

А. ЭЙНШТЕЙН и Л. ИНФЕЛЬД

ЭВОЛЮЦИЯ ФИЗИКИ

ОГИЗ-ГОСТЕИЗДАТ

1948

А. ЭЙНШТЕЙН и Л. ИНФЕЛЬД

ЭВОЛЮЦИЯ ФИЗИКИ

**РАЗВИТИЕ ИДЕЙ ОТ ПЕРВОНАЧАЛЬНЫХ ПОНЯТИЙ
ДО ТЕОРИИ ОТНОСИТЕЛЬНОСТИ И КВАНТ**

ПЕРЕВОД С АНГЛИЙСКОГО
СОВСТУПИТЕЛЬНОЙ СТАТЬЕЙ
С. Г. СУВОРОВА

О Г И З
ГОСУДАРСТВЕННОЕ ИЗДАТЕЛЬСТВО
ТЕХНИКО-ТЕОРЕТИЧЕСКОЙ ЛИТЕРАТУРЫ
МОСКВА 1948 ЛЕНИНГРАД

АННОТАЦИЯ

Книга знакомит читателя с историей развития основных идей физики. Она показывает, как зародилось механистическое воззрение на природу, в силу чего оно пришло в упадок, к каким физическим представлениям о строении мира приходит современная физика. Книга показывает, что новые физические понятия и теории возникают и развиваются в физике не произвольно, а под влиянием необходимости разрешать противоречия, возникающие между старыми понятиями и теориями и новой научной практикой. Мастерское изложение делает книгу доступной для неспециалистов в области физики.

Высказанные в книге, неприемлемые для материалистов, философские взгляды разобраны во вступительной статье С. Суворова.

Редактор *В. А. Лешковцев.*

Техн. редактор *К. Ф. Брудно*

Подписано к печати 3/XII 1947 г. 16³/₄ печ. л. + 2 вклейки, 14,1 уч.-изд. л.
32 100 тип. зн. в печ. л.

Тираж 20 000 экз. А10004. Цена книги 8 р. 50 к. Переплёт 2 р. Заказ № 7281.

1-я Образцовая тип. треста «Полиграфкнига» ОГИЗа при Совете Министров СССР.
Москва, Валовая, 28.

ОГЛАВЛЕНИЕ

С. Суворов. Об идеологических пороках в книге А. Эйнштейна и Л. Инфельда «Эволюция физики»	5
Предисловие	25

I. ПОДЪЁМ МЕХАНИСТИЧЕСКОГО ВОЗЗРЕНИЯ

Великая повесть о тайнах природы	27
Первая руководящая идея	29
Векторы	34
Загадка движения	39
Ещё одна руководящая идея	51
Является ли теплота субстанцией?	54
Увеселительная горка	61
Мера превращения	65
Философские воззрения	68
Кинетическая теория материи	71

II. УПАДОК МЕХАНИСТИЧЕСКОГО ВОЗЗРЕНИЯ

Две электрические жидкости	79
Магнитные жидкости	89
Первая серьёзная трудность	92
Скорость света	97
Свет как субстанция	100
Загадка цвета	102
Что такое волна?	105
Волновая теория света	109
Продольны или поперечны световые волны?	117
Эфир и механистическое воззрение	119

III. ПОЛЕ И ОТНОСИТЕЛЬНОСТЬ

Поле как представление	123
Две основы теории поля	132
Реальность поля	137
Поле и эфир	143

Механические леса	145
Эфир и движение	155
Время, пространство, относительность	167
Относительность и механика	180
Пространственно-временной континуум	186
Общая относительность	194
Вне и внутри лифта	199
Геометрия и опыт	205
Общая относительность и ее экспериментальная проверка . .	216
Поле и вещество	220

IV. КВАНТЫ

Непрерывность, прерывность	225
Элементарные кванты вещества и электричества	227
Кванты света	232
Световые спектры	238
Волны вещества	242
Волны вероятности	249
Физика и реальность	261
Указатель	265

С. СУВОРОВ

ОБ ИДЕОЛОГИЧЕСКИХ ПОРОКАХ В КНИГЕ А. ЭЙНШТЕЙНА И Л. ИНФЕЛЬДА «ЭВОЛЮЦИЯ ФИЗИКИ»

Книга эта, посвящённая эволюции основных физических воззрений, предназначена её авторами для широких кругов интеллигенции, не сделавших физику своей специальностью, но живо интересующихся её развитием. Это не заурядная компилятивная работа, каких немало выходит за рубежом. Авторы её своими трудами способствовали развитию физики, а Альберт Эйнштейн является одним из величайших физиков современности. Он сам заложил немало краеугольных камней в основание современной физики, столь богатой новыми глубокими идеями.

