращения).

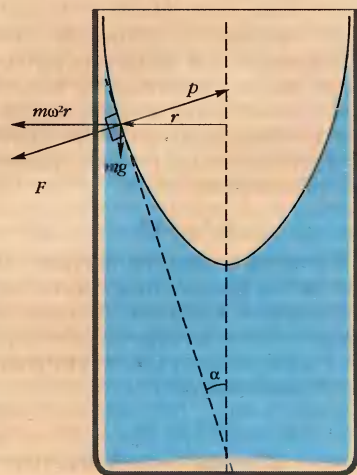
В отличие от силы тяжести, которая постоянна и не зависит от глу-

бины, инерционная сила растёт пропорционально расстоянию до оси вращения r .

Равнодействующая этих сил F должна быть перпендикулярна поверхности жидкости, а тангенс угла между касательной к поверхности и осью вращения обратно пропорционален расстоянию от оси вращения до элемента жидкости:

$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{mg}{m\omega^2 r}.$$

Таким свойством обладает парабола (если точнее, то поверхность представляет собой параболоид вращения). Когда размешивают чай в стакане, получается очень похожая на параболоид поверхность — искажение формы наблюдается только вблизи стенок стакана, где трение жидкости уменьшает скорость.





КАКОЕ КОЛИЧЕСТВО ВОЗДУХА СОДЕРЖИТ АТМОСФЕРА ЗЕМЛИ?

Для воздуха и газов гидростатическая формула несколько видоизменяется, поскольку газы сжимаемы. Плотность газов ρ зависит от давления в соответствии с уравнением Клапейрона — Менделеева: $\rho = \frac{pM}{RT}$. Для них необходимо написать выражение в виде изменения величин: изменение давления Δp в покоящемся газе за счёт силы тяжести обусловлено изменением высоты Δh :

$$\rho = \frac{pM}{RT}$$

в них необходимо написать выражение в виде изменения величин: изменение давления Δp в покоящемся газе за счёт силы тяжести обусловлено изменением высоты Δh :

$$\Delta p = -\rho g \Delta h.$$

Как всегда в физике, понятие производной позволяет более аккуратно записать такое выражение: скорость падения давления с высотой равна

$$\frac{dp}{dh} = -\rho g = -\frac{gM}{RT} p.$$

Решением этого дифференциального уравнения является экспоненциальная функция с показателем $-\frac{gM}{RT} h$:

$$p = p_0 e^{-\frac{Mgh}{RT}}.$$

Зависимость давления от высоты можно записать так:

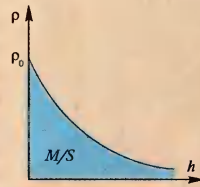
$$p = p_0 e^{-\frac{h}{h_0}},$$

где p_0 — давление у поверхности Земли, $h_0 = \frac{RT}{Mg}$ — так называемая высота стандартной атмосферы. При подъёме на высоту h_0 давление и плотность падают в e раз.

Общая масса воздуха — это сумма (или интеграл) масс элементов-слоёв:

$$M = \int_0^{\infty} \rho dh = \int_0^{\infty} \rho_0 e^{-\frac{h}{h_0}} dh.$$

В результате интегрирования получается: $M = \rho_0 h_0 S$, где S — площадь поверхности Земли, ρ_0 — плотность воздуха у поверхности. Другими словами, если бы плотность атмосферы на любой высоте была такой же, как у поверхности Земли, то эта атмосфера достигла бы высоты всего 7,8 км — вот примерное значение h_0 для стандартной атмосферы Земли. Масса атмосферы M составляет приблизительно $5 \cdot 10^{15}$ т.



собой цилиндр высотой h с горизонтальными основаниями площадью S .

Отбросим (также мысленно) всю жидкость вне этого цилиндра (заметим только, что масса оставшейся жидкости равна $\rho h S$).

Заменим действие отброшенной жидкости действием давления так, чтобы сохранилось состояние равновесия оставшейся жидкости, — Уравновесим все силы. На выделенный нами цилиндрический объём действуют сила тяжести $mg = \rho h S g$ в вертикальном направлении и силы давления. Давление жидкости на боковую поверхность компенсируется, поскольку иначе бы появилась горизонтальная составляющая силы, что противоречит условию равновесия. Вертикальная составляющая сил давления образуется за счёт действия на основания цилиндра. На верхнее основание (предположим, что оно совпадает с поверхностью жидкости) действует сила $p_0 S$. На нижнее основание действует сила $p S$. Можно приравнять сумму этих сил к

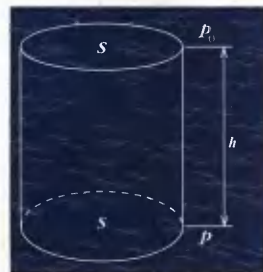
нулю, учитывая направления их действия:

$$\rho g h S + p_0 S - p S = 0.$$

Сократив соотношение на величину площади оснований цилиндра S , получим гидростатическую формулу.

Закон Архимеда с помощью алгоритма РОЗУ можно вывести ещё проще: если погружённое в жидкость тело заменить такой же жидкостью, то получится состояние равновесия — на поверхность тела действует сила давления жидкости, которая уравновешивает вес жидкости внутри поверхности.

Выделенный цилиндрический объём в жидкости.



ВОЗДУШНЫЕ АППАРАТЫ И ПОДВОДНЫЕ ЛОДКИ

Люди уже в древние времена мечтали научиться летать и передвигаться так же свободно, как птицы и насекомые. Однако, совершая первые шаги



в воздухоплавании, человек использовал скорее опыт плавающих существ — рыб и других обитателей моря, нежели летающих.

Важнейшим органом рыбы является плавательный пузырь, который помогает ей держаться на определённой глубине. На рыбу, как и на любое тело, погружённое в воду, действует выталкивающая сила. Согласно закону Архимеда, она равна весу вытесненной воды. Если вес погружённого тела больше, то оно тонет, если меньше — поднимается вверх. Для того чтобы тело оставалось на месте, его вес должен быть равен весу вытесненной воды.

Поскольку мы живём на дне воздушного океана, то можно попытаться тем же способом, что и рыбы, всплыть над поверхностью Земли. Проблема

только в том, что в воде плавательный пузырь достаточно наполнить воздухом, а в атмосфере подобный пузырь надо заполнить газом более лёгким, чем воздух. Это может быть водород, гелий, метан, аммиак и т. п. Однако водород и метан горючи и взрывоопасны, аммиак ядовит, гелий дорог. Потому проще всего оказалось нагреть обычный воздух. Так и поступили братья Жозеф Мишель (1740—1810) и Жак Этьен (1745—1799) Монгольфье, 21 ноября 1783 г. впервые на несколько минут оторвавшись от поверхности Земли с помощью воздушного шара. Изменяя температуру воздуха внутри шара, удобно регулировать высоту полёта — подогревание увеличивает подъёмную силу, а при остывании она уменьшается, и шар опускается.

Сейчас воздушные шары — метеорологические зонды — используют для наблюдения за состоянием атмосферы Земли и других научных исследований. Дирижабли — воздушные аппараты с двигателем — применяют в рекламных целях. Начиная с Первой мировой войны воздушные шары и дирижабли используют для разведки. В годы Второй мировой войны с помощью аэростатов поднимали проволочные заграждения для защиты больших городов от бомбардировщиков. Однако сильный ветер

ОСТОЙЧИВОСТЬ НАДВОДНЫХ КОРАБЛЕЙ

В истории известно много случаев, когда корабль, построенный неумелыми мастерами, сойдя со стапелей и попав в воду, сразу переворачивался и тонул. В положении равновесия центр тяжести корабля обычно находится выше центра водоизмещения — точки приложения архимедовой силы. Однако это не означает, что положение равновесия неустойчиво, поскольку крен корабля смещает точку приложения силы Архимеда. Появившийся из-за крена момент силы будет возвращать корабль в положение равновесия, если точка пересечения плоскости симметрии корабля и вертикальной линии, проходящей через точку приложения силы Архимеда — **метацентр**, находится выше центра тяжести корабля. Иначе даже небольшой случайный наклон

приведёт к тому, что корабль перевернётся, т. е. такое положение равновесия будет действительно неустойчивым.



Метацентр корабля должен находиться выше центра тяжести:
1 — метацентр;
2 — центр тяжести;
3 — центр водоизмещения.



может легко разрушить дирижабль или аэростат, поэтому они не нашли такого широкого применения, как их водные аналоги — подводные лодки, батискафы, батисферы.

Несмотря на схожесть ситуации, условия плавания подводной лодки принципиально отличаются от движения воздухоплавающих аппаратов. Дело в том, что сжимаемость воды очень мала, — обычно она меньше сжимаемости подводной лодки, которая определяется жёсткостью оболочки. В погружённом состоянии субмарина не может зависнуть подобно аэростату, даже если её средняя плотность окажется равной плотности воды. Это положение равновесия подводной лодки, в отличие от аэростата, не является устойчивым — отклонение вниз (или вверх) существенно деформирует корпус лодки, и её средняя плотность увеличится (или уменьшится



при всплытии), тогда как плотность воды останется почти прежней. В результате субмарина будет стремиться удалиться от положения равновесия.

В такой же ситуации находятся рыбы. Несмотря на то что у них есть воздушный пузырь, они должны работать плавниками, чтобы зависнуть на определённой глубине.

Можно проделать простой опыт, иллюстрирующий плавание тела в погружённом состоянии. Для этого надо в высокий прозрачный сосуд с водой поместить перевёрнутый вниз горлышком пузырёк, частично заполненный воздухом так, чтобы дно его лишь незначительно выступало над поверхностью воды (но, конечно, пузырёк должен плавать, а не тонуть). Горлышко высокого сосуда следует затянуть тонкой резиновой плёнкой. Если нажать пальцем на плёнку, давление внутри сосуда увеличится — воздух сожмётся, в том числе и внутри пузырька; он начнёт тонуть. Если отпустить плёнку — пузырёк будет подниматься. Остановить пузырёк на определённой глубине нельзя, поскольку такое положение равновесия неустойчиво. Единственное, чего можно добиться, меняя силу нажима на плёнку, — это чтобы колебания пузырька благодаря его инерции и вязкости жидкости были незаметны для глаза.



Запуск воздушного шара братьев Монгольфье в сентябре 1783 г. Впервые в корзину воздушного шара были помещены животные. Гравюра.



ДВИЖЕНИЕ ЖИДКОСТЕЙ И ГАЗОВ

Описать движение газа или жидкости гораздо труднее, чем решить задачи гидростатики, поэтому теория движения жидкостей и газов начала разрабатываться относительно недавно. Хотя гидроаэродинамика основана на трёх хорошо знакомых в механике законах сохранения массы, импульса и энергии, их формулировки здесь выглядят немного сложнее. Например, определение закона сохранения массы обычно выглядит так: масса системы тел остаётся неизменной. Для жидкости, текущей в трубе, этот закон используют в такой форме (называемой *уравнением неразрывности*):

$$vS = \text{const.}$$

Здесь v — скорость жидкости, S — площадь сечения трубы, по которой течёт жидкость. Сформулировать этот закон можно и так: сколько вливается жидкости в ёмкость, в данном случае в трубу, столько должно и выливаться, если условия течения не изменяются. Скорость в узких участках трубы должна быть выше, чем в широких.

Если посмотреть, как равномерный поток воздуха обтекает крыло-вой профиль дозвукового самолёта, то видно, что снизу не очень сильно искажены *линии тока* (линии, касающиеся вектора скорости потока); там увеличение скорости незначительно. Верхняя сторона крыла гораздо сильнее изменяет течение воздуха — там линии тока сжимаются и скорость заметно больше, чем в самом потоке.

Одно из важнейших уравнений гидромеханики было получено в 1738 г. швейцарским учёным Даниилом Бернулли. Ему впервые удалось описать движение несжимаемой *идеальной жидкости* (силы трения между элементами идеальной жидкости,



а также между идеальной жидкостью и стенками сосуда отсутствуют). Уравнение Бернулли имеет вид:

$$p + \frac{\rho v^2}{2} + \rho gh = \text{const},$$

где p — давление жидкости, ρ — её плотность, v — скорость движения, g — ускорение свободного падения и h — высота, на которой находится элемент жидкости.

Уравнение Бернулли выражает закон сохранения энергии и условие неразрывности течения идеальной жидкости. Так же как и для уравнения неразрывности, предполагается, что жидкость течёт в некоторой трубе (или трубке тока), сечение её меняется плавно и со временем картина течения не меняется (*стационарное течение*). За время Δt элемент жидкости массой $\Delta m = \rho S_1 v_1 \Delta t = \rho S_2 v_2 \Delta t$ спустился с уровня h_1 на уровень h_2 , а его скорость увеличилась с v_1 до v_2 . Приращение кинетической энергии элемента жидкости равно

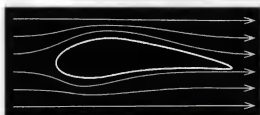
$$\Delta E_k = \Delta m \left(\frac{v_2^2}{2} - \frac{v_1^2}{2} \right) = \frac{1}{2} \rho \Delta t (S_2 v_2^3 - S_1 v_1^3).$$

Изменение потенциальной энергии этого же элемента составляет

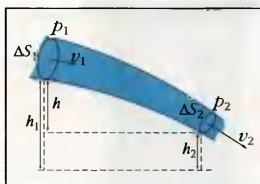
$$\Delta E_{\text{п}} = \Delta m g (h_2 - h_1) = \rho g \Delta t (S_2 v_2 h_2 - S_1 v_1 h_1).$$

Работа сил давления, совершённая над элементом жидкости при его перемещении, равна

$$A = p_1 S_1 v_1 \Delta t - p_2 S_2 v_2 \Delta t.$$



Обтекание крыла дозвукового самолёта равномерным потоком воздуха.



К выводу уравнения Бернулли.



ДАНИИЛ БЕРНУЛЛИ

Швейцарский учёный Даниил Бернулли — выходец из семьи голландского происхождения, многие члены которой стали известными математиками и физиками. Старшие представители этой плеяды — два брата Якоб Бернулли (1654—1705) и Иоганн Бернулли (1667—1748) — были учениками и сподвижниками Готфрида Вильгельма Лейбница и участвовали в разработке открытого им исчисления бесконечно малых.

Якоб Бернулли, занимаясь частной задачей механики об определении формы брахистохроны (от *греч.* «брахистос» — «кратчайший» и «хронос» — «время»), т. е. кривой скорейшего спуска, создал целое направление математического анализа — вариационное исчисление. Им впервые была использована аналогия между движением тела в поле силы тяжести и движением светового луча в неоднородной среде (оптико-механическая аналогия), сыгравшая важнейшую роль в развитии физики. В сочинении «Искусство предположений», изданном в 1713 г., уже после смерти, Якоб Бернулли заложил основополагающие начала теории вероятностей (так называемое распределение Бернулли, независимая схема испытаний Бернулли).

Младший брат и ученик Якоба Иоганн Бернулли завершил создание интегрального исчисления и применил вариационные методы к решению задач геометрии. Кроме того, он ввёл понятие работы, а его метод определения формы цепной линии стал основой статики сооружений.

Сын Иоганна Даниил Бернулли (1700—1782) по праву считается самым выдающимся представителем этой замечательной династии. Детство Даниила, родившегося в Гронингене, протекало в обстановке, типичной для семьи обретающего солидность и уверенность учёного мужа. Иоганн был строгим, но заботливым отцом и учителем для Даниила. Помимо регулярных лекций по математике в университете он читал также курс эксперименталь-

ной физики (как ранее его старший брат Якоб). Лекции Иоганна Бернулли по этому новому тогда предмету пользовались большой популярностью. Этот период жизни и творчества Иоганна Бернулли почти точно повторился в судьбе Даниила, когда он работал в Петербургской академии наук: те же систематические занятия математикой, тот же глубокий интерес к практическим проблемам экспериментальной физики.

Закончив в 1716 г. Базельский университет и получив степень магистра философии, Даниил по совету отца начал изучать медицину в Базеле, а затем продолжил занятия ею в Гейдельберге и Страсбурге. В 1721 г. он получил степень лиценциата медицины, а в 1724 г. издал первую крупную работу «Математические упражнения». Основная её часть посвящена задаче истечения из сосуда. С медицинской точки зрения Бернулли интересовали вопросы определения скорости движения жидкости (крови) в кровеносных сосудах, влияние величины кровяного давления на характер этого движения и т. д. В медицине молодой Даниил черпал разнообразие задач, проникал в их физическую сущность, полунинтуитивно отыскивал оптимальный подход к их решению. Однако смысл задач был чисто гидродинамическим. Позднее в «Гидродинамике» (1738 г.) они получили своё дальнейшее развитие: те же рассуждения относительно разделения жидкости на «капельки», та же аргументация с позиций принципа равенства действия и противодействия и др.

В 1725 г. Даниил Бернулли вместе с группой других иностранных учёных был приглашён в качестве почётного члена в Петербургскую академию наук. До 1730 г. он работал на кафедре физиологии, а в 1730—1733 гг. руководил кафедрой чистой математики. В 1733 г. Даниил Бернулли возвратился в Базель и возглавил в университете кафедру анатомии и ботаники, а с 1750 г. — кафедру опытной физики, которой руководил до своей смерти.

Даниил был одним из самых выдающихся физиков и математиков XVIII столетия. Парижская королевская академия наук десять раз присуждала ему премии за лучшие работы по вопросам математики и физики, а в 1734 г. он разделил со своим отцом Иоганном двойную премию той же академии за сочинение «О причинах различного наклона планетарных орбит к солнечному экватору». В «Трудах» Петербургской, Парижской, Берлинской и других академий, членом которых состоял Даниил, опубликованы многие его исследования.

Основные научные интересы Даниила Бернулли — гидродинамика, кинетическая теория газов и теория колебаний. Он обосновал закон Бойля — Мариотта, предложил дифференциальное уравнение колебаний струны и нашёл его решение в виде бегущих волн. В своём главном труде «Гидродинамика, или Изъяснение сил и движений жидкости», а также в ряде мемуаров Даниил Бернулли развил представления Лейбница о живых силах (на современном научном языке это понятие соответствует кинетической энергии). Применяя их к элементам сплошной среды, он вывел уравнение стационарного движения идеальной жидкости, носящее его имя.



Даниил Бернулли.



Запишем закон сохранения энергии:

$$A = \Delta E_k + \Delta E_{\text{п.}}$$

После подстановки и сокращений получим:

$$p_1 + \frac{\rho v_1^2}{2} + \rho g h_1 = p_2 + \frac{\rho v_2^2}{2} + \rho g h_2,$$

или

$$p + \frac{\rho v^2}{2} + \rho g h = \text{const.}$$

В этом уравнении все слагаемые имеют размерность давления и соответственно называются: p — стати-

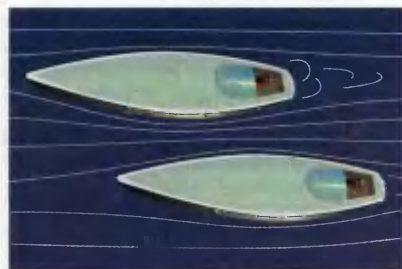
ческое давление, $\frac{\rho v^2}{2}$ — динамическое давление, $\rho g h$ — весовое давление. Можно отметить, что при отсутствии скорости уравнение Бернулли превращается в гидростатическую формулу. Изменение скорости, согласно второму закону Ньютона, происходит под влиянием силы, которая действует на жидкость, — в данном случае это либо сила тяжести mg , либо разность давлений, действующих на объём текущей жидкости. В уравнении Бернулли есть три слагаемых:

$\frac{\rho v^2}{2}$ — кинетическая энергия единицы объёма движущейся жидкости; $\rho g h$ — потенциальная энергия единицы объёма жидкости. Эти два слагаемых точно такие, как в уравнении сохранения энергии для материальной точки. Специфика гидромеханики проявляется в присутствии давления p — перепад давлений в разных частях трубы (или трубки тока) заставляет жидкость двигаться с ускорением, и именно поэтому в формуле Бернулли помимо кинетической и потенциальной энергий единицы объёма жидкости присутствует ещё и давление.

Следовательно, если труба (или трубка тока) устроена так, что давление в ней остаётся постоянным, уравнение Бернулли для жидкости просто

совпадает с законом сохранения энергии для материальной точки. Если же труба устроена так, что можно не учитывать изменение высоты h (в силу малой плотности вещества или малого изменения этой высоты), то результат получится несколько неожиданным. В соответствии с уравнением неразрывности скорость в узких участках трубы растёт, — значит, там должно падать давление. Это естественный результат, поскольку рост скорости (ускорение) может быть обеспечен только за счёт перепада давления и в том месте, где скорость большая, давление должно быть малое. Поэтому при прокачке жидкости через трубу под большим давлением поговорка «Где тонко, там и рвётся» работает с точностью до наоборот. Максимальное давление в трубах устанавливается именно в месте, где труба имеет наибольшее сечение; здесь её материал может не выдержать и разорваться. Узкие части трубы в этом отношении безопасны, но в них давление может упасть настолько, что жидкость закипит, — это тоже приведёт к разрушению материала трубы.

Уравнение Бернулли просто объясняет множество явлений, происходящих в жидкости и газе. Вспомните, например, крыло самолёта, которое обтекает равномерный поток воздуха. Даже при отсутствии у крыла угла атаки, т. е. наклона по направлению к набегающему потоку, существует подъёмная сила, направленная вверх. Откуда она берётся? Именно



На кораблях, идущих параллельным курсом, со стороны воды действуют гидростатические силы, толкающие их друг к другу.



благодаря такой форме крыла в соответствии с уравнением неразрывности получается, что скорость воздуха под крылом меньше, чем скорость над ним. Согласно уравнению Бернулли, это означает, что давление снизу крыла больше, чем давление сверху. Разность давлений и создаёт подъёмную силу.

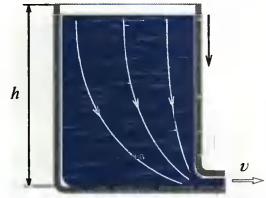
Капитаны морских и речных судов прекрасно знакомы с коварным проявлением уравнения Бернулли. Если два корабля идут параллельным курсом слишком близко один к другому, возникает гидродинамическая сила, толкающая их друг к другу, в результате чего может произойти кораблекрушение. Формула Бернулли позволяет понять, почему возникает эта сила. Из закона неразрывности следует, что относительная скорость воды между судами будет больше, чем снаружи. Это проявится в том, что давление воды на корабли в пространстве между ними окажется ниже, чем извне. Именно перепад давления по разные стороны кораблей создаёт силу, толкающую их друг к другу.

Явление *кавитации* (от лат. *cavitas* — «углубление», «полость») также объясняется уравнением Бернулли. Если скорость течения по какой-либо причине значительно возрастёт, то давление сильно понизится — на-

столько, что жидкость закипит. Такую скорость можно получить, если пропускать жидкость через очень узкий участок трубы. Большие скорости создаются и при быстром вращении корабельного винта. Процесс образования полостей (пузырьков) в движущейся жидкости вследствие понижения давления и называется кавитацией. Казалось бы, безобидных пузырьков нечего опасаться, однако вскоре они попадают в области жидкости с нормальным давлением и там схлопываются. Это схлопывание сопровождается гидродинамическими эффектами, способными привести к быстрому износу и разрушению корабельного винта или трубы, по которой протекает жидкость.

Закон Бернулли позволяет измерять скорость движения жидкости или газа с помощью манометра (от греч. «манос» — «редкий», «неплотный» и «метрео» — «измеряю») — прибора для определения давления жидкостей и газов.

Можно вычислить, с какой скоростью вода будет выливаться из широкого сосуда, если около дна сосуда сделать небольшое отверстие:



Скорость вытекания жидкости из отверстия внизу подчиняется закону Торричелли:

$$v = \sqrt{2gh}.$$

Эванджелиста Торричелли (1608—1647) — итальянский физик и математик, ученик Галилео Галилея. Изобрёл ртутный барометр, спиртовой термометр и многое другое.



Трубка Пито — Прандтля — прибор для измерения скорости потока. В точке *B* давление жидкости равно *p*. В точке *A* поток тормозится — давление там равно $p + \rho v^2/2$. Разность давлений измеряется разностью уровней в манометре: $\rho v^2/2 = \rho g \Delta h$. Прибор изобретён французским учёным Анри Пито в 1732 г., позднее усовершенствован Людвигом Прандтлем.



«...Он увидел красивую лужайку и посреди её — маленький, освещённый луной домик в четыре окошка. На ставнях нарисованы солнце, луна и звёзды. Вокруг росли большие лазерные цветы. Дорожки посыпаны чистым песочком. Из фонтана била тоненькая струя воды, в ней подпрыгивал полосатый мячик».

Из сказки
А. Н. Толстого
«Золотой ключик,
или Приключения
Буратино»



$v = \sqrt{2gh}$, где h — уровень жидкости в сосуде. Эта формула, известная как закон Торричелли, также следует из уравнения Бернулли.

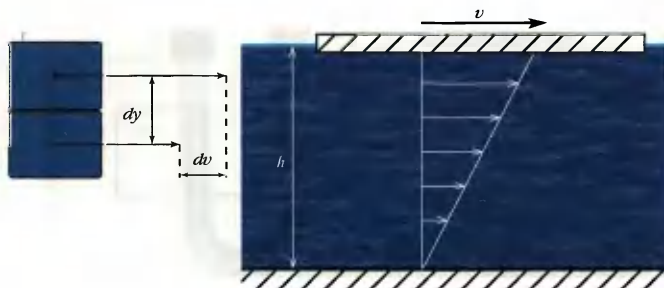
Несложные эксперименты, которые объясняются с помощью закона Бернулли, легко провести в домашних условиях. Например, если направить струю воды из водопроводного крана вертикально вверх (с помощью резиновой трубки) и поместить в неё шарик для настольного тенниса, то он будет удерживаться на вершине фонтанчика. Струю воды можно заменить струёй воздуха, бьющей из

пылесоса (шланг пылесоса должен быть присоединён со стороны нагнетания воздуха), а шарик для настольного тенниса заменить теннисным мячом. Даже если немного отклонять струю от вертикального направления, мячик всё равно будет удерживаться в струе.

Чтобы поднять с шероховатой поверхности лист бумаги, на него надо подуть из трубочки с расстройбом.

ГИДРОДИНАМИКА ЭЙЛЕРА И НАВЬЕ — СТОКСА

Уравнение Бернулли позволяет объяснить очень много интересных гидродинамических явлений, но гораздо больше явлений, происходящих в движущихся жидкостях и газах, с его помощью объяснить нельзя. Используя это уравнение, можно прийти к парадоксальным результатам, которые невозможны в природе. В частности, получается, что при протекании жидкости по трубе постоянного сечения давление не падает и жидкость течёт, не испытывая сопротивления. Не должны испытывать сопротивления и тела, движущиеся равномерно и прямолинейно. Это явление назвали парадоксом Д'Аламбера — Эйлера, так как он был обнаружен французским учёным Жаном Лероном Д'Аламбером в 1744 г. и петербургским академиком Леонардом Эйлером в 1745 г. Жидкостей, обладающих подобными удивительными свойствами, в природе не встречается, поэтому такую теоретическую жидкость и назвали идеальной. В XIX в. сложилась ситуация, обычно предшествующая рождению новой науки: экспериментаторы наблюдали и регистрировали гидроаэродинамические явления, не поддающиеся объяснению, а теоретики, основываясь на представлениях об идеальной жидкости, получали результаты, которые довольно плохо согласовывались с реальностью.



Опыт Ньютона.



Выводя дифференциальное уравнение движения идеальной жидкости, Леонард Эйлер полагал, что силы, действующие на любую поверхность в ней, так же как и в неподвижной жидкости, перпендикулярны самой этой поверхности. Такое предположение существенно упростило уравнения движения, позволяя найти их решения и описать движение жидкости аналитически. Иногда подобные упрощения оправданны, иногда нет, и, конечно, необходимо знать, когда и почему гидродинамика Эйлера — теория идеальной жидкости — перестаёт работать.

Реальная жидкость отличается от идеальной тем, что она обладает внутренним трением, или вязкостью. Два соприкасающихся элемента жидкости, двигающиеся в одном и том же направлении, но с разными скоростями, воздействуют друг на друга. Сила взаимодействия ускоряет медленно движущийся элемент жидкости и замедляет более быстрый. Ньютон предположил, что величина этой силы (называемой силой внутреннего трения) пропорциональна разности скоростей элементов жидкости. Конечно, в сплошной среде никаких элементов нет и это понятие используют лишь для наглядности, а скорость жидкости распределена непрерывно. Следовательно, сила внутреннего трения F пропорциональна изменению скорости жидкости v в направлении, перпендикулярном движению, и зависит от площади S соприкосновения элементов жидкости:

$$F = \eta \frac{dv}{dy} S.$$

Это закон вязкого трения Ньютона. Коэффициент пропорциональности в нём называется коэффициентом динамической вязкости (η). Жидкости, в которых внутреннее трение подобным образом зависит от изменения скорости, называются *ньютоновскими*, или жидкостями с линейной вязкостью.

Величину коэффициента динамической вязкости (и справедливость данного закона) Ньютон определил с помощью несложного опыта: он передвигал по поверхности жидкости плоскую пластинку с той или иной скоростью. Для того чтобы поддерживать эту скорость постоянной, требовалась сила, которая при небольшой глубине жидкости оказалась прямо пропорциональна площади S и скорости пластинки v и обратно пропорциональна глубине жидкости h :

$$F = \eta \frac{v}{h} S.$$

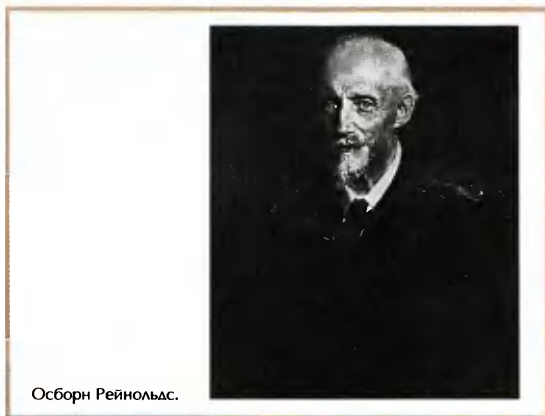
И хотя при увеличении глубины жидкости h сила вязкого трения пластинки не становится исчезающе малой, эта формула довольно точно описывает взаимодействие между соприкасающимися элементами жидкости. Чем больше разность скоростей, тем больше сила, с которой они воздействуют друг на друга, заставляя притормаживать слишком быстро движущиеся элементы и разгоняя слишком медленные. В результате относительное движение в жидкости прекращается (но иногда это может произойти очень не скоро).

В более строгой формулировке линейная зависимость вязкого трения от изменения скорости движения жидкости называется уравнением Навье — Стокса. Оно учитывает сжимаемость жидкостей и газов и, в отличие от закона Ньютона, справедливо не только вблизи поверхности твёрдого тела, но и в каждой точке жидкости (у поверхности твёрдого тела в случае несжимаемой жидкости уравнение Навье — Стокса и закон Ньютона совпадают). Любые газы, для которых выполняется условие сплошности, подчиняются и уравнению Навье — Стокса, т. е. являются ньютоновскими жидкостями. Среди



Джордж Габриель Стокс.

Дифференциальные уравнения движения вязкой жидкости (газа) сформулировал в 1822 г. французский инженер и исследователь строительной механики Луи Мари Анри Навье (1785—1836). В середине XIX в. их дополнил английский физик и математик Джордж Габриель Стокс (1819—1903).



жидкостей довольно часто можно встретить такие, динамика которых описывается более сложными (по сравнению с уравнением Навье — Стокса) соотношениями: например, загустевающие краски, лаки, строительные растворы, мёд, смолы, глинистые и болотистые почвы и др. Вода, бензин, спирт, глицерин и многие другие жидкости являются ньютоновскими.

Вязкость жидкости и газа обычно существенна только при относительно малых скоростях, потому иногда говорят, что гидродинамика Эйлера — это частный (предельный) случай больших скоростей гидродинамики Навье — Стокса. При малых скоростях в соответствии с законом вязкого трения Ньютона сила сопротивления тела пропорциональна скорости. При больших скоростях, когда вязкость перестаёт играть существенную роль, сопротивление тела пропорционально квадрату скорости (что также впервые обнаружил и обосновал Ньютон). Такую зависимость вывел английский физик и инженер Осборн Рейнольдс (1842—1912).

Критерием, который помогает ответить на вопрос, есть ли необходимость учитывать вязкость, является *число Рейнольдса* Re . Оно равно отношению энергии движения эле-

мента текущей жидкости к работе сил внутреннего трения.

Рассмотрим кубический элемент жидкости с длиной ребра l . Кинетическая энергия элемента равна

$$E_k = \rho \frac{l^3 v^2}{2}.$$

Согласно закону Ньютона, сила трения, действующая на элемент жидкости, определяется так:

$$F = \eta \frac{v}{l} l^2 = \eta v l.$$

Работа этой силы при перемещении элемента жидкости на расстояние l составляет

$$A = Fl = \eta v l^2,$$

а отношение кинетической энергии элемента жидкости к работе силы трения равно

$$\frac{E_k}{A} = \frac{\rho l^3 v^2}{2 \eta v l^2} = \frac{\rho l v}{2 \eta}.$$

Отношение $\frac{\rho l v}{\eta} = Re$ называется

числом Рейнольдса. Таким образом, Re — это безразмерная величина, которая характеризует относительную роль сил вязкости. Например, если размеры тела, с которым соприкасаются жидкость или газ, очень малы, то даже при небольшой вязкости Re будет незначительно и силы трения играют преобладающую роль. Наоборот, если размеры тела и скорость велики, то $Re \gg 1$ и даже большая вязкость почти не будет влиять на характер движения.

Однако не всегда большие числа Рейнольдса означают, что вязкость не играет никакой роли. Так, при достижении очень большого (несколько десятков или сотен тысяч) значения числа Re плавное *ламинарное* (от лат. lamina — «пластинка») течение превращается в *турбулентное* (от лат. turbulentus — «бурный», «беспорядочный»), сопровождающееся хаотическими, нестационарными



ми движениями жидкости. Этот эффект можно наблюдать, если постепенно открывать водопроводный кран: тонкая струйка течёт обычно плавно, но с увеличением скорости воды плавность течения нарушается. В струе, вытекающей под большим напором, частицы жидкости перемещаются беспорядочно, колеблясь, всё движение сопровождается сильным перемешиванием.

Появление турбулентности весьма существенно увеличивает лобовое сопротивление летательных аппаратов и подобные ему характеристики (в трубопроводе скорость турбулентного потока меньше скорости ламинарного при одинаковых перепадах давления). Но не всегда турбулентность плоха. В силу того что перемешивание при турбулентности очень значительно, теплообмен — охлаждение или нагревание агрегатов — происходит существенно интенсивнее; быстрее идёт распространение химических реакций.

Однако самое удивительное в том, что турбулентность может уменьшить сопротивление некоторых тел. Эту особенность используют на практике, наиболее наглядно применение её в спорте. Если обратить внимание на форму мячика для

гольфа, то легко заметить, что он не идеально круглый, а покрыт небольшими вмятинками. Они играют роль турбулизаторов — превращают ламинарный поток в турбулентный. Оказывается, в турбулентном потоке сопротивление мячика примерно в шесть раз меньше, чем в ламинарном, и он летит дальше. Волейболисты также используют явление турбулентности, применяя специальную технику удара, при котором мяч в начале своего полёта обтекается турбулентным потоком воздуха. Турбулентное сопротивление мяча относительно мало, но не равно нулю, из-за него скорость мяча будет снижаться, в результате чего режим обтекания станет ламинарным. Это существенно увеличит сопротивление, траектория полёта мяча резко пойдёт вниз. Такое сложное поведение мяча, как правило, вводит в заблуждение неопытного игрока противоположной команды. Начальная скорость мяча при столь коварной подаче может меняться в очень небольших пределах. Обычно мяч подаётся либо слишком сильно, и тогда практически весь его полёт протекает в турбулентном режиме, либо слишком слабо — тогда обтекание происходит ламинарно.



Луи Мари Анри Навье.

УДИВИТЕЛЬНЫЕ ЯВЛЕНИЯ ГИДРОАЭРОМЕХАНИКИ

ГИДРАВЛИЧЕСКИЙ УДАР

С точки зрения гидроаэромеханики жидкости и газы очень схожи между собой. Однако плотность жидкости во много раз больше плотности газа. Например, плотность воды больше плотности воздуха при нормальных условиях примерно в 800 раз. Поэтому гребные винты морских и речных судов сравнительно меньше пропеллеров самолётов — тяжёлая жидкость «работает» эффективнее, чем лёгкий

воздух. По той же причине жидкость может оказаться гораздо опаснее и привести к аварии.

Почему газовые и водопроводные краны устроены по-разному? Конструкция газового крана значительно проще — поворот рычага на четверть оборота сразу перекрывает движение газа по трубе. Когда-то и водопроводные краны были почти такими же, что, как оказалось, часто приводило к авариям водопроводных систем. Сейчас подобные,



просто устроенные краны остались лишь на самоварах. Если же кран открывает воду, находящуюся под большим давлением (например, пожарный кран), его надо долго крутить, прежде чем перекрыть воду или сделать полный напор.

Что произойдёт, если внезапно остановить воду, текущую в трубе, с помощью жёсткой заслонки? Гидроаэромеханика позволяет легко ответить на данный вопрос: давление в трубе возрастёт на величину ρva , где ρ — плотность жидкости или газа, v — скорость течения и a — скорость звука. Скорость звука в трубе с водой равна 1400 м/с, поэтому если вода текла по трубе, например, со скоростью 2 м/с, то легко подсчитать, что давление увеличится примерно на $28 \cdot 10^5$ Па (что в 28 раз больше атмосферного). Пусть площадь заслонки 5 см^2 ; вода на неё будет давить с силой 1400 Н. Причём величина скорости звука 1400 м/с означает, что именно с такой скоростью станет распространяться повышенное давление по трубопроводу. Если где-то обнаружится непрочный участок тру-

бы, он будет прорван. Газ в сравнении с жидкостью обладает гораздо меньшей плотностью, да и скорость звука в нём в несколько раз меньше, поэтому газ, даже находящийся под большим давлением, не может создать удар, подобный гидравлическому.