Эйнштейн вошёл в историю физики прежде всего как творец теории относительности, сыгравшей огромную роль в эволюции наших представлений о времени, пространстве, массе, энергии, и освободившей физику от безуспешных поисков таких фетишей, как механический эфир или абсолютная система координат. Эйнштейн дал теоретический анализ принципиальной стороны фотоэлектрического эффекта, показав, что экспериментально наблюдающиеся закономерности фотоэффекта возможно объяснить только при условии допущения, что свет состоит из потока корпускул (квантов), энергия которых пропорциональна частоте излучения; фотоэлектрический эффект, как известно, стал одним из существенных доказательств квантового строения электромагнитного поля. Эйнштейн один из первых обратил внимание на броуновское движение мельчайших взвешенных в жидко-

сти частиц, как на явление, которое весьма наглядно демонстрирует закономерности статистической механики; теория броуновского движения, данная Эйнштейном, легла, наряду с работами М. Смолуховского, в основание статистической физики.

Уже это беглое перечисление основных направлений его работы показывает, что Эйнштейн дал фундаментальные исследования в наиболее важных областях современной физики. Ясно, что книга Эйнштейна и Инфельда «Эволюция физики» является отражением физического мышления крупнейшей школы в физике. Этим объясняется большой интерес к книге, проявленный не только широкими кругами интеллигенции, для которых она написана, но и специалистами-физиками.

Книга Эйнштейна и Инфельда не история физики, которая шаг за шагом описывала бы её достижения и показывала бы их связь с развитием производительных сил. Авторы поставили перед собой задачу нарисовать широкими мазками картину общего развития физических идей, дать логическую линию развития физики. В рамках поставленной задачи авторы описывают только принципиальные научные открытия, являющиеся поворотным пунктом в развитии физических теорий. Их цель «показать те активные силы, которые вынуждают науку создавать идеи, соответствующие реальности нашего мира», дать «некоторые представления о вечной борьбе изобретательного человеческого разума за более полное понимание законов, управляющих физическими явлениями».

На протяжении всей книги Эйнштейн и Инфельд убедительно показывают, что научные физические понятия и теории развиваются не произвольно, а под влиянием необходимости разрешить противоречия, возникающие между старой теорией и новым экспериментальным материалом, новой научной практикой. «Наука вынуждает нас создавать новые понятия, новые теории. Их задача — разрушить стену противоречий, которые ча-

сто преграждают дорогу научному прогрессу. Все существенные идеи в науке родились в драматическом конфликте между реальностью и нашими попытками её понять» (стр. 237). Книга Эйнштейна и Инфельда представляет интерес именно с точки зрения ясного и последовательного анализа тех решающих экспериментов, которые определяют судьбу данной теории и вынуждают физика создавать новые.

Эйнштейн и Инфельд понимают, что физические понятия и теории произвольны не только по своему происхождению, но и по содержанию. «Всякое умозрительное построение, — пишут они, — должно быть проверено экспериментом, и любые результаты, сколь бы заманчивы они ни были, должны быть отброшены, если они не соответствуют фактам».

Это и есть стихийно материалистическая точка зрения естествоиспытателя, который постоянно убеждается в том, что природа противостоит человеческому мышлению как нечто существующее объективно, независимо от мышления, и что мышление, пытаясь охватить природу, создаёт на каждом новом этапе всё более точный образ её. История эволюции физических теорий, и в частности история, рассказанная Эйнштейном и Инфельдом в предлагаемой книге, позволяет проследить этот процесс в очень наглядной форме. В этом заключается существенное достоинство книги.

Ценно также и то, что авторы сумели рассмотреть за сменой физических теорий закономерную смену мировоззрений.

Они показывают, как на основе успехов изучения механической формы движения среди физиков всё более кристаллизовалось и упрочнялось механистическое воззрение, господствовавшее вплоть до конца XIX столетия.