Кстати, когда резко перекрывают воду, и с обратной стороны заслонки могут возникнуть неприятности. Если по другую сторону от заслонки поток воды достаточно протяжённый, то, по аналогии, давление должно упасть (в рассмотренном примере на 28 атмосфер), что, конечно, невозможно, поскольку в жидкости давление не может быть отрицательным. Поэтому там образуется вакуум — точнее, жидкость, двигаясь по инерции, оторвётся от заслонки, а пространство между жидкостью и заслонкой заполнится водяным паром под очень низким давлением. В конце концов поток жидкости под действием внешнего давления затормозится, остановится и с нарастающей скоростью двинется в противоположном направлении. В результате гидравлический удар повторится и с другой стороны заслонки.

Гидравлический удар может также сыграть полезную роль. Если повреждение уже имеется, для того чтобы отыскать его расположение, придётся раскопать значительный участок трубопровода. Избежать трудоёмкой работы и довольно точно определить положение протечки позволит небольшой гидравлический удар. Он создаст волну, бегущую по трубопроводу, которая, отразившись от места повреждения, вернётся через некоторое время. По этому времени легко определить расстояние до повреждённого участка.

КУМУЛЯТИВНЫЙ ЭФФЕКТ

На несложном опыте можно воспроизвести явление гидроудара. Для этого понадобятся пробирка с водой и





жёсткая поверхность. Что же произойдёт, если с некоторой высоты уронить на стол вертикально расположенную пробирку с водой? Поскольку пробирка в этом эксперименте может разбиться, необходимо принять меры предосторожности. Для того чтобы избежать неудачного окончания эксперимента, ронять пробирку нужно с небольшой высоты: 1—2 см.

При контакте пробирки с поверхностью стола начинается гидроудар, только теперь роль заслонки играет дно пробирки, останавливающее вертикальное движение воды. Давление во внезапно остановившейся массе воды возрастёт, но, конечно, не так значительно, как при движении воды по прочной металлической трубе, менее подверженной деформациям, нежели стекло, из которого сделана пробирка. Ничего интересного не произойдёт, если поверхность воды в пробирке горизонтальна, — например, пробирка изнутри покрыта тонким слоем парафина. Однако обычное чистое стекло вода смачивает, образуя мениск (от *греч.* «менискос» — «полумесяц») — вогнутую поверхность, которую легко увидеть, посмотрев на пробирку сбоку. Такая форма соответствует балансу силы тяжести и сил поверхностного натяжения. При свободном падении пробирки сила тяжести перестанет сдерживать поверхностное натяжение, и жидкость начнёт растекаться по стенкам пробирки, увеличивая кривизну мениска. В момент удара о стол, наоборот, к силе тяжести добавится инерция движения жидкости, и силы поверхностного натяжения не смогут помешать стремительному выпрямлению поверхности воды в пробирке. В результате возникшего течения жидкость двинется от краёв мениска к нижней его части на оси симметрии пробирки, и как следствие вверх устремится тоненькая струйка воды. Высота, на которую поднимется эта струйка, будет суще-



Кумулятивный эффект в пробирке.

ственно больше той, с которой упала пробирка. Если, рискуя её разбить, уронить пробирку с высоты нескольких сантиметров, струйка воды вполне может достичь потолка. Подобное явление называется *кумуляцией* (от *лат.* *cumulatio* — «скопление») или *кумулятивным эффектом*.

Упругий мячик при ударе о жёсткую поверхность не может подскочить выше того уровня, с которого он упал (если, конечно, не придать ему начальную скорость), — это следует из закона сохранения энергии. Жидкость поднимется на гораздо большую высоту, что на первый взгляд противоречит закону сохранения энергии. На самом деле, конечно, энергия сохраняется. Просто при движении жидкости значительная часть энергии всей массы передаётся очень малой её части, за счёт чего тоненькая струйка и приобретает большую скорость движения.

Кумулятивный эффект проявляется при встрече струй или встречного струйного (например, конического) течения. Как бы ни был мал угол падения струй, при их растекании всегда помимо основной образуется встречная струйка, которая может приобретать большую скорость. Такие струйки, возникающие,

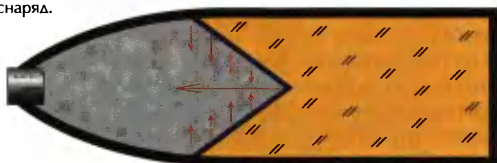


Михаил Алексеевич
Лаврентьев.

в частности, при схлопывании пузырьков в процессе кавитации, могут легко разрушать даже достаточно прочные материалы.

Российский математик и механик академик Михаил Алексеевич Лаврентьев (1900—1980) писал: «В 1941 г. немцы придумали кумулятивный противотанковый снаряд. На конусе снаряда — запал. При ударе он вызывает детонацию и воспламеняет весь заряд. Снаряд пробивает всю броню. В 1944 г. такие немецкие снаряды попали в наши руки и в руки союзников. Начался широкий эксперимент. При этом обнаружили много дополнительных эффектов и парадоксов. Стали выяснять, что же летит, что пробивает? Сначала думали, что это бронепрожигающий снаряд, что броню пронзает струя горячего газа. Нет, оказалось, что летит металл, причём самым необъяснимым образом: перед плитой со скоростью 8 км/с, внутри плиты 4 км/с, за плитой снова 8 км/с».

Кумулятивный снаряд.



При таких скоростях металл ведёт себя, как жидкость. После детонации заряда коническая металлическая воронка внутри снаряда начинает схлопываться. Одновременно вдоль оси симметрии в разных направлениях распространяются две кумулятивные струйки, причём скорость струйки внутри воронки существенно больше скорости внешней струи. Такие высокоскоростные струи, встречаясь с металлической преградой, преодолевают в ней расстояние, равное половине своей длины. Чем длиннее металлическая воронка в снаряде, тем большую толщину металла пробьёт образовавшаяся в процессе кумуляции струйка.

ПОГРАНИЧНЫЙ СЛОЙ

Если вы помешиваете ложечкой чай в стакане, форма поверхности воды представляет собой параболюид вращения. Оказывается, на дне стакана происходят не менее интересные и даже парадоксальные явления. Чаинки имеют более высокую плотность, чем вода (иначе они бы не падали на дно). Значит, при вращении на них действует большая, чем на воду, сила инерции, которая должна отнести их подальше от центра вращения. Однако чаинки вопреки этому предположению собираются именно там. Почему так происходит?

Слегка изменив опыт, можно сильно изменить результат: если наполненный стакан вращать с постоянной угловой скоростью, то чаинки соберутся там, где положено, — у его стенок. Что изменяет в опыте движение стакана? Жидкость в силу своей вязкости прилипает к поверхности твёрдых тел. Когда стакан покоится, элементы жидкости, которые непосредственно соприкасаются со стаканом, тоже покоятся, а элементы, соседние с ними, из-за вязкости тормозятся — вблизи стенок скорость плавно возрастает от нуля. Поэтому



у стенок поверхность жидкости те-
ряет свою параболическую форму.
Область, где стенки стакана замед-
ляют движение жидкости и её поверх-
ность отклоняется от формы парабо-
лоида, относительно невелика.

Таким же образом и неподвижное
дно стакана тормозит жидкость. Дав-

ление жидкости возрастает по мере
удаления от оси вращения. Сила дав-
ления на элемент жидкости со сто-
роны оси вращения меньше силы
давления с противоположной сторо-
ны. Эта разность является причиной
центростремительного ускорения
элемента жидкости, из-за чего он

БОЛОТО — НЕНЬЮТОНОВСКАЯ ЖИДКОСТЬ

Сколько трагических историй и ужасных легенд связано с болотами! Человек и животное, плавая, свободно дер-
жится на поверхности воды, но никакое умение, никакие
действия не помогут выбраться из трясины.

Почему так коварно болото? По некоторым признакам
оно напоминает жидкость: по крайней мере оно может
течь и в нём можно утонуть. С другой стороны, топь ведёт
себя как твёрдое тело — довольно тяжёлые предметы, на-
пример камни, способны держаться на её поверхности, не-
смотря на то что их плотность больше плотности вещества,
составляющего болото. Кстати, его плотность превышает
плотность воды, а плотность человека и животных близка
к ней, поэтому, если бы для болота выполнялся только за-
кон Архимеда, в нём нельзя было бы утонуть.

Всё-таки болото можно считать жидкостью, но осо-
бой — вести себя как жидкость трясина начинает только
тогда, когда нагрузки превышают некую предельную вели-
чину τ . Поэтому тяжёлый камень не обязательно утонет в
болоте: сначала он будет погружаться, но при этом воз-
растает выталкивающая сила и в какой-то момент может
оказаться, что вес камня, скомпенсированный частично
силой Архимеда, уже не создаёт нагрузки, большие τ , и
возникает состояние недопогружения.

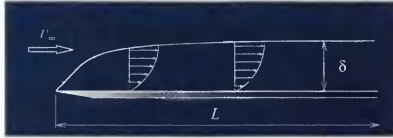
Такое же состояние возникает, когда человек делает
первый шаг по трясине. В обычной жидкости нога погру-
жается до тех пор, пока вес всего тела не уравнивается
выталкивающей силой (или пока нога не достигнет дна).
В болоте же происходит недопогружение — процесс по-
гружения останавливается тогда, когда разница между
весом тела и вытесненного вещества болота станет равной
величине τ . Так болото обманывает человека, завлекая
дальше и дальше в глубь трясины. Второй шаг тоже вызовет
недопогружение, создавая иллюзию того, что всё в поряд-
ке. Она рассеется при попытке вытащить ногу из трясины.
Основная проблема в том, что под ногой начнёт образо-
вываться пустота. Обычная жидкость, сразу же следуя за
ногой, не позволяет ей возникнуть, но грязь болота не явля-
ется обычной жидкостью. В результате разрежённое про-
странство под ногой создаст дополнительную силу, направ-
ленную вниз. (Вспомните, как при ходьбе по неглубокой
обычной грязи постоянно хлопает под ногами — это с
шумом всасывается воздух в освобождающееся простран-

ство под поднимаемой ступнёй.) Чтобы преодолеть эту
силу, другую ногу придётся погрузить несколько глубже.
Каждая следующая попытка освободить ногу или какую-то
часть тела из трясины будет вызывать погружение тела в
целом. Лучше обходить болото стороной или хотя бы иметь
прочный шест, которым можно проверить, насколько
надёжен путь в опасных местах, и на который можно опе-
реться, чтобы преодолеть всасывающую силу болота.

Аналогичная трагическая ситуация складывается и в том
случае, когда погрузившаяся подводная лодка ложится на
глинистый грунт. Выдавливая при этом из-под себя воду,
лодка лишается возможности использовать архимедову
силу для всплытия и «присасывается» таким образом ко дну.
Давление толщи воды сверху способствует её медленно-
му погружению в глину, засасывающее действие которой
не позволяет лодке вырваться из «вязкого плена», несмотря
на работу винтов.

Первые модели неньютоновских жидких сред были
предложены во второй половине XIX в. Джеймсом Кларком
Максвеллом и Уильямом Томсоном. В XX в. благодаря ра-
ботам Бингама и Рейнера этот раздел механики сплошных
сред стал самостоятельной наукой, которая носит назва-
ние *реология* (от греч. «реос» — «течение», «поток»).
Объектами изучения реологии являются такие материалы,
как краски, лаки, битум, почвы, горные породы и т. п.





Пограничный слой.

движется по круговой траектории. Но когда элемент жидкости приближается ко дну стакана, скорость из-за эффекта прилипания уменьшается, а разность давлений остаётся прежней. Центробежная сила её не компенсирует, и поэтому жидкость течёт от большего давления к меньшему. Такое течение и увлекает за собой чаинки на дне, собирая их в центре.

В соответствии с теорией вязкой жидкости размер δ области, где происходит изменение скорости от нуля на поверхности тела до скорости течения v , оценивается как

$$\delta \approx \frac{L}{\sqrt{Re}},$$

где L — размер обтекаемого тела. В случае со стаканом чая вязкость воды при 20°C около 10^{-2} г/(с·см), плотность — 1 г/см^3 , длина окружности стакана примерно 20 см, скорость, с которой вращается вода в стакане, примем равной 20 см/с (речь идёт только о порядках величин). Следовательно, толщина слоя, в котором существенную роль играет вязкость, всего около 1 мм.

Таким образом, размеры этой области гораздо меньше размеров стакана. Подобная ситуация весьма характерна — область, где вязкость существенна, относительно невелика по сравнению с обтекаемым телом. Её называют *пограничным слоем*. Вне данного слоя можно считать жидкость невязкой. И потому, хотя такой жидкости в природе не существует, теория невязкой жидкости очень широко применяется. Эта более простая (по сравнению с теорией вязкой жидкости) теория довольно точно описывает течение в тех случаях, когда

размеры пограничного слоя пренебрежимо малы по отношению к размерам самого обтекаемого тела.

УСТОЙЧИВОСТЬ ТЕЧЕНИЙ

В 1883 г. Осборн Рейнольдс провёл несколько простых, но эффектных опытов, которые прояснили механизм возникновения турбулентности. Они способствовали бурному развитию области гидроаэродинамики, называемой теорией устойчивости течений.

Рейнольдс исследовал течение жидкости в длинной прямой трубе с постоянным поперечным сечением и гладкими стенками, куда жидкость попадала из большого бака. Из воронки в трубу вытекала такая же, но окрашенная жидкость. Наблюдая за движением жидкости в трубе, он увидел, что при малых скоростях течения струйка подкрашенной жидкости тянется по всей длине трубы прямой, резко очерченной линией. Течение это прямолинейное, состоящее из движущихся друг относительно друга слоёв, т. е. ламинарное. Слои жидкости у стенки трубы практически не перемещаются, максимальная скорость — у слоёв, наиболее удалённых от стенок.

Если постепенно увеличивать среднюю скорость течения в трубе, то, начиная с некоторого значения скорости v , окрашенная струйка будет размываться и основная жидкость окрасится почти равномерно по всей длине. Это означает, что прямолинейность, слоистость течения



Опыт Рейнольдса:
1 — профиль скоростей при ламинарном движении;
2 — профиль скоростей при турбулентном движении.



нарушена, у скорости течения жидкости появились составляющие, перпендикулярные направлению основного течения к стенкам трубы. Если среднюю скорость оставить неизменной, но увеличивать диаметр трубы, то опять же, начиная с некоторого диаметра D , ламинарность течения нарушится.

Наконец, можно поменять жидкость — вместо воды взять масло, глицерин или какой-либо газ, например воздух. Эти жидкости и газы имеют разную плотность ρ и вязкость η . Рейнольдс заметил, что переход от ламинарного течения происходит всегда при одном и том же отношении величин диаметра трубы, скорости и плотности к вязкости жидкости или газа. Это отношение $\frac{\rho v D}{\eta}$ с тех пор называется числом Рейнольдса.

Для труб кругового сечения Рейнольдс установил, что критическое значение числа Re , соответствующее потере ламинарности течения, равно примерно $1,3 \cdot 10^4$. В современных, более тщательных опытах шероховатости трубы и вибрации уменьшены и критическое число Рейнольдса доведено до величины $5 \cdot 10^4$.

Сам Рейнольдс, объясняя полученную закономерность, уподобил движение жидкости движению отряда воинов, ламинарное течение — монолитному строю. Скорость жидкости и диаметр трубы — это скорость и величина отряда, вязкость — дисциплина, плотность — вооружение. Чем больше отряд, чем быстрее его движение и тяжелее вооружение, тем раньше распадется строй.

Ответ на вопрос, почему теряется ламинарность течения, заключается в его устойчивости относительно малых возмущений. В действительности не бывает идеально гладких труб — шероховатости поверхности создают возмущения в потоке. Вибрации экспериментальной установки, шум, который идет извне лаборатории, — всё это также создает дополнительные возмущения.

Передаваемые течению, они могут затухать, и тогда такое течение называется устойчивым. В противном случае возмущения развиваются, возрастают со временем (или по мере продвижения их по потоку) и слоистость течения теряется. Таким образом кинетическая энергия движения основного потока преобразуется в энергию возмущений.

АЭРОДИНАМИКА

ПАРАДОКС Д'АЛАМБЕРА — ЭЙЛЕРА

Как это ни удивительно, но, с точки зрения физиков и математиков, занимающихся расчётами обтекания летательных аппаратов потоками воздуха, движение со сверхзвуковой скоростью проще дозвукового движения. Людям, далёким от аэродинамики, сама форма сверхзвукового самолёта кажется более естественной: заострённый нос, тонкие стреловидные

Сверхзвуковой самолёт.
Экспериментальный
сверхзвуковой лайнер
ТУ-144ЛЛ.
Россия. 1996 г.

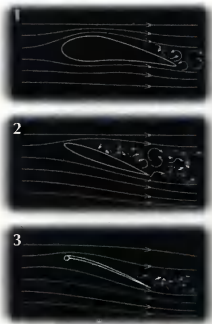




Дозвуковой самолёт.
Пассажирский аэробус
ИЛ-96м. Россия.

1 — схема обтекания крыла с утолщением на передней кромке; 2 — схема обтекания плоского крыла; 3 — схема обтекания паруса тонкой плоскости, которая способна деформироваться под действием набегающего потока.

Острая передняя кромка позволяет потоку относительно легко отрываться от поверхности, увеличивая лобовое сопротивление крыла. Использование гибкого материала может уменьшить этот эффект, но такое крыло нельзя использовать как несущую поверхность тяжёлого летательного аппарата.



крылья с острой передней кромкой — точно так же лезвие топора или гвоздь для большей эффективности должны быть острыми.

Однако конструкторы самолётов, летающих со скоростями порядка 800 км/ч и меньше, не спешат улучшать таким образом форму летательных аппаратов. Дозвуковые самолёты имеют довольно тупые носы, достаточно толстые длинные крылья, расположенные почти перпендикулярно фюзеляжу. Дело в том, что форма носовой части обтекаемого воздухом или жидкостью тела не очень существенна для его общего сопротивления — лишь бы не было резких, угловых изгибов.

Одним из первых результатов, полученных в процессе становления теории движения жидкости и газа, был так называемый *парадокс Д'Аламбера — Эйлера*. Он заключается в том, что тело, движущееся в невязкой жидкости поступательно и равномерно, не должно испытывать лобового, т. е. направленного вдоль движения, сопротивления. Сначала этот результат был получен для обтекания невязкой жидкостью простых геометрических тел — шара и цилиндра — и его можно было объяснить симметричностью их формы. Но позднее оказалось, что тело любой, самой причудливой формы не имеет в соответствии с теорией

обтекания лобового сопротивления, причём составляющая силы, перпендикулярная скорости движения, не обязательно равна нулю. Теоретическое отсутствие лобового сопротивления существовавшим образом противоречило эксперименту. Из этого противоречия был сделан вывод, что теория невязкой жидкости неверна, а потому бесполезна.

Однако развитие гидроаэромеханики привело к созданию теории пограничного слоя. Оказалось, что реальные жидкость и газ часто весьма похожи на идеальную невязкую жидкость и только непосредственно вблизи поверхности тела (в пограничном слое) проявляют вязкие свойства — скорость газа или жидкости начинает быстро уменьшаться и становится равной нулю на поверхности тела.

При обычных условиях обтекания (не очень маленьких скоростях и размерах обтекаемых тел, не очень большой вязкости) размерами пограничного слоя можно просто пренебречь. Но пограничный слой ведёт себя довольно капризно — если тело имеет выступы или углы (например, кубик или пластинка, поставленная поперёк набегающего потока), он может оторваться от поверхности, и тогда картина обтекания нарушится. Обтекание тела в этом случае нельзя считать безотрывным, а безотрывность обтекания — одно из основных условий выполнения парадокса Д'Аламбера — Эйлера. Если линии





тока не смыкаются за телом и за ним тянется «хвост» увлекаемой жидкости, значит, должна тратиться энергия на вовлечение в движение всё новых и новых участков жидкости. Иначе движение тела не будет равномерным и поступательным — тело должно преодолевать сопротивление окружающей его жидкости или газа.

Рассмотрим эту ситуацию на примере обтекания цилиндра или шара. По бокам цилиндра в соответствии с законом неразрывности течение жидкости должно ускоряться, что, согласно закону Бернулли, приведёт к падению давления. Если обтекание безотрывное, то трубки тока за телом расширяются, и поток замедляется, создавая область повышенного давления. В результате идеальная жидкость не оказывает сопротивле-



В идеальной жидкости частица движется из области пониженного давления в область высокого давления. В реальной жидкости кинетическая энергия частицы теряется из-за вязкого трения в пограничном слое. В результате она тормозится и не может попасть в область повышенного давления.

ния движущемуся в ней симметричному току. В реальном же течении вязкое трение в пограничном слое гасит скорость потока — у элементов жидкости уже нет энергии для движения в ту область, где в случае идеальной жидкости было повышенное давление. За телом возникает вихревое движение жидкости.

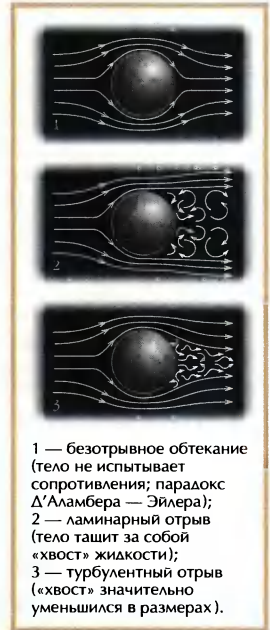
Интересно, что точка отрыва пограничного слоя в случае турбулентного обтекания шара или цилиндра

находится ниже по течению потока, чем при ламинарном обтекании. Соответственно турбулентный «хвост» увлекаемой за телом жидкости значительно меньше ламинарного. Вот этим и объясняется тот парадоксальный факт, что лобовое сопротивление плохообтекаемых тел (типа цилиндра или шара) значительно снижается при переходе обтекания к турбулентному режиму. Если бы удалось каким-то образом задержать отрыв, перенести точку отрыва на заднюю кромку обтекаемого тела, то парадокс Д'Аламбера — Эйлера был бы реализован на практике: сопротивление тела состояло бы только из вязкого сопротивления пограничного слоя.

Проблема создания такой формы крыла, чтобы поток не отрывался от его поверхности, — одна из важнейших в самолётостроении. Ведь при движении птиц, рыб, насекомых и морских животных обтекание происходит безотрывно и потери энергии обусловлены только вязким трением воздуха или воды. Предлагалось множество способов борьбы с явлением отрыва потока на верхней плоскости крыла — например, отсасывать «вредный» пограничный слой с поверхности крыла через множество мелких отверстий в ней.

Таким образом, очевидно, что для дозвуковых самолётов не очень важна конфигурация передней части обтекаемого тела. Она может быть достаточно закруглённой — конструктивно это более удобно, чем заострённая форма. Наиболее существенна для сопротивления задняя часть крыла — она должна плавно, без резких изменений формы, сходиться на нет. У птиц и морских животных именно такие крылья и плавники: довольно толстая и прочная передняя часть переходит в плавно истончающуюся, значительно более протяжённую заднюю.

Получается, что для дозвукового обтекания заострённая передняя



1 — безотрывное обтекание (тело не испытывает сопротивления; парадокс Д'Аламбера — Эйлера); 2 — ламинарный отрыв (тело тащит за собой «хвост» жидкости); 3 — турбулентный отрыв («хвост» значительно уменьшился в размерах).

Фюзеляж (от фр. fuscau — «веретено») — корпус летательного аппарата



кромка крыла не только не уменьшает сопротивления, но может его увеличить при больших углах атаки.

СИЛА МАГНУСА И ПОДЪЁМНАЯ СИЛА КРЫЛА

В футболе одним из коварных ударов для вратаря считается так называемый «сухой лист». Похожий подрезанный удар — «спин» применяют в теннисе и других играх с мячом. При этом ударе мяч в полёте быстро вращается, и его траектория становится значительно сложнее по сравнению с траекторией мяча, посланного обычным ударом. Предвидеть, куда направится такой кручёный мяч, неопытному спортсмену довольно трудно. «Виновата» во всём сила Магнуса, проявляющаяся при движении закрученного вдоль своей оси симметричного тела — мяча, цилиндра и т. п.

Для обнаружения силы Магнуса можно проделать несложный эксперимент — из листа плотной бумаги склеить рулон и скатить его с наклонной обрывающейся поверхностью. Известно, что при этом тело приобретёт некоторую скорость. Далее оно должно двигаться по пара-



Эффект Магнуса.

болической траектории, слегка искажаемой сопротивлением воздуха. Так и происходило бы, если бы рулон падал без скольжения или скатывался тяжёлый предмет. Лёгкий рулон будет залетать под поверхность скатывания, существенно отклоняясь от параболической траектории.

Уравнение Бернулли объясняет такое поведение рулона (и закрученного мячика): вращение нарушает симметричность обтекания за счёт эффекта прилипания. С одной стороны бумажного цилиндра скорость потока больше, значит, давление там понижается и возникает боковая подъёмная сила, называемая *силой Магнуса*.

Конечно, она действует отнюдь не только на спортивные мячи или бумажные рулоны. Снаряд или пуля, вращаясь в полёте, также испытывают силу Магнуса, которая в сочетании с гироскопическим моментом приводит к тому, что ось снаряда или пули стремится приблизиться к касательной к траектории. Используя силу Магнуса, немецкие кораблестроители в 1922—1926 гг. пытались создать судовой движитель в виде вертикальных вращающихся цилиндрических башен (так называемых роторов Флетнера), помещённых на палубе корабля и создающих движущую силу, перпендикулярную на-



■ Гирискоскоп (от греч. «хирокос» — «крут», «хирео» — «кручу», «вращаюсь» и «скопео» — «наблюдаю», «смотрю») — быстро вращающееся симметричное твёрдое тело; его ось вращения (ось симметрии) может изменять своё направление в пространстве. Гирискоскоп обладает многими интересными свойствами, которые наблюдаются у вращающихся небесных тел, артиллерийских снарядов, детского волчка, роторов турбин и др.

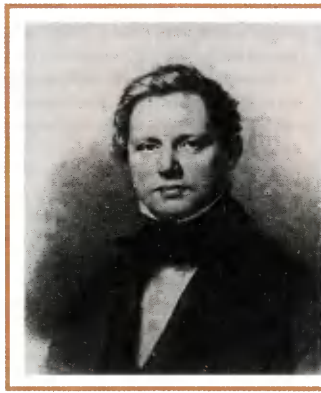
■ Антон Флетнер (1885—1961) — немецкий изобретатель.



правлению ветра. Как показали ходовые испытания, по своим динамическим качествам ротор Флетнера не уступал парусам, однако был значительно более простым в обслуживании. К сожалению, он тоже зависел от капризов погоды, поэтому не смог конкурировать с тепловым двигателем.

Очень похожее на эффект Магнуса явление наблюдается и у крыла. Если, стоя на мосту, наблюдать течение реки, можно заметить, что вода обтекает стойки моста, образуя завихрения возле них. В середине XIX столетия Герман Гельмгольц обнаружил устойчивость вихревых движений идеальной жидкости. Он показал, что такие вихри после возникновения становятся автономными и могут взаимодействовать друг с другом (притягиваться или отталкиваться). При обтекании любого тела элементы жидкости (или газа), близкие к поверхности тела, тормозятся ею и ускоряются внешним потоком. Это приводит к тому, что они приобретают вращательное движение, причём верхняя поверхность элемента жидкости закручивается по часовой стрелке, а нижняя — против, если набегающий поток движется слева направо. На задней кромке тела эти два завихрённых течения встречаются. Если обтекание симметричное, то они могут компенсировать друг друга и ничего интересного не произойдёт, либо маленькие вихри будут поочерёдно сходиться то с нижней, то с верхней поверхности. Если же тело, как и крыло, не обладает плоскостью симметрии, то с одной из сторон — наиболее выпуклой — завихрённость потока будет сильнее.

Для потока жидкости или газа, обтекающего тело, неважно, чем вызвано завихрение — вращением тела или его несимметричностью. Такой поток будет создавать силу, направленную перпендикулярно его набегающему. Если вращается само тело, эта сила называется силой Магнуса, а



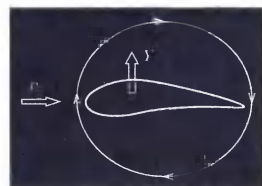
Генрих Густав Магнус.

если завихрённость вызвана его формой — сила называется подъёмной.

В 1904 г. русский учёный, основоположник современной аэродинамики Николай Егорович Жуковский (1847—1921), опираясь на идеи Гельмгольца, установил связь величины завихрённости и подъёмной силы. Завихрённость, которую создаёт крыло, характеризуется величиной циркуляции скорости Γ . Теорема Жуковского утверждает, что в идеальной жидкости подъёмная сила Y перпендикулярна набегающему потоку и равна по величине $\rho v_\infty \Gamma$, где ρ — плотность жидкости, v_∞ — скорость набегающего потока.

Таким образом, самым эффективным будет крыло, создающее наибольшую циркуляцию. До разработки теории крыла Жуковским идеальная жидкость воспринималась учёными как нечто не имеющее прямого отношения к реальности. Они полагали, что для описания реального течения необходима более точная и более сложная теория вязкой жидкости. Метод расчётов в рамках теории идеальной жидкости, предложенный Жуковским, был дополнен Сергеем Алексеевичем Чаплыгиным (1869—1942), использовавшим теорию струй Густава Кирхгофа. Результаты расчётов удивительным образом совпали с данными эксперимента, показав,

По теореме Жуковского подъёмная сила, действующая на крыло, перпендикулярна набегающему потоку.





НИКОЛАЙ ЕГОРОВИЧ ЖУКОВСКИЙ

Детство Николая Егоровича Жуковского (1847—1921) прошло в имении его отца, инженера-путейца Егора Ивановича Жуковского, в деревне Орехово недалеко от города Владимира. Домашним учителем четверых братьев Жуковских был студент медицинского факультета Московского университета А. Х. Репман, увлекавшийся физикой. Наверное, первый учитель и пробудил в маленьком Николае интерес к науке.

Успешно закончив 4-ю московскую мужскую гимназию, а затем Московский университет, Жуковский в 1872 г. начал преподавать высшую математику в Московском высшем техническом училище (МВТУ). Осенью 1876 г. он с блеском защитил в университете магистерскую диссертацию на тему «Кинематика жидкого тела». Большую часть своей заграничной стажировки начинающий учёный провёл в знаменитой Политехнической школе в Париже, где занимался новейшими отраслями теоретической и промышленной механики.

В 1886 г., уже после защиты докторской диссертации, Жуковский получил должность профессора на освободившейся кафедре теоретической и практической механики Московского университета. Одновременно он возглавил и кафедру аналитической механики МВТУ. Отныне все его дни поровну делились между этими двумя учебными заведениями.

В конце XIX в. из-за необходимости расширить водопроводную сеть Москвы начали строить новые водоканалы. На Рублёвской водонапорной станции почти сразу стали возникать аварии — разрывы труб. Обратились за помощью к Жуковскому. Проведя серию разнообразных опытов на Алексеевской водоканалке, он построил теоретическую модель явления и изобрёл прибор, позволявший, не выходя из помещения водоканки, определить место аварии и даже предотвратить разрыв в уязвимом месте. После публикации работы о гидравлическом

ударе имя Жуковского приобрело мировую известность.

В начале XX в. по проектам учёного в Московском университете и МВТУ были установлены аэродинамические трубы. Осенью 1904 г. в подмосковном Кучине была создана хорошо оснащённая современным оборудованием аэродинамическая лаборатория. Средства на её строительство выделил ученик Жуковского Д. П. Рябушинский, ставший известным исследователем в области гидроаэродинамики.

В 1905 г. Николай Егорович сделал доклад «О присоединённых вихрях» в Московском математическом обществе. Через год эту знаменитую работу опубликовали. В ней он теоретически обосновал и объяснил возникновение подъёмной силы крылового профиля в потоке воздуха (теорема Жуковского о подъёмной силе).

В те же годы им была решена ещё одна прикладная задача, имевшая важное значение в связи с постройкой военных кораблей большого водоизмещения. При проектировании кораблей таких масштабов основная проблема заключалась в том, что гребной винт не выдерживал необходимых нагрузок.

Известный математик и механик Владимир Васильевич Голубев (1884—1954), бывший студент Жуковского, вспоминал: «Однажды наш почтенный лектор, Николай Егорович Жуковский, пришёл на лекцию взволнованный, с только что изданной книгой Фламма о гребных винтах. Жуковский открыл одну из чётких фотографий книги, в которой не было теоретического материала, но было много результатов испытаний винтов, и воскликнул: „Теперь я понял, как работает винт!“. Он пустил книгу по рукам и стал объяснять. ...На глазах аудитории Жуковский обратился к доске и, пользуясь аппаратом теории функций комплексного переменного, стал набрасывать важнейшие тезисы или элементы его будущей вихревой теории гребного винта и пропеллера. Эта теория прочно вошла в аэродинамику XX в.».

В 1918 г., во время Гражданской войны, в Москве был основан крупный научно-производственный центр — Центральный аэрогидродинамический институт (ЦАГИ); его подразделения располагались в Подмоскovie. Председателем коллегии ЦАГИ был назначен 70-летний Жуковский, провозглашённый «отцом русской авиации». Вскоре Николай Егорович стал первым ректором Института инженеров Красного флота, после его смерти преобразованного в Военно-воздушную инженерную академию, которой присвоили имя учёного. Несмотря на преклонный возраст, Жуковский вёл активную творческую жизнь. Но после кончины дочери Елены в 1920 г. Николай Егорович тяжело заболел. Ученики Жуковского, горячо его любившие, желая поддержать учителя, прилетели к нему в Орехово на самолёте и совершили посадку на лугу. Местных жителей сильно взбудоражили такой неслыханный гул и необыкновенное зрелище; даже в городах до 30-х гг. XX столетия вид летящего аэроплана был большой редкостью.

Умер Жуковский в 1921 г. в санатории «Усово» в возрасте 74 лет. Один из кратеров на поверхности Луны назван именем знаменитого учёного.



Николай Егорович Жуковский.



СЕРГЕЙ АЛЕКСЕЕВИЧ ЧАПЛЫГИН

Сергей Алексеевич Чаплыгин (1869—1942) родился в городе Раненбурге (ныне Чаплыгин) Рязанской губернии. Детство будущего учёного было трудным: его отец, работавший приказчиком, в 1871 г. умер от холеры 24 лет от роду. Однако мать и отчим, который хорошо относился к мальчику, смогли обеспечить ему необходимое образование: в 1877 г. Сергей поступил в гимназию. Вскоре обнаружилось блестящие способности мальчика: хотя ему и не хватало времени учить уроки, но один раз услышанное, вплоть до классических языков, он запомнил твёрдо. Позже это свойство сохранилось: если слушал внимательно, он долго помнил всё и даже не всегда записывал телефоны сотрудников или знакомых. Учился Сергей без труда и окончил гимназию блестяще. Он давал репетиторские уроки и накопил немного денег, чтобы продолжить образование. В 1886 г. Чаплыгин поступил в Московский университет, где работал и преподавал замечательные учёные: астроном Фёдор Александрович Бредихин (1831—1904), биолог Климент Аркадьевич Тимирязев (1843—1920), физик Александр Григорьевич Столетов (1839—1896). Однако эти имена не затмевали имени молодого исследователя, недавно возглавившего кафедру теоретической и практической механики, — Николая Егоровича Жуковского. Именно его учеником и последователем стал Чаплыгин в ближайшие годы.

После окончания Московского университета С. А. Чаплыгин, будучи приват-доцентом (внештатный преподаватель, не имеющий постоянного содержания и вознаграждения) на кафедре Жуковского в университете, одновременно служил в Московском мержевом институте и МВТУ. В 1903 г. Сергей Алексеевич блестяще защитил докторскую диссертацию по гидродинамике струйного обтекания жидкостью преграды (с учётом сжимаемо-

сти жидкости). В ней он сделал первые шаги к основанию новой области физики — газовой динамики. Главное внимание в диссертации уделялось околосзвуковым течениям воздуха. Эта работа Чаплыгина приобрела международную известность особенно после 1935 г., когда авиастроение приблизилось к верхней границе дозвуковых скоростей самолётов. Развитие газовой динамики и сверхзвуковой аэродинамики уже начиналось.

После защиты докторской диссертации С. А. Чаплыгин имел право стать профессором Московского университета, и Жуковский передал ему заведование кафедрой теоретической и прикладной механики. Выйдя в отставку, Жуковский продолжал читать основной курс теоретической механики (они поделили его с Чаплыгиным), а также фактически руководил делами кафедры до конца жизни.

Совместными усилиями Жуковский и Чаплыгин добились чрезвычайно заметных достижений в области аэродинамики. Они обосновали так называемый постулат Жуковского — Чаплыгина (иногда можно встретить одно из этих имён), согласно которому воздушный поток, обтекающий профиль крыла, имеет точку схода с задней острой кромки крыла. В противном случае, огибая этот «острый угол», струя приобретала бы бесконечно большие скорости, что физически невозможно. Такая гипотеза позволила найти важную интегральную характеристику для выражения подъёмной силы крыла — циркуляцию скорости около профиля.

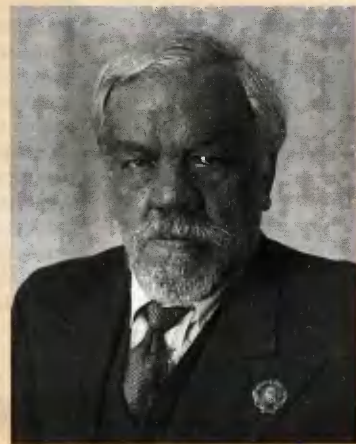
Одним из важнейших прикладных достижений творческого тандема Жуковского и Чаплыгина стала теория разрезного, составного и механизированного крыла. Это дало возможность изменять величину циркуляции скорости и уменьшать посадочные скорости аэроплана.