Своё наивысшее выражение механистическое воззрение получило в работах Гельмгольца, наиболее ярко выразившего программу сведения всех физических явлений к силам взаимодействия между бескачественными частицами. Эйнштейн и Инфельд указывают, что механистическое воззрение постепенно подтачивалось и прихо-

дило к краху, по мере того, как в физике обосновывалось и развивалось понятие поля и становилось ясным, что поле, обладающее своеобразными свойствами, столь же реально, как и вещество, и что не случайно не удаётся сведение специфических свойств поля к механическим взаимодействиям между элементами некоего гипотетического вещества — эфира.

Необходимо отметить мастерское изложение в книге труднейших проблем современной физики, сущность которых авторы показывают для неспециалистов очень выпукло и на высоком научном уровне. Особенно это следует сказать об изложении теории относительности, пожалуй, единственном столь популярном и доступном для неспециалистов.

Таковы достоинства труда Эйнштейна и Инфельда «Эволюция физики». Но в нем имеются также и недостатки. Физики и философы, ознакомившись с книгой, найдут в ней поводы для критической работы. Ниже разобраны важнейшие принципиальные пороки книги.

* * *

Одна из существенных ошибок авторов книги состоит в неправильном толковании тенденций развития современной физики.

Как уже было сказано, развитие физики, по Эйнштейну и Инфельду, представляет собой закономерную смену воззрений на сущность явлений природы. Механистическое воззрение сначала укрепляется, а затем приходит к краху. В настоящее время, по мнению авторов, формируется новое мировоззрение. Однако, какая же картина мира сменяет механистическую? Эйнштейн и Инфельд полагают, что сейчас ещё нет математически обоснованного ответа на этот вопрос, но направление дальнейшего развития физики для них вполне ясно: на место механики становится физика поля; все физические законы должны быть сведены к структурным законам поля; вещество должно толковаться, как поле. До теории относительности, пишут авторы, ещё можно было бы утверждать, что между веществом и полем имеется качественное различие: вещество имеет массу,

в то время как поле её не имеет; поле представляет энергию, вещество представляет массу. Теория же относительности, установив эквивалентность массы и энергии, показала, что вещество отличается от ~~массы~~ лишь большей концентрацией энергии. «Но если это так, то различие между веществом и полем скорее количественное, чем качественное. Нет смысла рассматривать вещество и поле как два качества, совершенно отличные друг от друга» (стр. 222).

На основе качественного отождествления вещества и поля Эйнштейн и Инфельд пытаются построить «основы новой философии». Они пишут:

«Мы не можем построить физику на основе только одного понятия — вещества. Но деление на вещество и поле, после признания эквивалентности массы и энергии, есть нечто искусственное и неясно определённое. Не можем ли мы отказаться от понятия вещества и построить чистую физику поля? То, что действует на наши чувства в виде вещества, есть на деле огромная концентрация энергии в сравнительно малом пространстве. Мы могли бы рассматривать вещество как такие области в пространстве, где поля чрезвычайно сильны. Таким путём можно было бы создать основы новой философии. Её конечная цель состояла бы в объяснении всех событий в природе структурными законами, справедливыми всегда и всюду. С этой точки зрения брошенный камень есть изменяющееся поле, в котором состояния наибольшей интенсивности поля перемещаются в пространстве со скоростью камня. В нашей новой физике не было бы места и для поля, и для вещества одновременно, поскольку единственной реальностью было бы поле» (стр. 222).

Диалектического материалиста не пугает, что современная физика, наряду с веществом, известным классической физике, выдвигает и поле, как физическую реальность. Для материалиста существенен лишь вопрос, является ли поле, о котором говорят физики, объективной реальностью, существующей независимо от человеческого сознания, и познаваемой, отображаемой в этом сознании. Если за полем признаются эти свойства, то оно, следова-

тельно, является, как и вещество, одной из форм материи. Речь идёт лишь о том, имеются ли основания для сведения одной формы материи — вещества — к другой её форме — полю.

Современная наука вовсе не даёт Эйнштейну и Инфельду ни физических, ни философских оснований для такого сведения.