После кончины в 1921 г. первого руководителя ЦАГИ — Жуковского институт возглавил Чаплыгин. Строительство корпусов, лабораторий, производство самолётов шли быстрыми

темпами, несмотря на Гражданскую войну и трудности послевоенного времени. В 30-х гг. XX в. в ЦАГИ был создан коллектив высококвалифицированных теоретиков, инженеров, техников, рабочих, мастеров, испытателей. ЦАГИ сыграл совершенно исключительную роль в интенсивном развитии авиационной техники и промышленности России.

Чаплыгин не только возглавлял научно-инженерный коллектив института, но и находил время для плодотворной научной работы. В этот период он создал замечательные труды по аэродинамике самолёта: «К общей теории крыла моноплана», «Схематическая теория разрезного крыла аэроплана», «К теории предкрылка и закрылка» (совместно с Владимиром Васильевичем Голубевым) и др.

В 1941 г. в связи с 50-летием научной деятельности С. А. Чаплыгин был удостоен звания Героя Социалистического Труда. Вскоре после начала войны с гитлеровской Германией Чаплыгина в составе ЦАГИ эвакуировали в Новосибирск. В конце сентября 1942 г. у Сергея Алексеевича произошло кровоизлияние в мозг, а 8 октября того же года его не стало. Похоронен учёный в Новосибирске.



Сергей Алексеевич Чаплыгин.



что в некоторых случаях упрощённая модель жидкости оказывается очень эффективной.

Замкнутая
аэродинамическая
труба:

- 1 — вентилятор
с мотором;
- 2 — диффузор;
- 3 — рабочая часть;
- 4 — конфузур.

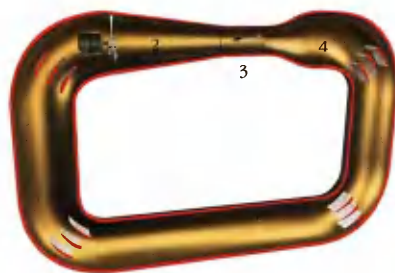
АЭРОДИНАМИЧЕСКИЙ ЭКСПЕРИМЕНТ И КРИТЕРИИ ПОДОБИЯ

В 60-х гг. XX в., когда начали активно развиваться вычислительная техника и методы вычислений, было высказано мнение, что вскоре необходимость в эксперименте для механики сплошной среды отпадёт — всё можно будет рассчитать на компьютере. Однако, несмотря на значительные успехи в развитии вычислительной техники, отказываться от эксперимента ни сейчас, ни в обозримом будущем никто не собирается. Детальные расчёты движения газа или жидкости невозможно произвести даже на суперкомпьютере: чтобы справиться с вычислениями, приходится делать упрощения, порой значительные. Для подтверждения правильности таких упрощённых расчётов необходим эксперимент. Следовательно, ещё рано отказываться от физического опыта, хотя со временем стоимость одного и того же эксперимента всё увеличивается, а стоимость одного и того же компьютерного расчёта уменьшается (примерно в десять раз каждые восемь лет).

Наиболее удобно имитировать движение тела в газе с помощью аэродинамических труб. Исследуемое тело помещают в рабочую часть трубы, где создаётся равномерный поток воздуха, подаваемый из *конфузора* (от *лат. confundo* — «вливаю», «смешиваю», «распределяю») —

Аэродинамическая
труба прямого
действия:

- 1 — вентилятор
с мотором;
- 2 — диффузор;
- 3 — рабочая часть;
- 4 — конфузур.



сужающейся части трубы. Конфузор ускоряет поток и увеличивает его равномерность. Из рабочей части поток попадает в *диффузор* (от *лат. diffusio* — «распространение», «растекание») — расширенную часть трубы. В конце диффузора обычно расположен вентилятор с мотором, который и создаёт течение воздуха в трубе.

Прототип современных аэродинамических труб, созданный в 1897 г. Константином Эдуардовичем Циолковским (1857—1935), не имел ни конфузора, ни диффузора. В 1903 г. в Национальной физической лаборатории в Лондоне Т. Стантоном и в 1906 г. в Москве Н. Е. Жуковским были созданы первые аэродинамические трубы прямого действия — воздух в них забирался прямо из атмосферы. В 1909 г. в Гёттингене немецкий учёный Людвиг Прандтль (1875—1953) и в 1910 г. Т. Стантон усовершенствовали такую конструкцию труб — диффузор с помощью специального канала замкнули на сопло трубы. В результате эффективность трубы существенно увеличилась, поскольку сохраняла энергию потока, поступающего из диффузора. Но, вероятно, главное достоинство такой замкнутой аэродинамической трубы в том, что её рабочую часть можно делать открытой: нет необходимости отделять непроницаемой оболочкой поток, идущий из сопла, от атмосферного воздуха. Это облегчает доступ к обтекаемому телу — можно непосредственно во



время опыта менять его положение или расположение зондов и датчиков, предоставляющих информацию о характеристиках эксперимента. Попытка открыть рабочую часть у трубы прямого действия (незамкнутой) приведёт к тому, что воздух будет забираться не только конфузором из атмосферы, но и рабочей частью, а это не позволит создать равномерный поток. В 1909 г. известный французский инженер Александр Гюстав Эйфель (1832—1923) поместил открытую рабочую часть незамкнутой трубы в герметичную камеру; теперь её называют камерой Эйфеля. В результате и для труб прямого действия появилась возможность создавать равномерный поток в открытой рабочей части.

С этого времени и до наших дней принципиальная конструкция аэродинамических труб для изучения дозвуковых скоростей осталась неизменной — лишь увеличились размеры труб и улучшились отдельные характеристики.

Для имитации полёта в однородном воздухе рабочая часть аэродинамической трубы должна на порядок (в десять раз) превышать размеры исследуемого объекта. Если они значительны, то необходима труба грандиозной величины, потребляющая в ходе эксперимента огромное количество энергии.

Нельзя ли смоделировать процесс обтекания тела потоком воздуха: изготовить точную геометрически по-

добную копию исследуемого летательного аппарата, но уменьшенную, например, в 100 раз? Возможностей для её аэродинамического исследования значительно больше.

Но есть ли основания утверждать, что реальный летательный аппарат будет вести себя точно так же, как модель? Во многих фильмах зритель легко отличает сцены, где действуют уменьшенные копии: маленькие камни падают совсем не так, как огромные валуны, снятые кинодокументалистами во время настоящего землетрясения или извержения вулкана; игрушечные дома, мосты, корабли разрушаются совсем не так, как реальные сооружения при реальных стихийных бедствиях. Простое уменьшение размера, даже с соблюдением геометрического подобия, не обеспечивает физическое подобия!

Представим себе, что газом обтекается футбольный мяч и мячик для настольного тенниса — два геометрически подобных тела. При каких условиях можно говорить о физическом подобии течений? Помогут выяснить это герои кукольного мультфильма «38 попугаев». У них не было прибора для измерения длины, поэтому длину Удава они измеряли Попугаем, Мартышкой и Слоёнком. Выберем в качестве единицы измерения, например, диаметр мяча L — в одном случае футбольного, в другом — для пинг-понга. Он будет служить «Попугаем». В качестве единицы скорости, т. е. «Мартышки», выберем скорость набегающего потока v_∞ (она в каждом случае может быть разной) и, наконец, за единицу плотности, т. е. «Слоёнка», возьмём плотность набегающего потока ρ .

С помощью трёх таких эталонов можно сконструировать собственную единицу измерения любой размерной величины — единица ус-



Александр Гюстав Эйфель. Бюст, установленный около Эйфелевой башни в Париже.



Аэродинамическая труба Т-101, предназначенная для испытаний моделей самолётов в натуральную величину.

корения, например, будет равна $\frac{v_\infty^2}{L}$.



Физическое подобие течения возникнет, в частности, тогда, когда ускорения соответствующих частиц воздуха в обоих случаях будут подобными, т. е. одинаковыми в выбранных единицах. Динамика частицы в случае вязкой жидкости определяется законом Ньютона, связывающим касательное напряжение, действующее на элемент жидкости, и изменение скорости v в поперечном движении направлении y :

$$\frac{F}{S} = \eta \frac{dv}{dy},$$

где η — коэффициент вязкости жидкости.

Если выразить в собственных единицах задачи (в «Попугаях») ускорение, создаваемое такой вязкой силой, окажется, что оно будет одинаковым в случае мячиков разного размера, если одинаковым будет число Рейнольдса $Re = \frac{\rho v_{\infty} L}{\eta}$.

Число Рейнольдса является одним из критериев подобия эксперимента. Чтобы опытные результаты точно описывали физику моделируемого явления, помимо геометрического подобия должны быть одинаковыми и критерии подобия. Кроме числа Re , учитывающего вязкие эффекты обтекания, подобие течений определяют также число Маха M (отношение скорости потока к скорости звука), учитывающее эффекты сжимаемости

газа; число Струхала $Sh = \frac{L}{v_{\infty} T}$, где T — характерное время процесса, учитывающее нестационарные эф-

фекты; число Фруда $Fr = \frac{v_{\infty}^2}{gL}$, где g — ускорение свободного падения, которое важно при обтекании тела относительно тяжёлой жидкостью, например водой, а также многие другие критерии подобия.

СОПЛО ЛАВАЛЯ

Для испытания сверхзвуковых летательных аппаратов аэродинамическая труба должна создавать поток, движущийся со сверхзвуковой скоростью. Как же разогнать газ до больших скоростей? Самый простой, казалось бы, способ — сузить поток газа. Иначе говоря, взять сосуд, в котором газ находится под большим давлением, и подсоединить к нему трубу с сужающимся сечением — так называемое простое сопло. И чем уже будет выходное сечение, тем больше должна быть скорость вытекающего газа согласно закону сохранения массы. Однако в действительности этим способом можно достичь всего лишь скорости, равной скорости звука, поскольку дальнейшее сужение выходного сечения сопла не приводит к ускорению потока.

Дело в том, что при превышении скорости звука меняются физические закономерности — при сверхзвуковой скорости уменьшение площади

сечения влечёт за собой уменьшение скорости, и наоборот. Поэтому, чтобы получить сверхзвуковую скорость, надо увеличивать сечение аэродинамической трубы сразу после момента достижения скорости звука. Именно так устроено сопло Лавалья, предназначенное для достижения сверхзвуковых скоростей. Оно названо по имени известного инженера и изобретателя Карла Густава Патрика де Лавалья (1845—1913).

Сопло Лавалья работает не только в экспериментальных установках — аэродинамических трубах. Как известно, сила тяги реактивного двигателя определяется скоростью истечения газа. Простое сопло позволяет получить только звуковую скорость истечения, тогда как сопло Лавалья может создать гораздо большие скорости, существенно увеличив тем самым тягу двигателя. В то же время ускоренный соплом Лавалья до сверхзвуковой скорости газ может использоваться как рабочее тело лазера, поскольку при таком быстром ускорении газ охлаж-

дается особым способом — теряется только поступательная энергия молекул, а колебательная некоторое время остаётся прежней. Под действием индукционного излучения происходит выравнивание этих энергий, сопровождающееся лавинообразным процессом образования вынужденного излучения. Такие газодинамические лазеры, работающие на сверхзвуковом потоке, позволяют получить мощное непрерывное когерентное инфракрасное излучение.



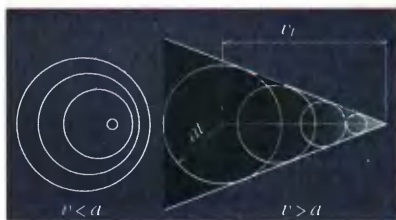
1 — простое сопло; 2 — сопло Лавалья.



В эксперименте невозможно добиться совпадения сразу всех критериев подобия, поэтому учитывается влияние лишь наиболее важных величин. Например, при дозвуковых скоростях это вязкость; при больших скоростях гораздо важнее становится эффект сжимаемости газа.

СВЕРХЗВУКОВАЯ СКОРОСТЬ И УДАРНЫЕ ВОЛНЫ

Скорость звука в воздухе при нормальных условиях равна примерно 330 м/с. Звук — это относительно малые возмущения плотности воздуха. Чтобы разобраться в данном явлении, удобно воспользоваться аналогией звуковых волн и волн на поверхности воды. Если бросить камешек в воду, от места падения кругами разбегутся волны. Движение в воздухе вызывает похожие волны, только они невидимы. Но их можно



услышать, если длина и интенсивность такой волны будет соответствовать диапазону, воспринимаемому человеческим ухом. Кроме того, поверхность звуковой волны в покоящемся воздухе обычно представляет собой сферу, а не круг.

Если бросать камешек за камешком в одну и ту же точку в покоящейся воде, расходящиеся круги на поверхности будут концентрическими. Если вода движется с небольшой скоростью v , картина несколько изменится — центры кругов сместятся, но всё же будут находиться внутри кругов. Когда скорость движения

воды увеличится, центры приблизятся к краю кругов. Наконец, когда скорость движения воды совпадёт со скоростью движения волны, все окружности, образованные волнами, будут соприкасаться в одной точке. Если скорость воды превысит скорость волны, круги на поверхности заполнят область, ограниченную двумя лучами — огибающими этих кругов. Вне этой области поверхность воды a останется спокойной, волновые возмущения туда не успеют прийти. Наиболее сильно будет возмущена вода вблизи двух огибающих.

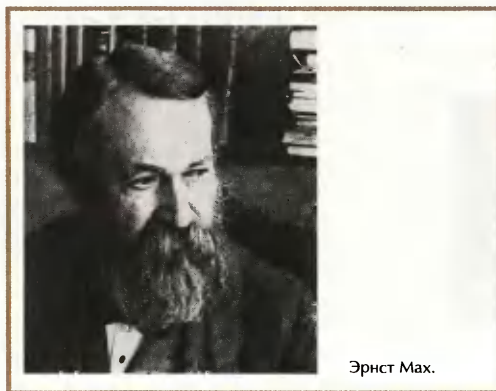
Аналогичный процесс происходит и в воздухе. Возьмём систему отсчёта, в которой движется воздух, а в покое находится тело (например, самолёт). Если скорость самолёта сравнима со скоростью звука, но не превышает её, то виден бесшумно движущийся самолёт и слышен звук его двигателей. Однако направление, откуда доносится этот звук, слегка отстаёт от самолёта. Если самолёт летит со сверхзвуковой скоростью, возмущения, создаваемые им, остаются внутри области, называемой *конусом Маха*. Пока находишься вне этого конуса, кажется, что самолёт движется бесшумно. Когда поверхность конуса Маха достигает ваших ушей, раздаётся резкий неприятный хлопок, и только затем

■ Эрнст Мах (1838—1916) — австрийский физик и философ.

■ Ченек Струхаль (1850—1922) — чешский учёный.

■ Уильям Фруд (1810—1879) — английский корабельный инженер.

Возникновение конуса Маха.



Эрнст Мах.



НЬЮТОН В РОЛИ НОСТРАДАМУСА

Исаак Ньютон, исследуя движение тел в воздухе, предложил метод определения их сопротивления, называемый теперь методом Ньютона. Идея очень проста: согласно рассуждениям учёного, частица потока воздуха ударяется о поверхность тела и далее движется по касательной к поверхности, отдавая телу нормальную составляющую своего импульса. Этот импульс и создаёт давление набегающего потока на тело.

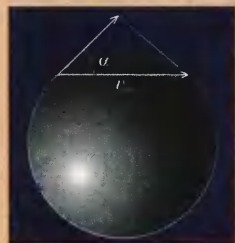
За время Δt с элементом поверхности ΔS столкнутся все частицы, которые находятся в объёме жидкости с основанием ΔS и высотой $v \Delta t \sin \alpha$, где α — угол между поверхностью тела и скоростью набегающего потока. Масса жидкости в этом объёме равна $\rho v \sin \alpha \Delta S \Delta t$. Нормальная составляющая скорости — $v \sin \alpha$. Таким образом, импульс силы, действующий на элемент поверхности ΔS обтекаемого тела, равен

$$F \Delta t = \rho v^2 \sin^2 \alpha \Delta S \Delta t,$$

а суммарная сила сопротивления

$$F = \rho v^2 \sin^2 \alpha \Delta S = \rho v^2 \sin^2 \alpha S.$$

Анализируя формулу сопротивления Ньютона, можно сделать следующий вывод: сила сопротивления прямо пропорциональна плотности набегающего потока, квадрату его скорости и максимальному сечению тела. Коэффициент пропорциональности, обычно обозначаемый $\frac{1}{2} C_x$, зависит от



Обтекание тела по Ньютону.



формы тела и одинаков у геометрически подобных тел.

Получив эту простую формулу, Ньютон сравнил расчётные значения силы с экспериментальными. Оказалось, что квадратичная зависимость сопротивления от скорости наблюдается только при относительно больших скоростях. Но даже в таком случае расчётный коэффициент пропорциональности C_x получается в несколько раз больше экспериментального.

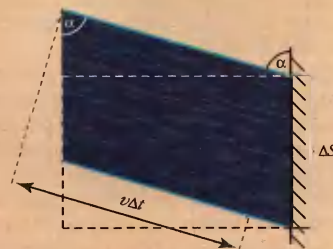
Воздух, обтекая тело, в действительности ведёт себя совсем не так, как представлялось Ньютону, — частицы воздуха на большом расстоянии «чувствуют» тело, заранее изменяя свою траекторию. Поэтому для описания взаимодействия тела и обтекаемой среды необходимы значительно более сложные модель и математический аппарат, который во времена Ньютона ещё не успел развиваться.

Казалось бы, формула не подходит для расчётов и её следует забыть. Но самое удивительное состоит в том, что через 300 лет после рождения Ньютона предложенная им формула позволила достаточно точно определить силу сопротивления сверхзвуковых летательных аппаратов!

Для больших сверхзвуковых скоростей (гиперзвуковых) ударная волна «ложится» на поверхность тела. Ударный слой — пространство между поверхностью ударной волны и поверхностью тела — становится достаточно тонким. До ударной волны поток, об-

текающий тело, не испытывает возмущения — «не чувствует» тела впереди. А после прохождения ударной волны частицы воздуха начинают двигаться практически вдоль поверхности тела, т. е. именно так, как и предполагал Ньютон, ничего не зная об особенностях сверхзвукового обтекания. Этим объясняется популярность и эффективность «старинной» формулы.

Сейчас математическая модель обтекания тела сверхзвуковым потоком газа детально разработана, и современная мощнейшая вычислительная техника может с большой точностью определять аэродинамические характеристики сверхзвуковых летательных аппаратов. Однако расчёты эти достаточно длительны и громоздки, тогда как несложная формула Ньютона позволяет быстро получить результаты для оценочного, чернового, расчёта и довольно просто найти путь улучшения аэродинамических характеристик летательного аппарата.





ется конусом — это конус Маха. Угол полураствора конуса или половину плоского угла, образуемого волнами корабля на поверхности воды, называют углом Маха, а отношение скорости v к скорости звука — числом Маха M . Синус этого угла и число Маха связаны:

$$\sin \alpha = \frac{1}{M}.$$

Обратите внимание, что два таких разных на первый взгляд процесса (ударные волны и волны на поверхности воды) обладают общими свойствами. Ударные волны, создаваемые взрывом или телом, движущимся со сверхзвуковой скоростью, невидимы. Поведение их описывается с помощью достаточно сложного математического аппарата. Но, изучая волны на поверхности воды, можно понять некоторые свойства ударных волн в воздухе — смоделировать и предсказать их поведение, «увидеть» эти невидимые поверхности. Конечно, такое подобие двух разных физических процессов имеет свои границы. Скорость волн на поверхности зависит от их высоты; скорость ударных волн тоже зависит от амплитуды, но, к сожалению, эта зависимость несколько иная; потому полностью, до деталей, смоделировать процесс сверхзвукового движения воздуха не получится. Однако для понимания сущности явления детали не столь важны.