Структурные законы поля, о которых говорят Эйнштейн и Инфельд, суть законы, «связывающие события, смежные в пространстве и времени» (стр. 221), иначе говоря, законы, отражающие свойства непрерывности в природе. Если классическая теория строения вещества наделяла вещество в пространственно-временном отношении только свойствами дискретности, то классическая теория поля опиралась только на свойства непрерывности. Мы видим, что сведением вещества к полю, попыткой выразить их законы через структурные, Эйнштейн и Инфельд пытаются разрешить историческую дискуссию о том, дискретны или непрерывны свойства материального мира, в пользу непрерывности. Такая программа сведения вещества к полю противоречит духу развития современной физики, ибо последняя установила, что в энергетическом отношении поле непрерывно только с точки зрения макроскопической; что же касается микроструктуры поля, то, как показала квантовая физика, поле, обладая некоторыми свойствами непрерывности, энергетически ведёт себя как дискретная реальность. Таким образом, попытка уничтожить противоречие между дискретностью и непрерывностью сведением дискретного к непрерывности, объяснением частиц вещества, как особых точек непрерывного поля, оказывается несостоятельной: само поле есть реальность непрерывно-дискретная. Различие между веществом и полем гораздо сложнее, чем различие в степени концентрации энергии.

Правда, Эйнштейн и Инфельд выражают недовольство развитием квантовой механики и упрекают её в дуалистичности, поскольку она базируется «на двух понятиях, понятиях вещества и поля» и «не приближает ни на один шаг реализацию нашей (авторов книги — С. С.)

старой проблемы — свести всё к понятию поля» (стр. 261). Но в этом как раз заключается не недостаток, а достоинство квантовой механики — она была вынуждена развиваться на основе признания противоречивых свойств в самом микрообъекте. И если она достигла положительных результатов в изучении микромира, то только потому, что встала не на путь сведения одних противоречивых свойств к другим, а на путь признания их объективно существующими в микромире.

В этой же связи следует отметить, что Эйнштейн и Инфельд существенно неправы, отказываясь в книге, посвящённой эволюции физики, рассмотреть проблемы современной ядерной физики. «Так как в этой книге, — пишут они, — мы интересуемся только общими идеями физики, мы опустим этот раздел, несмотря на его огромную важность в современной физике» (стр. 232). Неубедительно выглядит рассуждение о том, что ядерная физика не имеет отношения к общим идеям физики. В атомных ядрах, а также в космических лучах, об исследовании которых Эйнштейн и Инфельд даже не упомянули, мы встречаемся с новыми классами элементарных частиц, взаимодействие которых имеет совершенно другую природу, чем взаимодействие частиц, известных дотоле, а стало быть, встречаемся с новым классом полей. В ядерных реакциях мы обнаруживаем крайне важные для развития общих идей физики превращения элементарных частиц друг в друга. Пролить свет на взаимосвязь вещества и поля могут именно исследования условий этих взаимопревращений, а также явлений излучения, а не спекулятивные попытки распространить структурные уравнения поля на вещество.

Какие же физические доводы могут быть приведены в пользу сведения вещества к полю?

Эйнштейн и Инфельд пишут, что программа сведения вещества к полю внушена «огромными достижениями физики поля, успехом в выражении законов электричества, магнетизма, тяготения в форме структурных законов и, наконец, эквивалентностью массы и энергии» (стр. 222).

Успехи физики поля за последние три четверти века были, несомненно, значительными. Но сами по себе они ещё не доказывают возможности сведения вещества к полю. Известно, например, что механистическое воззрение также развивалось и крепло на основе успехов развития механики. Механистическое воззрение казалось настолько незыблемым, что в середине XIX столетия многие очень крупные физики, в том числе и Гельмгольц, истолковали как доказательство справедливости этого воззрения даже закон сохранения и превращения энергии, только что тогда открытый. Теперь мы знаем, насколько это было неверно. Но неправильное толкование закона сохранения и превращения энергии не спасло механистическое воззрение от неизбежного краха.

Что же даёт для программы сведения вещества к полю открытие эквивалентности массы и энергии?

Эйнштейн и Инфельд справедливо рисуют дело так, что до этого открытия вещество и поле были в представлении физиков разделены непроходимой стеной. Этому, в частности, способствовала безуспешность попыток свести поле к веществу. Открытие эквивалентности массы и энергии показало, что между веществом и полем нет абсолютной границы, что оба они обладают одновременно общими свойствами — массой и энергией. Однако из этого открытия отнюдь не следует, что вещество и поле теряют свои качественные особенности, что различие между ними только количественное.

Философские основы попыток сведения вещества к полю принципиально не отличаются от той натурфилософии, которая кладётся в основу попыток сведения поля к веществу. И та и другая натурфилософия стремятся уничтожить качественную специфику отдельных форм движения материального мира, найти последние неизменные «кирпичи мироздания»; и та и другая натурфилософия полагают, что единство мира, без которого немислимо его познание, состоит именно в возможности сведения всего многообразия мира к последним неизменным кирпичам. Но таких неизменных кирпичей мироздания не существует, ими не являются ни какие-либо

определённые частицы вещества, ни какие-либо определённые поля. Развитие нашего познания материального мира, в частности весь огромный опыт развития физики последнего столетия, показывает, что единство материального мира следует видеть не в возможности сведения многообразных форм движения материи к единственной неизменной форме, а в том, что материальный мир бесконечно развивается и что в этом развитии наблюдаемые нами отдельные качественные формы движения материи при определённых условиях и всегда в определённых соотношениях переходят друг в друга.

* * *

В стремлении свести вещество к полю проявилось расширенное толкование границ применения теории относительности. На этой же почве возникла и другая принципиальная ошибка Эйнштейна и Инфельда: вывод о том, будто бы общая теория относительности доказала равноправность космологических воззрений Птолемея и Коперника и дала право, спустя три с половиной столетия, называть борьбу между ними бессмысленной.

Этот неправильный вывод следует разобрать подробнее, ибо он высказывается не впервые; подобно Эйнштейну, его повторяют многие физики, и он давно уже стал для одних — обоснованием выводов о крайне широком значении теории относительности в современной науке, для других — свидетельством крамольности этой теории, которую следует вовсе изгнать из науки.

Эйнштейн и Инфельд пишут:

«Можем ли мы сформулировать физические законы таким образом, что они будут справедливы для всех систем координат, не только для тех, которые движутся прямолинейно и равномерно, но также и для тех, которые движутся совершенно произвольно друг относительно друга? Если это можно сделать, то наши трудности будут разрешены. Тогда мы будем в состоянии применять законы природы в любой системе координат. Борьба между воззрениями Птолемея и Коперника, столь жестокая в ранние дни науки, стала бы тогда совершенно бессмысленной.

Любая система координат могла бы применяться с одинаковым основанием. Два предложения: «Солнце покоится, а Земля движется» и «Солнце движется, а Земля покоится» — означали бы просто два различных соглашения о двух различных системах координат... Это, в самом деле, оказывается возможным!» (стр. 197).

Вывод о том, будто теория относительности доказала бессмысленность борьбы воззрений Птолемея и Коперника, основан на неправильном понимании того, какой круг вопросов разрешила теория относительности, и что дало науке воззрение Коперника.

В самом деле, что означает в теории относительности равноправность систем координат?

Теория относительности развилась в связи с тем, что к началу двадцатого столетия обнаружилась бесплодность попыток какими-либо физическими методами установить единственную абсолютную систему координат, которая имела бы преимущество для выражения законов любых физических явлений, где бы они ни происходили. Как убедительно показали эксперименты, такой системой не являются ни Земля, ни Солнце, ни Галактика, ни эфир, существование которого физика вовсе не обнаружила. Но если в природе нет абсолютной системы координат, то закономерности физических явлений, в том числе и уравнения механического движения, принимают в классической физике каждый раз своеобразный вид при переходе к другим, как угодно движущимся системам координат, в которых они рассматриваются, и таким образом теряют свою однозначную определённую. В этом состояла существенная трудность классической физики. Эйнштейн поставил перед собой задачу: отыскать те условия, при которых вид физических закономерностей не зависел бы от систем координат. Для решения этой задачи понадобилось пересмотреть классические понятия пространства и времени. Эйнштейн первый из физиков понял, что изменения вида закономерностей при переходе от одной системы координат к другой основываются в классической физике на том молчаливо допускаемом признании, что пространство и время, входящие в эти закономерности, оставались при этом переходе неизменными. Между тем это положение

ние классическая физика ничем не могла обосновать. Теория относительности исходит из того, что пространство и время меняются при переходе от одной системы координат к другой, что каждая система координат, движущаяся произвольным образом, имеет своё пространство и время.