1 — волны на поверхности воды, создаваемые судном;
2 — ударные волны, возникающие при сверхзвуковом движении тела в газе.

становится слышен шум двигателей самолёта. Причиной хлопка, очень похожего на шум взрыва, является внезапно возросшее давление. Возмущения, которые создаются движущимся самолётом, как бы скапливаются на поверхности конуса Маха, за счёт чего давление резко увеличивается. Такое внезапное скачкообразное изменение давления называется *ударной волной*. Она образуется при движении со сверхзвуковой скоростью и при взрывах.

Задачи движения корабля по воде и сверхзвукового самолёта геометрически очень похожи, только на поверхности воды возмущения — круги и их огибающие — образуют плоский угол, а при движении самолёта возмущения имеют вид сфер и огибающая их поверхность явля-



ПРИЛОЖЕНИЕ

ЛАУРЕАТЫ НОБЕЛЕВСКИХ ПРЕМИЙ ПО ФИЗИКЕ ЗА 1901—1999 гг.

Одна премия может быть разделена на две части за два самостоятельных исследования. Таковы премии по физике за 1903, 1936, 1954, 1955, 1961, 1963, 1970, 1973, 1978, 1983, 1986, 1989 гг. Одна премия может быть присуждена одновременно не более чем трём лицам. В 1916, 1931, 1934, 1940, 1941 и 1942 гг. Нобелевские премии по физике не присуждались.

1901 г. Рентген (Röntgen) Вильгельм Конрад (1845—1923), Германия. За открытие лучей, носящих его имя.

1902 г. Лоренц (Lorentz) Хендрик Антон (1853—1928), Зеeman (Zeeman) Питер (1865—1943), Нидерланды. За исследования влияния магнетизма на процессы излучения.

1903 г. Беккерель (Becquerel) Антуан Анри (1852—1908), Франция. За открытие спонтанной радиоактивности.

Кюри (Curie) Пьер (1859—1906), Склодовская-Кюри (Skłodowska-Curie) Мария (1867—1934), Франция. За изучение явления радиоактивности, открытого А. Беккерелем.

1904 г. Стрэтт (Strutt) Джон Уильям, лорд Рэлей (Rayleigh) (1842—1919), Великобритания. За открытие аргона.

1905 г. Ленард (Lenard) Филипп Эдуард Антон (1862—1947), Германия. За работы по катодным лучам.

1906 г. Томсон (Thomson) Джозеф Джон (1856—1940), Великобритания. За исследования прохождения электричества через газы.

1907 г. Майкельсон (Michelson) Альберт Абрахам (1852—1931), США. За создание прецизионных оптических инструментов и за выполненные с их помощью исследования.

1908 г. Липман (Lippmann) Габриель (1845—1931), Франция. За метод цветной фотографии.

1909 г. Маркони (Marconi) Гульельмо (1874—1937), Италия; Браун (Braun) Карл Фердинанд (1850—1918), Германия. За вклад в развитие беспроволочной телеграфии.

1910 г. Ван дер Ваальс (van der Waals) Йоханнес Дидерик (1837—1923), Нидерланды. За вывод уравнений состояния газов и жидкостей.

1911 г. Вин (Wien) Вильгельм (1864—1928), Германия. За закон смещения в тепловом излучении тел, носящий его имя.

1912 г. Дален (Dalén) Нильс Густав (1869—1937), Швеция. За изобретение автоматических регуляторов, использующихся для источников света на маяках и буях.

1913 г. Камерлинг-Оннес (Kamerlingh-Onnes) Хейке (1853—1937), Нидерланды. За получение жидкого гелия.

1914 г. Лауэ (Laue) Макс Феликс Теодор фон (1879—1960), Германия. За открытие дифракции рентгеновских лучей на кристаллах.

1915 г. Брэгг (Bragg) Уильям Генри (1862—1942), Брэгг (Bragg) Уильям Лоренс (1890—1971), Великобритания. За изучение структуры кристаллов с помощью рентгеновских лучей.

1917 г. Баркла (Barkla) Чарлз Гловер (1877—1944), Великобритания. За открытие характеристического рентгеновского излучения элементов.

1918 г. Планк (Planck) Макс Карл Эрнст Людвиг (1858—1947), Германия. За открытие квантов энергии.

1919 г. Штарк (Stark) Йоханнес (1874—1957), Германия. За открытие расщепления спектральных линий в электрических полях.

1920 г. Гийом (Guillaume) Шарль Эдуар (1861—1938), Швейцария. За открытие инвара.

1921 г. Эйнштейн (Einstein) Альберт (1879—1955), Германия и Швейцария. За заслуги перед теоретической физикой, особенно за открытие закона фотоэффекта.

1922 г. Бор (Bohr) Нильс Хенрик Давид (1885—1962), Дания. За заслуги в изучении строения атомов и испускаемого ими излучения.

1923 г. Милликен (Millikan) Роберт Эндрюс (1868—1953), США. За определение элементарного электрического заряда.

1924 г. Сигбан (Siegbahn) Карл Манне Георг (1886—1978), Швеция. За открытия в рентгеновской спектроскопии.

1925 г. Франк (Franck) Джеймс (1882—1964), Герц (Herz) Густав Людвиг (1887—1975), Германия. За открытие законов соударений электронов с атомами.

1926 г. Перрен (Perrin) Жан Батист (1870—1942), Франция. За доказательство существования молекул.

1927 г. Комптон (Compton) Артур Холли (1892—1962), США. За открытие эффекта, названного его именем.

Вильсон (Wilson) Чарлз Томсон Рис (1869—1959), Великобритания. За метод обнаружения траекторий электрически заряженных частиц с помощью конденсации пара.

1928 г. Ричардсон (Richardson) Оуэн Уилланс (1879—1959), Великобритания. За работы по термоионной эмиссии и за открытие закона, носящего его имя.

1929 г. Де Бройль (de Broglie) Луи (1892—1987), Франция. За открытие волновой природы электрона.

1930 г. Раман (Raman) Чандрасекхара Венката (1888—1970), Индия. За работы по рассеянию света и за открытие эффекта, названного его именем.

1932 г. Гейзенберг (Heisenberg) Вернер Карл (1901—1976), Германия. За создание квантовой механики.

1933 г. Шрёдингер (Schrödinger) Эрвин (1887—1961), Австрия; Дирак (Dirac) Поль Адриан Морис (1902—1984), Великобритания. За открытие новых продуктивных форм атомной теории.

1935 г. Чедвик (Chadwick) Джеймс (1891—1974), Великобритания. За открытие нейтрона.

1936 г. Гесс (Hess) Виктор Франц (1883—1964), Австрия. За открытие космических лучей.

Андерсон (Anderson) Карл Дэвид (1905—1991), США. За открытие позитрона.

1937 г. Дэвиссон (Davisson) Клинтон Джозеф (1881—1958), США; Томсон (Thomson) Джордж Паджет (1892—1975), Великобритания. За экспериментальное открытие дифракции электронов на кристаллах.

1938 г. Ферми (Fermi) Энрико (1901—1954), Италия. За обнаружение новых радиоактивных элементов и открытие ядерных реакций, вызываемых медленными нейтронами.

1939 г. Лоуренс (Lawrence) Эрнест Орландо (1901—1958), США. За изобретение и создание циклотрона и за получение искусственных радиоактивных элементов.

1943 г. Штерн (Stern) Отто (1888—1969), США. За развитие метода молекулярных пучков и открытие магнитного момента протона.

1944 г. Раби (Rabi) Изидор Айзек (1898—1988), США. За резонансный метод измерения магнитных свойств ядер.

1945 г. Паули (Pauli) Вольфганг (1900—1958), Австрия. За открытие принципа запрета (принцип Паули).

1946 г. Бриджмен (Bridgman) Перси Уильямс (1882—1961), США. За открытия в физике высоких давлений.

1947 г. Эплтон (Appleton) Эдуард Виктор (1892—1965), Великобритания. За исследования физики верхних слоев атмосферы, в особенности за открытие слоя Эплтона.

1948 г. Блэккетт (Blackett) Патрик Мэйнард Стюарт (1897—1974), Великобритания. За усовершенствование камеры Вильсона и открытия в области ядерной физики и космической радиации.

1949 г. Юкава (Yukawa) Хидоки (1907—1981), Япония. За предсказание существования мезонов.

1950 г. Пауэлл (Powell) Сесил Франк (1903—1969), Великобритания. За разработку фотографического метода изучения ядерных процессов и открытие мезонов.

1951 г. Кокрофт (Cockroft) Джон Дуглас (1897—1967), Великобритания; Уолтон (Walton) Эрнест Томас Синтон (1903—1995), Ирландия. За фундаментальные работы по трансмутации атомных ядер.

1952 г. Блох (Bloch) Феликс (1905—1983), Пёрселл (Purcell) Эдуард Милс (1912—1997), США. За создание новых точных методов ядерных магнитных измерений и связанные с ними открытия.

1953 г. Цернике (Zernike) Фриц (1888—1966), Нидерланды. За изобретение фазово-контрастного микроскопа.

1954 г. Борн (Born) Макс (1882—1970), Великобритания. За исследования по квантовой механике, особенно за статистическую интерпретацию волновой функции.

Боте (Bothe) Вальтер Вильгельм (1891—1957), Германия. За метод совпадений и связанные с ним открытия.

1955 г. Лэмб (Lamb) Уиллис Юджин (родился в 1913 г.), США. За открытия, связанные с тонкой структурой спектра водорода.

Куш (Kusch) Поликарп (1911—1993), США. За точное определение магнитного момента электрона.

1956 г. Шокли (Shockley) Уильям Брэдфорд (1910—1989), Бардин (Bardeen) Джон (1908—1991), Браттейн (Brattain) Уолтер Хаузер (1902—1987), США. За исследование полупроводников и открытие транзисторного эффекта.

1957 г. Ли Цзундао (Lee Tsung-Dao; родился в 1926 г.), Янг Чженьнин (Yang Chen Ning; родился в 1922 г.), Китай. За предсказание нарушения чётности в слабых взаимодействиях.

1958 г. Черенков Павел Алексеевич (1904—1990), Франк Илья Михайлович (1908—1990), Тамм Игорь Евгеньевич (1895—1971), СССР. За открытие и объяснение эффекта Вавилова—Черенкова.

1959 г. Сегре (Segrè) Эмилио Джино (1905—1989), Чемберлен (Chamberlain) Оуэн (родился в 1920 г.), США. За открытие антипротона.

1960 г. Глазер (Glaser) Доналд Артур (родился в 1926 г.), США. За изобретение пузырьковой камеры.

1961 г. Хофстедтер (Hofstadter) Роберт (1915—1990), США. За исследования по рассеянию электронов на атомных ядрах и за открытие структуры нуклонов.

Мёссбауэр (Mössbauer) Рудольф Людвиг (родился в 1929 г.), Германия. За открытие резонансного поглощения гамма-излучения.

1962 г. Ландау Лев Давидович (1908—1968), СССР. За исследования по теории конденсированных сред.

1963 г. Вигнер (Wigner) Юджин Пол (1902—1995), США. За вклад в теорию атомного ядра и элементарных частиц на основе фундаментальных принципов симметрии.

Гёпперт-Майер (Goepfert-Mayer) Мария (1906—1972), США; Йенсен (Jensen) Иоханнес Ханс Даниель (1907—1973), Германия. За открытие оболочечной структуры ядра.

1964 г. Таунс (Townes) Чарлз Хард (родился в 1915 г.), США; Басов Николай Геннадиевич (родился в 1922 г.), Прохоров Александр Михайлович (родился в 1916 г.), СССР. За создание квантовых генераторов и усилителей — лазера и лазера.

1965 г. Томонага (Tomonaga) Синъитиро (1906—1979), Япония; Швингер (Schwinger) Джулиус Сеймур (1918—1994), Фейнман (Feynman) Ричард Филипп (1918—1988), США. За фундаментальный вклад в квантовую электродинамику и физику элементарных частиц.

1966 г. Кастлер (Kastler) Альфред (1902—1984), Франция. За открытие и разработку оптических методов исследования резонансов Герца в атомах.

1967 г. Бете (Bethe) Ханс Альбрехт (родился в 1906 г.), США. За открытие цикла термоядерных реакций, являющихся источниками энергии звёзд.

1968 г. Альварес Луис Уолтер (1911—1988), США. За открытие большого числа резонансов в физике элементарных частиц.

1969 г. Гелл-Манн (Gell-Mann) Мюррей (родился в 1929 г.), США. За открытия, связанные с классификацией элементарных частиц и их взаимодействий.

1970 г. Альфвен (Alfvén) Ханнес Олаф Гёста (1908—1995), Швеция. За фундаментальные работы и открытия в магнитной гидродинамике и физике плазмы.

Неель (Neel) Луи Эжен Феликс (родился в 1904 г.), Франция. За фундаментальные работы по антиферромагнетизму и ферромагнетизму.

1971 г. Габор (Gabor) Деннис (1900—1979), Великобритания. За изобретение голографии.

1972 г. Бардин (Bardeen) Джон (1908—1991), Купер (Cooper) Леон (родился в 1930 г.), Шриффер (Schrieffer) Джон Роберт (родился в 1931 г.), США. За теорию сверхпроводимости (теория БКШ).

1973 г. Эсаки (Esaki) Лео (родился в 1925 г.), Япония; Джайвер (Giaever) Айвер (родился в 1929 г.), США. За открытие туннельных явлений в полупроводниках и сверхпроводниках.

Джозефсон (Josephson) Брайан Дэвид (родился в 1940 г.), Великобритания. За теоретические предсказания свойств тока, проходящего через туннельный барьер, в частности эффекта Джозефсона.

1974 г. Райл (Ryle) Мартин (1918—1984), Хьюиш (Hewish) Энтони (родился в 1924 г.), Великобритания. За новаторские исследования в радиоастрофизике: Райлу за наблюдения и изобретения, в особенности за метод апертурного синтеза, а Хьюишу за его решающую роль в открытии пульсаров.

1975 г. Бор (Bohr) Оге Нильс (родился в 1922 г.), Мотельсон (Mottelson) Бенжамин Рой (родился в 1926 г.), Дания; Рейнуотер (Rainwater) Джеймс (1917—1986), США. За создание теории структуры атомного ядра.

1976 г. Рихтер (Richter) Бертон (родился в 1931 г.), Тинг (Ting) Сэмюэл Чоа Чанг (родился в 1936 г.), США. За открытие тяжёлой элементарной частицы нового типа.

1977 г. Андерсон (Anderson) Филипп Уоррен (родился в 1923 г.), Ван Флек (Van Vleck) Джон Хазбрук (1899—1980), США; Мотт (Mott) Невилл Френсис (1905—1996), Великобритания. За теоретические исследования электронной структуры магнитных и неупорядоченных структур.

1978 г. Капица Пётр Леонидович (1894—1984), СССР. За фундаментальные изобретения и открытия в области физики низких температур.

Пензиас (Penzias) Арно Аллан (родился в 1933 г.), Вильсон (Wilson) Роберт Вудро (родился в 1936 г.), США. За открытие космического реликтового излучения.

1979 г. Вайнберг (Weinberg) Стивен (1933—1996), Глэшоу (Glashow) Шелдон Ли (родился в 1932 г.), США; Салам (Salam) Абдус (1926—1995), Пакистан. За вклад в объеди-

нённую теорию слабого и электромагнитного взаимодействий между элементарными частицами.

1980 г. Кронин (Cronin) Джеймс Уотсон (родился в 1931 г.), Фитч (Fitch) Вал Логден (родился в 1923 г.), США. За открытие нарушений фундаментальных принципов симметрии при распаде нейтральных K^0 -мезонов.

1981 г. Бломберген (Bloembergen) Николаас (родился в 1920 г.), Шавлов (Schawlow) Артур Леонард (родился в 1921 г.), США. За вклад в развитие лазерной спектроскопии.

Сигбан (Siegbahn) Кай Манне Берг (родился в 1918 г.), Швеция. За вклад в развитие электронной спектроскопии.

1982 г. Вильсон (Wilson) Кеннет Геддес (родился в 1936 г.), США. За теорию критических явлений в связи с фазовыми переходами.

1983 г. Чандрасекар (Chandrasekhar) Субрахманьян (1910—1995), США. За теоретическое изучение процессов, играющих важную роль в строении и эволюции звезд.

Фаулер (Fowler) Уильям Альфред (1911—1995), США. За исследования ядерных реакций, имеющих важное значение для образования элементов во Вселенной.

1984 г. Руббиа (Rubbia) Карло (родился в 1934 г.), Италия; Мер (Meer) Симон ван дер (родился в 1925 г.), Нидерланды. За их определяющий вклад в открытие частиц W и Z , переносчиков слабого взаимодействия.

1985 г. Клитцинг (Klitzing) Клаус Олаф фон (родился в 1943 г.), Германия. За открытие квантового эффекта Холла.

1986 г. Руска (Ruska) Эрнст Август (1907—1988), Германия. За создание первого электронного микроскопа.

Биннинг (Binnig) Герд Карл (родился в 1947 г.), Германия; Рорер (Rohrer) Генрих (родился в 1933 г.), Швейцария. За изобретение сканирующего туннельного микроскопа.

1987 г. Мюллер (Müller) Карл Александер (родился в 1927 г.), Швейцария; Беднорц (Bednorz) Йоханнес Георг (родился в 1950 г.), Германия. За экспериментальное обнаружение высокотемпературной сверхпроводимости.

1988 г. Ледерман (Lederman) Леон Макс (родился в 1922 г.), Шварц (Schwarz) Мельвин (родился в 1932 г.), Штейнбергер (Steinberger) Джек (родился в 1921 г.), США. За открытие мюонного нейтрино.

1989 г. Рамзей (Ramsay) Норман Фостер (родился в 1915 г.), США. За создание цезиевых атомных часов и водородного мазера.

Демельт (Dehmelt) Ханс Джордж (родился в 1922 г.), США; Пауль (Paul) Вольфганг (1913—1993), Германия. За разработку метода удержания одиночных ионов, позволяющего осуществлять спектроскопию высокого разрешения.

1990 г. Фридман (Friedman) Джером Айзек (родился в 1930 г.), Кендалл (Kendall) Генри (родился в 1926 г.), США; Тейлор (Taylor) Ричард Эдуард (родился в 1929 г.), Канада. За исследования рассеяния электронов на протонах и связанных нейтронах и развитие кварковой модели.

1991 г. Женн (de Gennes) Пьер Жиль де (родился в 1932 г.), Франция. За открытие метода описания молекулярного упорядочения в жидких кристаллах и полимерах.

1992 г. Шарпак (Chaparak) Жорж (родился в 1924 г.), Франция. За изобретение новых типов детекторов частиц.

1993 г. Халс (Hulse) Расселл Алан (родился в 1950 г.), Тейлор-младший (Taylor Jr.) Джозеф Хутон (родился в 1941 г.), США. За открытие нового типа пульсара, которое проложило новые пути для изучения гравитации.

1994 г. Брокхаус (Brockhouse) Бертрам Невилл (родился в 1918 г.), Канада; Шалл (Shull) Клиффорд Гленвуд (родился в 1915 г.), США. За развитие метода рассеяния нейтронов для исследования конденсированного состояния вещества.

1995 г. Перл (Perl) Мартин Льюис (родился в 1927 г.), Райнес (Reines) Фредерик (родился в 1918 г.), США. Перлу за открытие τ -лептона и Райнесу за обнаружение нейтрино.

1996 г. Ли (Lee) Дэвид Моррис (родился в 1931 г.), Ошерофф (Osheroff) Дуглас Дин (родился в 1945 г.), Ричардсон (Richardson) Роберт Колеман (родился в 1937 г.), США. За открытие сверхтекучести в гелии-3.

1997 г. Козэн-Таннуджи (Cohen-Tannoudji) Клод (родился в 1933 г.), Франция; Филлипс (Phillips) Уильям (родился в 1948 г.), Чу (Chu) Стивен (родился в 1948 г.), США. За развитие методов пленения атомов лазерным светом.

1998 г. Лафлин (Laughlin) Роберт (родился в 1950 г.), Штёрмер (Störmer) Хорст (родился в 1948 г.), Цуи (Tsui) Даниэл (родился в 1939 г.), США. За открытие нового типа квантовой жидкости, в которой возбуждённые состояния имеют дробный электрический заряд.

1999 г. Хоофт (Hooft) Герард (родился в 1946 г.), Вельтман (Veltman) Мартинус (родился в 1931 г.), Нидерланды. За прояснение квантовой структуры электрослабых взаимодействий в физике.

УКАЗАТЕЛЬ ТЕРМИНОВ

Аберрация 126
Абсолютно твёрдое тело 383
Авогадро закон 224, постоянная 226
Агрегатные состояния вещества 229, 230—232
Адроны 258, 261—263
Аморфы 235
Анализ размерностей метод 276
Анизотропия 233—234, 306, 389
Античастица 259
Апории 30—31, 34, 178, 303—305
Априорные представления, суждения 87, 205
Аристотеля: динамика 334, 335, механика 337, физика 63
Архимеда закон 67, 371, 408, 409
Атмосферное давление 118
Атом 17, 37—40, 66, 120, 164, 166, 213,

217, 218, 221, 222, 225, 227; модель 247—248, строение 163, 165, 222
Атомно-молекулярная теория (атомизм) 37, 74, 120, 217, 220, 221, 230
Атомная единица массы 224
Атомная масса относительная 223
Атомное ядро: барионный заряд 253, дефект массы 256, массовое число 253, строение 253
Аэродинамическая труба 432, 433
Аэромеханика 406

Бароны 258
Барионы уравнение 412, 414—415
Большого взрыва теория 214
Брауновское движение 148, 154, 155, 226, 227
Буравчика правило 367

Вакуум 270
Вариационные принципы 293
Вектор 174, 329, 330
Великого объединения теория 178, 268, 269
Вероятностей теория 119
Вероятности выборки 283, дисперсия 284, исход (событие) 283, математическое ожидание 283, плотность 283, стандартное отклонение 284
Вероятность 283
Вес тела 380
Вечный двигатель 370—371
Виртуальные частицы 270
Водоизмещения центр 410
Волновая теория света 368
Волновая функция 175
Вращения ось 384

Время 13, 344, абсолютное 311, относительное 309, 346
 Времени измерения 279
 Вселенная 22, возраст 214, пространственно-временная структура 216
 Выборочное среднее 285, стандартное отклонение 285
 Вязкость (внутреннее трение) 395, 417; кинематическая 396; динамической вязкости коэффициент 417

Газов кинетическая теория 143
 Газовая динамика 406
 Газообразное состояние вещества 232
 Галилея принцип относительности 9, 98, 323—324, 292
 Гамильтона уравнение 174
 Гаусса распределение 284
 Гидравлический удар 419—420
 Гидроаэромеханика 406
 Гидродинамика 406
 Гидромеханика 406
 Гидростатика 407
 Гидростатическая формула 407—409
 Глюоны 262, 263
 Гравитационные: постоянная 356; теория 158; взаимодействие 264, 265; поле 58—59; заряд 356
 Гравитация 159, 264, 353
 Гравитон 265

Давление 407
 Д'Аламбера — Эйлера парадокс 416, 425—426
 Движение: 31, 57—58, 98—100, 99, 344; абсолютное 309, 344; вращательное 384; механическое 8, 314; относительное 346, 349; плоское 384; по инерции 338, 341; поступательное 384; равномерное круговое (по окружности) 331, 332; равномерное прямолинейное 326; равноускоренное 321, 327, 339
 Движения закон 318
 Дедукции метод 111
 Действие 293
 Декарта: вихревая теория 113, 342; метод 114—115
 Детерминизм 37, 201
 Динамика 333
 Динамические переменные 361
 Дискретность 302
 Дисперсии оценка 286
 Дисперсия 284
 Дифракция 117
 Длина волны 244
 Длина свободного пробега 395
 Доверительный интервал 286
 Доплера эффект 277, 278

Евклидовы: геометрия 299, 308; пространство 308, 311
 Единицы измерения основные 276, производные 276
 Естественного магнетизма явление 17

Жидкость 236
 Жуковского теорема 429
 Жуковского — Чаплыгина постулат 431

Идеальная жидкость 412; теория 417
 Идеального газа уравнение 407
 Идеальный газ 232
 Излучение инфракрасное 244
 Излучение рентгеновское 245
 Измерений погрешность 286; абсолютная 280; вычислений 281; грубые ошибки (промахи) 281; методическая 281; округления 281; относительная 280; приборная 281; субъективная 281
 Измерения 272; косвенные 281; прямые 281; квантовые ограничения 287
 Изотоп 255
 Изотропия 370
 Изотропность 235
 Изохронность 101, 109
 Иезуиты 116
 Импульс 16, 75, 336, 337
 Импульс (количество движения) 287, 341, 344, 362
 Инвариант 311
 Индекс цитируемости 172
 Индуктивно-дедуктивный метод 111
 Индукции метод 111
 Инерции: принцип 321, 341, 347; сила 348, 378—379
 Интерференция 117
 Информация 144
 Ионы 240

Кавитация 415
 Картезианство 113
 Картина мира: гелиоцентрическая 68, 57, 93, 309; геоцентрическая 61, 62; механическая 106, 133, 210, 298, 309; научная 8, 201, 210; полевая 10, 299; физическая 153
 Катодные лучи 241, 242
 Квантования вторичного теория 175
 Квантовые: механика 165—168, 292; теория 202; теория атома 250; теория поля 176; света 154; электродинамика 173; электроника 174
 Квантовое число кварка: аромат 261; цвет 261, 262
 Кванты 164
 Кварк 214, 259—261
 Кватернионы 174, 330
 Кеплера законы 95—98, 351, 359
 Кинематика 325, 326
 Кинетическая теория газов 144
 Кинетическая энергия 364; теорема 365
 Клейна — Гордона — Фока уравнение 176—177
 Конденсированное состояние вещества 233
 Конфайнмент 262
 Кориолиса сила 381
 Космические скорости 373—374
 Космос 22
 Кристалл 233
 Кристаллическая решётка 233
 Кристаллы жидкие 235
 Крыла теория 431
 Кумулятивный эффект 421

Лептон 214, 258
 Линии тока 412

Логос 28—29
 Лоренца группа 145

Магнуса сила 428
 Максвелла: уравнения 140, 145, 146, 289, распределение 144, электродинамика 163
 Масса 344
 Масса молекулярная 224—225
 Математическое ожидание 283—285; оценка 286
 Материальная точка 317, 346, 357
 Маха конус 435, число 434
 Маятник физический 390
 Межмолекулярного взаимодействия сила 230, 232
 Мезон 258, 288
 Метафизика 205, 210
 Метацентр 410
 Механика 7, 8, 69—71, 73, 106; волновая 175; классическая 298; материальной точки 407; матричная 166; сплошных сред 407; статистическая 144
 Механики основные понятия 344, законы 8
 Механической системы состояние 361
 Мещерского уравнение (уравнение движения ракеты) 377
 Модель математическая 290, физическая 317
 Модуль скорости линейной 329
 Молекула 220—222, 227, 403
 Молекулярная гипотеза 241
 Момент импульса 362, 367, 386; инерции 385, 386; сил 399
 Монополь 178
 Мюон 254

Наве — Стокса: гидродинамика 418; уравнение 417
 Наноматериалы 235
 Нанотехнология 228
 Нанотрубка 235
 Напряжённость поля 379
 Натурфилософия 54, 79, 121, 130, 309
 Натяжения сила 356
 Научные знания 6, 14, 16
 Научный метод 6, 106
 Невесомости состояние 379, 380
 Нейтрино 266—267
 Нейтрон 214, 216, 238, 252
 Нелинейные: физика 291; динамика 291
 Нелинейность 178, 294
 Неоплатонизм 44
 Неопределённостей соотношение 270, 287
 Неразрывности уравнение 412, 414
 Нётер теорема 293, 370
 Нормальной реакции силы 356
 Нутация 391
 Ньютона: законы 8, 58, 135, 136, 173, 298, 347—349, 356; закон вязкого трения 417; механика 292, 294, 311; концепция пространства-времени 311
 Ньютоновские жидкости 417

Обтекание безотрывное 426, 427, ламинарное 427, сверхзвуковое 436, турбулентное 427

Ойкумена 45
Оптика 72
Относительности теория 148—149, 153—155, 156, 158, 171, 172, 202
Оценки 287

Падение свободное 109
Парадокс возникновения 28
Параметры системы 361
Парсек 213, 275
Паскаля закон 91, 119, 407, 408
Паули принцип 177, 255, 258, 261
Переменные состояния 361
Перемещение 319, 327, 328
Перипатетическая школа 50, 64
Пифагорейзм 34, 36—38, 44
Плазма 237—238
Планка постоянная 10
Плечо силы 75
Пограничный слой 424, 426
Погрешности вычислений 281; систематические 282; случайные 282
Подобия критерии 432, 434
Подъёмная сила 429
Позитивизм 201
Позитрон 178
Поле 9, 143
Полевая форма материи 9
Полимеры 236
Потенциальной энергии теорема 366
Потенциальные силы 366
Преломления света закон 17
Прецессия 391
Принцип: дополнительности 167, 202; математической красоты 291; математичности 291; несоизмеримости парадигм 294; простоты 291; симметрии 324; соответствия 292, 294; сохранения материи 88; эквивалентности 379
Природа 22, 56
Просветители 105
Пространства и времени реляционная концепция 301, 312; субстанциональная концепция 301, 312
Пространство 344; абсолютное 309—311, 344, 346; относительное 309, 310, 346
Пространство-время 9, 159, 202, 270
Протон 214, 215—216, 251
Пуассона скобки 174, 175
Пустота 58, 113, 118
Путь 318

Работа 365
Радян 331
Радиоактивность 243
Радиус-вектор 318
Размерность пространства 355
Размерность физических величин 276
Редукционизм 294
Резонансы 215, 258
Рейнольдса число 418, 425, 434
Ридберга постоянная 279
РОЗУ правило 408—409

Сарос 14—15
Света и цвета теория 127
Сила 344

Силы консервативные 366
Симметрии оси 392
Симметрия 292, 321
Сильное взаимодействие 254, 266, 293
Слабое взаимодействие 266, 293
Сингулярность 202
Система замкнутая 321
Система консервативная 366
Система координат 313
Система мер метрическая 273
Система отсчёта 311, 317; инерциальная 322, 347; неинерциальная 347
Система СГС 275
Система СИ 275
Скаляр 174, 330
Скорость 360, 361; гиперзвуковая 436; линейная 329; мгновенная 320; сверхзвуковая 425; света 9, 155, 156; угловая 329
Сложения перемещений правило 345
Сложения сил закон 345
Солитон 178, 291
Сопротивление лобовое 394
Сопротивления сила 394
Софизм 34
Софисты 40
Сохранения законы 362; импульса 341, 362, 363, 372; массы 223, 412; механической энергии 367; момента импульса 369, 372, 388; очарования 372; странности 372; чётности 372; энергии 372
Спектр 246
Спектральный анализ 246
Спин 258
Средних значений распределение 286
Стандартное отклонение среднего 286
Столкновение неупругое 363
Столкновений теория 345
Струй теория 429
Суперобъединение 269
Стокса формула 395
Струхала число 434

Твёрдое тело 383
Телескоп 97, 102, 103, 126
Тензорные величины 389
Теплород 239
Теплоты теория 239
Термодинамика 28, 148
Термодинамическое равновесие 403
Течение ламинарное 418; стационарное 412; турбулентное 418; устойчивое 425
Томизм 79
Торричелли: закон 416; пустота 118, 121
Траектория 99, 101, 318
Трактат 55
Трение 398; сухое 396; жидкое 396; качения 400
Трения качения коэффициент 400
Трения коэффициент 356, 397
Трение покоя 397; сила (неполная сила трения) 356; коэффициент 397
Трения скольжения сила 356, 399
Тяги сила реактивная 374

Тяготение (всемирное) 128, 137—138, закон 8, 124, 332, 354, 355, теория 358
Тяжести сила 356; центр 410

Угол атаки 437
Ударная волна 436, 437
Ударный слой 436
Ультрафиолетовое излучение 244
Ускорение 320; касательное (тангенциальное) 332; нормальное 332; центростремительное 331, 332
Ускоритель элементарных частиц 257

Фермион 258
Ферми — Паста — Улама парадокс 291
Физика 7, 53, 54, 56, 200, 208, 210
Флуоресценция 242
Фокус 97
Фотон 262
Фотонная теория света 148
Фотоэффекта закон 154; теория 154; явление 164
Фруда число 434
Фуко маятник 322, 381

Хаббла постоянная 278
Химические соединения 223, элементы 221, 223
Холистский подход 294
Хромодинамика 266

Центробежная сила 381
Циолковского формула 376, 377

Часы 315
Число 35—36

Штейнера теорема 386

Эвристика 168
Эйлера: гидродинамика 417, 418; углы 368
Эксперимент 111
Экспериментальный метод 86—88
Эйнштейна: гравитационное уравнение 278; принцип относительности 292; теория относительности 294, 302, 312; теория относительности частная 302
Элейская школа 30, 38, 302
Электродинамика: квантовая 265; классическая 265
Электролиз 240
Электромагнитная индукция 140
Электромагнитного поля теория 144—145
Электромагнитное: взаимодействие 265, 268; поле 143, 144—145
Электрон 162, 164, 177, 215, 240, 241, 242; заряд 243
Электронный микроскоп 227, 228
Электрослабое взаимодействие 267—268
Элементарные частицы 215, 258
Энергия 362; кинетическая 365; потенциальная 365, связи 256
Эфир 138—139, 241, 302

Ядерные силы 254, 266

СОДЕРЖАНИЕ

К читателю (Валерий Санюк).....	5
---------------------------------	---

Дополнительные очерки

Знаете ли вы стихологию? (Илья Леенсон) — 7.
--

БИОГРАФИЯ ФИЗИКИ

Становление физики

Рождение научного духа (Андрей Грязнов, Александр Элиович)	12
Логика Космоса (Андрей Грязнов)	22
Аристотель Стагирит (Денис Строганов)	46
Первая физическая картина мира (Андрей Грязнов)	52
Между античностью и Возрождением (Дмитрий Баюк)	64
Архимед из Сиракуз (Денис Строганов)	79

Дополнительные очерки

Время и люди (Александр Элиович) — 14. Греческий эксперимент (Андрей Грязнов, Александр Элиович) — 20. Фалес Милетский (Денис Строганов) — 24. Анаксимандр (Андрей Грязнов) — 26. Анаксимен (Андрей Грязнов) — 27. Метод Парменида (Михаил Панов) — 30. Наглядное опровержение (Андрей Грязнов) — 31. Анаксагор из Клазомен (Денис Строганов) — 32. Эмпедокл из Агригента (Владимир Терентьев) — 33. Пифагор (Андрей Грязнов) — 35. Филолай (Андрей Грязнов) — 36. Расколотый мир (Андрей Грязнов) — 39. Платон. Жизнь в сумерках (Сергей Житомирский) — 45. В чём заключается задача науки? (Андрей Грязнов) — 54. Знал ли Аристотель о принципе инерции? (Андрей Грязнов) — 58. Прообразы научных институтов: библиотека и Мусейон (Дмитрий Баюк) — 65. Аристарх Самосский (Денис Строганов) — 68. Закат механики (Дмитрий Баюк) — 70. Оптика поздней античности (Дмитрий Баюк) — 72. Боги и термины (Дмитрий Баюк) — 73. Провозвестник будущего (Денис Строганов) — 80.
--

Дополнительные очерки-цитаты

Тело и мысль (Евгений Винокуров) — 19. Наследие греков (Вернер Гейзенберг) — 22. Аристотель отвечает на вопросы — 48.

Царица наук

Как физика стала наукой (Дмитрий Баюк)	84
Галилео Галилей (Дмитрий Баюк)	100
От Галилея к Ньютону (Дмитрий Баюк)	105
Исаак Ньютон (Дмитрий Баюк)	121
«Математические начала натуральной философии» (Юлий Данилов)	133
Джеймс Кларк Максвелл (Юлий Данилов)	140
Альберт Эйнштейн (Валерий Захаров)	146
Революция Эйнштейна (Даниил Данин)	153
Нильс Бор и квантовая революция (Людмила Петрановская)	161
Поль Дирак (Валерий Санюк)	172

Дополнительные очерки

Гуманисты (Дмитрий Баюк) — 88. «Демонический обман» (Дмитрий Баюк) — 89. Николай Коперник. «О вращении небесных сфер» (Юлий Данилов) — 93. Иоганн Кеплер (Дмитрий Баюк) — 96. Учёный-литератор (Дмитрий Баюк) — 99. Идея и вера (Станислав Широков) — 102. Христианство и научный метод (Дмитрий Баюк) — 106. Академия опытов (Дмитрий Баюк) — 108. Марен Мерсенн и его корреспонденты (Дмитрий Баюк) — 109. Рене Декарт (Денис Строганов) — 112. Блез Паскаль (Валерий Захаров) — 118. Яблоко Ньютона (Юрий Строганов) — 125. Телескоп и ошибка (Дмитрий Баюк) — 126. Русские переводы «Начал» (Юлий Данилов) — 139. Неожиданная находка (Юлий Данилов) — 139. Генри Кавендиш (Юлий Данилов, Юрий Строганов) — 145. Семья Эйнштейна (Татьяна Новицкая, Людмила Петрановская) — 150. 50 тысяч марок за голову (Даниил Данин) — 152. Вера и метод Эйнштейна (Валерий

Захаров) — 157. Драма идей Даниил Данин — 160. Семья Бора (Людмила Петрановская) — 163. Стиль Бора (Людмила Петрановская) — 165. Время Бора (Людмила Петрановская) — 166. Дополнительность культур Даниил Данин — 168. Герб учёного Даниил Данин — 170. Атомная бомба и «физический идеализм» (Александр Захарьин) — 171. Личная жизнь Дирака (Валерий Санюк) — 176. Стиль Дирака (Валерий Санюк) — 177. Десять величайших (Алексей Селиверстов) — 177.