На практике, когда в астрономии отыскивается подходящая система координат, всегда имеется в виду выразить в этой системе движение не одного, а ряда тел (планет). В этом случае движение любой планеты можно выразить как в геоцентрической (связанной с Землёй), так и в гелиоцентрической (связанной с Солнцем) системе координат. При этом уравнения движения будут иметь один и тот же вид. Однако применяемые в этих уравнениях пространство и время будут различны, а также будут различны и кинематические формы движения.

Из сказанного следует, что в теории относительности любые системы координат являются равноправными с точки зрения вида физических закономерностей, выраженных в этих системах, но они неравноправны с точки зрения их физических свойств — пространства, времени, а также кинематической формы движения, отнесённого к этим системам.

Но это означает, что равноправие систем координат в теории относительности не абсолютно, а относительно, в указанном выше смысле.

Легко видеть, что та равноправность систем координат, установление которой является достижением теории относительности, не имеет отношения к борьбе воззрений Птолемея и Коперника и не опирается её. В самом деле, когда во времена Коперника возник вопрос о предпочтении системы Солнца перед системой Земли, речь шла не об отыскании такой абсолютной системы, которая имела бы преимущества в определении вида законов движения, ибо в то время вообще не знали законов движения, и подобная проблема ещё не могла возникнуть. Более того, борясь против системы Птолемея, Коперник разрушал идею абсолютности. В самом деле, признание системы Птолемея с физической точки зрения означало не что иное, как признание наличия в мире единственной абсолютной

системы координат. Система Птолемея строилась на учении Аристотеля о том, что якобы существует центр Вселенной, что тяжесть есть стремление тел к этому центру, что в нём находится Земля, с которой именно поэтому Птолемей и связывал свою систему. Коперник отверг это учение и о тяжести, и о центре Вселенной, с находящейся в нём Землёй. Он считал, что тяжесть есть естественное стремление тел сливаться в единое и цельное, и допускал, что свой центр притяжения присущ и Солнцу, и Земле, и Луне, и другим небесным светилам. Нетрудно видеть, что все эти положения открывали дорогу прогрессивному учению о существовании не только солнечного, но и многих других миров. Коперник по отношению к воззрениям Птолемея, признававшего существование центра Вселенной, произвёл разрушительную работу принципиально того же порядка, какую Эйнштейн совершил по отношению к воззрениям классической физики, признававшей абсолютный, неподвижный эфир.

Однако, разрушая абсолютную систему Птолемея, Коперник всё же предпочитал утверждать, что не Солнце вращается вокруг Земли, а Земля вместе с другими планетами вращается вокруг Солнца, то-есть предпочитал систему Солнца системе Земли. Может быть, теперь, с высоты достижений науки XX века, можно сказать, что это было неизбежной наивностью молодой науки XVI века? Это вовсе не так. Учение Коперника не только не потускнело в свете истории, но и получило ещё большее обоснование.

Отметим прежде всего различие в методах решения естественно-научных вопросов у Птолемея и Коперника.

Если Птолемей, описывая движение планет и Солнца, принял как догму, что Земля неподвижна и находится в центре Вселенной, то Коперник приводил физические доводы в пользу того, что центром, вокруг которого вращаются планеты, и в числе их Земля, является Солнце. Он указывал, например, на то обстоятельство, что скорость движения отдельных планет, вычисленная в геоцентрической системе, оказывается неправдоподобно большой. Это соображение Коперника не беспочвенно. Современная физика сформулировала бы аналогичный довод своим

языком так: выбор системы отсчёта определяется требованием, чтобы поле тяготения, образованное материальным телом, с которым связывается система отсчёта, исчезало в бесконечности, иначе энергия тел, движущихся относительно тела отсчёта на большом расстоянии, будет бесконечно большой, что бессмысленно.

Другим доводом, которому Коперник придавал, пожалуй, большее значение, явилось то, что траектории всех планет, крайне сложные в геоцентрической системе, весьма просто выглядят в системе гелиоцентрической. Не следует этот довод Коперника, опирающийся на простоту кинематических форм движения, смешивать с простотой, которую эмпирическая философия выдвигает как критерий истины. Дальнейшая история развития астрономии показала, что простота формы планетных траекторий в солнечной системе оказывается не случайной, а имеет своё основание в происхождении планет от центрального тела — Солнца.