Дополнительные очерки-цитаты

Задача натуральной философии (Исаак Ньютон) — 130. Эпитафия на надгробии Ньютона — 132. Ньютон о «Математических началах» — 135. Три закона (Исаак Ньютон) — 136. Правила умозаключений в физике (Исаак Ньютон) — 137. Роджер Котс о методе Ньютона — 138. Картина мира, создаваемая физиком-теоретиком (Альберт Эйнштейн) — 158. Открытие на прогулке (Поль Дирак) — 175.

МИР ФИЗИКОВ

Физическое образование (<i>Михаил Монастырский</i>)	180
Нобелевская премия — феномен XX века (<i>Абрам Блох</i>)	190
Физика и религия (<i>Валерий Захаров</i>)	200

Дополнительные очерки

Праздник Архимеда (Юрий Гапонов) — 181. Физические журналы (Юлий Данилов) — 184. Конгрессы, конференции и съезды (Юлий Данилов) — 185. Американское физическое общество (Валерий Санюк) — 186. Академии (Михаил Монастырский) — 187. Физические олимпиады (Алексей Селиверстов) — 188. Научные школы (Валерий Санюк) — 190. Премия доброй воли (Абрам Блох) — 191. Деньги на науку (Абрам Блох) — 192. Премии по физике (Михаил Монастырский, Валерий Санюк) — 195. Нобелевский доклад (Абрам Блох) — 199. Разумная вера (Валерий Захаров) — 203. Физика и философия (Валерий Захаров) — 204. Религия и этика учёного (Валерий Захаров) — 207. Физика настоящая и ненастоящая (Леонид Ашкинази) — 208.

ОГРОМНЫЙ ЗАГАДОЧНЫЙ МИР

Путешествие в глубь материи

Мир, в котором мы живём (<i>Сергей Громов</i>)	212
Атомы. Появление на свет (<i>Сергей Громов</i>)	217
От атомов к молекулам (<i>Сергей Громов</i>)	222
Атомно-молекулярный конструктор (<i>Сергей Громов</i>)	228
Внутри атома (<i>Владимир Милантьев</i>)	240
Атомные ядра и их обитатели (<i>Сергей Громов</i>)	250
Вечные «пленники» (<i>Илья Ройзен</i>)	257
Четыре «стихии» природы (<i>Илья Ройзен</i>)	264

Дополнительные очерки

Формула человека (Сергей Громов) — 216. Сколько молекул в кусочке мела? (Сергей Громов) — 228. Многоликий углерод (Сергей Громов) — 234. Мир полимеров (Сергей Громов) — 236. Разгадка природы теплоты (Владимир Милантьев) — 239. Атом электричества (Владимир Милантьев) — 240. Определение заряда электрона (Владимир Милантьев) — 243. Невидимый свет (Владимир Милантьев) — 244. Опасность науки (Владимир Милантьев) — 246. «Исчезнувшая» масса (Сергей Громов) — 256. Ядерная «алхимия» (Илья Ройзен) — 257. Зоопарк элементарных частиц (Сергей Громов) — 258. Три кварка для мастера Марка (Александр Берков) — 260. Цветные кварки и принцип Паули (Сергей Громов) — 261. Вакуум (Сергей Громов) — 270.

Дополнительные очерки-цитаты

Космическая хронология Карла Сагана — 215. «Выслушай то, что скажу...» (Тит Лукреций Кар) — 219. Самое важное сообщение (Ричард Фейнман) — 220.

Начала и методы физики

Измеряй всё доступное... (<i>Сергей Хорозов</i>)	272
Работа над ошибками (<i>Сергей Хорозов</i>)	280
Как физики познают мир (Юлий Данилов)	289

Дополнительные очерки

Система СИ (Сергей Хорозов) — 275. Международная система СИ (Сергей Хорозов) — 275. Анализ размерностей (Сергей Хорозов) — 276. Чем меньше, тем лучше? (Сергей Хорозов) — 277. Измерение времени (Сергей Хорозов) — 279. Вершки и корешки (Сергей Хорозов) — 282. Закон вероятностного движения (Алексей Селиверстов) — 285. Оценки (Алексей Селиверстов) — 287. Квантовые ограничения (Сергей Хорозов) — 287. Искусство эксперимента (Алексей Селиверстов) — 288. Открытие с помощью компьютера (Юлий Данилов) — 291. Принципы физики (Юлий Данилов) — 292.

МЕХАНИЧЕСКАЯ КАРТИНА МИРА

Механика и Вселенная (<i>Валерий Санюк</i>)	296
Пространство, время, движение	
Развитие представлений о пространстве, времени и движении (<i>Владимир Кречет</i>)	300
Механическое движение и средства его описания (<i>Сергей Громов</i>)	312
Кинематика материальной точки (<i>Сергей Громов</i>)	325
Дополнительные очерки	
Пространство древних (<i>Галина Михайлова</i>) — 301. Пространство, время и апории (<i>Андрей Грязнов</i>) — 304. Часы — дело тонкое (<i>Сергей Громов</i>) — 316. Закон движения как ряд Тейлора (<i>Сергей Громов</i>) — 328. Перемещение как площадь под графиком скорости (<i>Сергей Громов</i>) — 328. Скаляры и векторы (<i>Сергей Громов</i>) — 330. Расчёт центростремительного ускорения (<i>Сергей Громов</i>) — 331. Разложение ускорения по естественным осям (<i>Сергей Громов</i>) — 332.	
Дополнительные очерки-цитаты	
Существует ли пустота? (<i>Аристотель</i>) — 307. Опыт Ньютона с ведром — 310.	
Динамика материальной точки	
Динамика до Ньютона (<i>Сергей Громов</i>)	333
Динамика Ньютона (<i>Сергей Громов</i>)	342
Всемирное тяготение (<i>Сергей Громов</i>)	349
Динамические переменные и законы сохранения (<i>Сергей Громов</i>)	359
Динамика космических полётов (<i>Валерий Туриков</i>)	372
Неинерциальные системы отсчёта (<i>Валерий Туриков</i>)	378
Движение твёрдого тела (<i>Сергей Сергеев</i>)	383
Сопровождение движению и силы трения (<i>Александр Гордеев</i>)	394
Дополнительные очерки	
Импульс и пушечное ядро (<i>Сергей Громов</i>) — 336. Ньютон о сложении сил (<i>Сергей Громов</i>) — 345. Закон тяготения и размерность пространства (<i>Сергей Громов</i>) — 355. Второй закон Ньютона как инструмент решения задач (<i>Валерий Туриков</i>) — 356. Задача «Гравитация во Флатландии» (<i>Сергей Громов</i>) — 358. Решение задачи «Гравитация во Флатландии» — 360. О работе силы тяжести (<i>Сергей Громов</i>) — 364. Теорема о кинетической энергии (<i>Сергей Громов</i>) — 365. Теорема о потенциальной энергии (<i>Сергей Громов</i>) — 366. Леонард Эйлер (<i>Денис Строганов</i>) — 368. Работа и вращение (<i>Сергей Громов</i>) — 369. <i>Perpetuum mobile</i> (<i>Алексей Селиверстов</i>) — 370. Расчёт второй космической скорости (<i>Сергей Громов</i>) — 373. Земля не является шаром (<i>Валерий Туриков</i>) — 375. Формула Циолковского (<i>Сергей Громов</i>) — 377. Вес и невесомость (<i>Сергей Громов</i>) — 380. Виды движений твёрдых тел (<i>Сергей Сергеев</i>) — 384. Как рассчитать момент инерции (<i>Сергей Сергеев</i>) — 386. Аналогия двух движений (<i>Сергей Сергеев</i>) — 387. Закон сохранения момента импульса (<i>Сергей Сергеев</i>) — 388. Физический маятник (<i>Сергей Сергеев</i>) — 390. Загадка кельтского камня (<i>Сергей Сергеев</i>) — 392. Парашют (<i>Александр Гордеев</i>) — 394. Природа трения в жидкостях и газах (<i>Александр Гордеев</i>) — 395. Трение и автомобиль (<i>Александр Гордеев</i>) — 398. Качение вместо скольжения. Колесо и подшипник (<i>Александр Гордеев</i>) — 401. Сила трения и необратимость времени (<i>Александр Гордеев</i>) — 401.	
Дополнительные очерки-цитаты	
Аристотель об устройстве Вселенной — 334. Почему камень летит дальше, чем перо? (<i>Жан Буридан</i>) — 335. Опыт с желобом (<i>Галилео Галилей</i>) — 338. Какие тела падают быстрее? (<i>Галилео Галилей</i>) — 339. Эйнштейн о методе Ньютона — 343. В «заколдованном» шаре (<i>Яков Перельман</i>) — 382. Падающая кошка (<i>Герман Бонди</i>) — 389.	
Механика жидкостей и газов	
Введение (<i>Сергей Арафайлов</i>)	402
Что изучает гидроаэромеханика (<i>Сергей Арафайлов</i>)	406
Удивительные явления гидроаэромеханики (<i>Сергей Арафайлов</i>)	419
Аэродинамика (<i>Сергей Арафайлов</i>)	425
Дополнительные очерки	
Форма поверхности жидкости во вращающемся стакане (<i>Сергей Арафайлов</i>) — 408. Какое количество воздуха содержит атмосфера Земли? (<i>Сергей Арафайлов</i>) — 409. Остойчивость надводных кораблей (<i>Сергей Арафайлов</i>) — 410. Даниил Бернулли (<i>Вера Чинёнова</i>) — 413. Болото — неньютоновская жидкость (<i>Сергей Арафайлов</i>) — 423. Николай Егорович Жуковский (<i>Ирина Тюлина</i>) — 430. Сергей Алексеевич Чаплыгин (<i>Ирина Тюлина</i>) — 431. Сопло Лаваля (<i>Сергей Арафайлов</i>) — 434. Ньютон в роли Нострадамуса (<i>Сергей Арафайлов</i>) — 436.	
Лауреаты Нобелевских премий по физике	438
Указатель терминов	440
Содержание	443

ЭНЦИКЛОПЕДИЯ ДЛЯ ДЕТЕЙ

Т. 16. ФИЗИКА

Ч. 1. БИОГРАФИЯ ФИЗИКИ. ПУТЕШЕСТВИЕ В ГЛУБЬ МАТЕРИИ. МЕХАНИЧЕСКАЯ КАРТИНА МИРА

Совет директоров

М. Аксёнова
Г. Храмов

Главный редактор

В. Володин

Главный художник

Е. Дукельская

Заместитель главного редактора, методологический редактор тома

А. Элиович

Ведущий научный редактор тома

В. Санюк

Ответственный редактор тома

А. Евсеевичева

Научные и методические редакторы тома

А. Берков
С. Громов
Ю. Данилов
С. Капица
Л. Петрановская
А. Селиверстов

Редактирование и корректура

С. Суставова —
начальник отдела
И. Антонова — редактор
Т. Новицкая — редактор
О. Тюреникова — редактор
В. Рябцева — корректор
Е. Тюрникова — корректор
Н. Трифонова —
редактор проверки

Художественный редактор

М. Ефременко

Подбор иллюстраций

А. Пущина
М. Радина
К. Привезенцев

Изготовление оригинал-макета

К. Иванов
Р. Сурин
Л. Харченко
А. Володарский
А. Кильдин

Помощники ответственного редактора

М. Запарованный
В. Свалова

Набор и считка

М. Кудрявцева —
начальник отдела
Ю. Антонова
Ю. Ашмарина
Н. Гольдман
О. Демидова
Н. Липатова
Т. Поповская
И. Самсонова
Ф. Тахирова
Е. Терёхина
Н. Шевердинская
О. Шевченко

Координатор

О. Горгун

Директор по производству

И. Кошелев

Технолог производства

Т. Любцова

Художники

В. Бадалов
Н. Васильева
О. Вельчинская
Н. Доброхотова
Т. Доброхотова-Майкова
А. Евдокимов
Е. Евдокимова
В. Иванюк
Ю. Левиновский
А. Мигунов
И. Студеникин
Е. Сурикова
В. Торопов
В. Челак
П. Шевелёв

А. Шечкин
Ю. Юров

Фотографы

Г. Буланов
А. Журавлёв
Ю. Любцов
И. Константинов
И. Пискарёв

Фотографии и изобразительные материалы предоставлены

Музеем книги Российской государственной библиотеки; Государственным политехническим музеем; Музеем М. В. Ломоносова Российской Академии наук; агентством «Фото ИТАР-ТАСС»; Институтом истории естествознания и техники РАН; Государственным историческим музеем; архивом П. Л. Капицы; научной библиотекой А. М. Горького Московского государственного университета; музеем физического факультета МГУ; журналом «Звездочёт»; Всероссийской государственной библиотекой иностранной литературы имени М. И. Рудомино

Суперобложка

Е. Дукельская
Ю. Юров

Шмуктитулы

Е. Дукельская

«Аванта+» благодарит за помощь в подготовке физический факультет МГУ имени М. В. Ломоносова, С. Болтачёву, И. Иванову, Е. Капицу, Ю. Мазурова, О. Севастьянову

В СЕРИИ «ЭНЦИКЛОПЕДИЯ ДЛЯ ДЕТЕЙ» ВЫШЛИ В СВЕТ ТОМА:



**«Всемирная
история»**



«Биология»



«География»



«Геология»



«Математика»



«Астрономия»



**«История
России»
(часть 1)**

**«История
России»
(часть 2)**

**«История
России»
(часть 3)**



**«Искусство»
(часть 1)**

**«Искусство»
(часть 2)**

**«Искусство»
(часть 3)**



**«Языкознание.
Русский язык»**



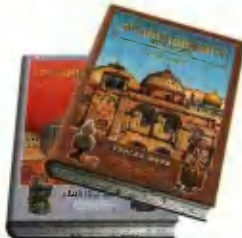
**«Русская
литература»
(часть 1)**

**«Русская
литература»
(часть 2)**



**«Физика»
(часть 1)**

**«Физика»
(часть 2)**



**«Религии
мира»
(часть 1)**

**«Религии
мира»
(часть 2)**



**«Всемирная
литература»
(часть 1)**

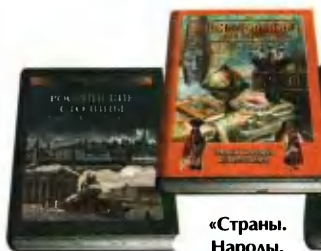
**«Всемирная
литература»
(часть 2)**



**«Россия:
физическая
и экономическая
география»**



«Техника»



**«Российские
столицы»
(дополнительный
том)**

**«Страны.
Народы.
Цивилизации»**



«Химия»



**«Человек»
(часть 1)**



«Экология»



«Спорт»



**«Личная
безопасность»
(дополнительный
том)**

УВАЖАЕМЫЙ ЧИТАТЕЛЬ!

Нас радует, что в адрес издательского объединения «Аванта+» приходит множество читательских писем. Пожалуйста, пишите нам о том, что Вам понравилось и особенно заинтересовало в статьях, показалось удачным в подходе к изложению материала или в оформлении книги. Мы будем благодарны также за любые критические замечания. Давайте подумаем вместе, как сделать «Энциклопедию для детей» необходимой и любимой книгой в каждом доме.

«Аванта+» осуществляет доставку почтой «Энциклопедии для детей» по России. Вы можете заказать все вышедшие в свет тома. Запросы об условиях доставки книг почтой направляйте по адресу: 123022, Москва, а/я 73, «Центр доставки „Аванта+“».

Фирменные магазины «Аванта+» — это:

- широкий ассортимент обучающей и развивающей литературы;
- розничная продажа «Энциклопедии для детей»;
- подписка на «Энциклопедию для детей» и продажа по абонементам вышедших томов.

Напоминаем, что подписка на многотомную «Энциклопедию для детей» даст Вам возможность получать вновь выходящие и ранее выпущенные тома серии по льготным ценам. Подписка на все тома «Энциклопедии для детей» продолжается. **Адреса магазинов «Аванта+»:** Москва, ул. 1905 года, д. 8; Ореховый бульвар, д. 15, «Галерея Водолей», 2-й этаж (ст. м. «Домодедовская»); ул. Пятницкая, д. 73, магазин «Хорошее настроение» (ст. м. «Добрынинская»). Все магазины работают с 10⁰⁰ до 20⁰⁰ без выходных.

Телефоны:

в Москве: (095) 259-2305, 259-5412 (для справок);
(095) 259-7627, 259-6052 (оптовая продажа);
(095) 259-6044, 259-4171 (бесплатная доставка по указанному адресу в Москве от 5 книг серии «Энциклопедия для детей»);
в Санкт-Петербурге: (812) 567-2746, 567-3671 (оптовая продажа, подписной пункт);

В серии «Энциклопедия для детей»

вышли в свет тома:

«Всемирная история», «Биология», «География»,
«Геология», «История России» (части 1, 2 и 3),
«Религии мира» (части 1 и 2), «Искусство» (части 1, 2 и 3),
«Астрономия», «Русская литература» (части 1 и 2),
«Языкознание. Русский язык», «Математика»,
«Россия: физическая и экономическая география»,
«Страны. Народы. Цивилизации», «Техника»,
«Всемирная литература» (части 1 и 2),
«Физика» (части 1 и 2), «Химия», «Человек» (часть 1),
«Экология», «Спорт».

Вышли в свет дополнительные тома:

«Российские столицы», «Личная безопасность».

Планируется выпуск томов:

«Человек» (часть 2),
«Общество»,
«Информатика»,
«Универсальный иллюстрированный словарь-справочник».

Планируется выпуск дополнительного тома:

«История XX века».

«Аванта+» теперь в Интернете

Загляните на сайт «Аванта+» в Интернете www.avanta.ru и Вы сможете:

- получить оперативную информацию об изданиях «Аванта+»;
- заказать книги «Аванта+» и других издательств с доставкой на дом;
- прочитать отзывы средств массовой информации и рецензентов.

Издательское объединение «Аванта+» гарантирует высокий научный и художественный уровень томов серии «Энциклопедия для детей».

Книга отпечатана на офсетной бумаге Санкт-Петербургской фабрики ГОЗНАК. По вопросам закупки бумаги обращаться по телефону в Москве (095) 255-1638.

Энциклопедия для детей. Том 16. Физика.

Ч. 1. Биография физики. Путешествие в глубь материи. Механическая картина мира. Книга издаётся в суперобложке.

Изд. лиц. № 066781 от 21.07.99. Подписано в печать 24.12.2001. Формат 84×108/16.

Бумага офсетная. Гарнитура «Гарамон». Печать офсетная. Усл. печ. л. 47,04.

Тираж 20 000 экз. Доп. Заказ № 1816.

ЗАО «Дом Книги „Аванта+“». 109472, Москва, Ташкентская ул., д. 24, корп. 1, стр. 1.

Отпечатано с готовых диапозитивов в Государственном ордена Октябрьской Революции, ордена Трудового Красного Знамени Московском предприятии «Первая Образцовая типография» Министерства Российской Федерации по делам печати, телерадиовещания и средств массовых коммуникаций. 113054, Москва, Валуевская, 28.