Гелиоцентрическая система Коперника явилась необходимой предпосылкой для последующего развития астрономии. Только после того, как было принято, что планеты вращаются не вокруг Земли, а вокруг Солнца по замкнутым кривым, и было найдено, что эти кривые являются эллипсами, Кеплер смог установить закон скоростей движения планет и общий для всех планет закон, выражающий связь периодов обращений планет по их траекториям со средним расстоянием планет от Солнца. Последний из этих законов связывал всю солнечную систему генетически в единое целое. В системе Птолемея установить эти законы было невозможно, ибо они справедливы лишь в системе Солнца. Известно, далее, что открытие законов Кеплера привело в дальнейшем к установлению закона всеобщего тяготения и ньютоновых законов движения. Открытие же закона тяготения, а также установление общей закономерности у траекторий всех планет в солнечной системе (тот факт, что траектории всех планет находятся почти в одной плоскости, что все планеты вращаются по ним в одну сторону, в ту же сторону вращаются планеты вокруг своей оси и т. п.) сыграли важную роль в развитии космогонических гипотез.

тез, согласно которым вся солнечная система произошла от когда-то единого центрального тела. Раскрыть все эти закономерности, которые не отрицаются теорией относительности, возможно было именно потому, что четыреста лет назад Коперник отказался от системы, связанной с Землёй, и перешёл к системе, связанной с Солнцем, то-есть с тем центральным телом, которое дало начало всей системе, а не с тем, которое само явилось исторически лишь случайным элементом её.

Современная наука действительно доказала, что в отношении вида физических закономерностей все системы отсчёта равноправны; однако это не исключает наличия такого аспекта исследования, в котором системы отсчёта нельзя считать равноправными. Коперник прав против Птолемея и в свете современной науки, как был прав четыреста лет назад. Если теория относительности установила, при каких условиях вид физических закономерностей остаётся неизменным, если она опровергла идеи физики XVIII—XIX столетий об абсолютном и неподвижном эфире, то она этим отнюдь не обесценила открытий Коперника. Воззрения Коперника и теория относительности являются звеньями одной и той же поступательной цепи развития познания человеком законов природы.

Для оценки борьбы воззрений Птолемея и Коперника весьма важным является также рассмотрение её исторической роли в развитии научного мышления. Борьба между воззрениями Коперника и Птолемея была борьбой научного мировоззрения против религиозного мракобесия. Иезуиты отлично приспособили догматические взгляды, согласно которым Земля находится в центре Вселенной, к потребностям своей религии, выводя из них доказательство божественного происхождения человека. Поэтому они опирались и на птолемею геоцентрическую систему мира, жестоко искореняя всякие попытки учёных мыслить не по церковным книгам, а самостоятельно. Разрушение авторитета птолемеевой геоцентрической системы мира явилось первым серьёзным шагом, высвобождающим науку от идеологического закабаления религией, шагом, раскрывшим перед наукой перспективу дальнейше-

го развития, смелым актом, изгнавшим из науки догмы и поставившим на их место исследование, наблюдение, логическое мышление. Эта борьба была полна больших драматических событий. Многие бесстрашные мужи науки, сторонники воззрений Коперника, шли на смерть и унижения, и, разумеется, делали это не ради упорства в бесплодных спорах, а во имя свободного от религиозных догм развития науки. Даже если бы современная наука признала, что гелиоцентрическая система не имеет никаких преимуществ перед геоцентрической, — чего она не сделала, — то и в этом случае невозможно было бы признать борьбу воззрений Птолемея и Коперника бессмысленной, ибо она вела науку к прогрессу.

Теория относительности играет в современной физике исключительно важную роль. Без учёта её выводов нельзя обойтись ни в каких, не только «абстрактно-теоретических», но и технических расчётах в тех случаях, когда мы имеем дело с огромными относительными скоростями рассматриваемых объектов, что в современной атомной физике является делом обычным. Физик, который желает подчеркнуть эту важную роль теории относительности, вовсе не нуждается в сомнительных аргументах, будто бы теория относительности ниспровергает все знания, добытые ранее человечеством.

* * *

В книге, посвящённой эволюции физических воззрений, невозможно было обойтись без философских выводов.

Мы уже указывали, что Эйнштейн и Инфельд на протяжении всей книги находят побудительные причины изменения физических понятий и теорий в том, что в развитии физики постоянно возникают объективные противоречия между существующими теориями и новыми экспериментами; они утверждают, что физики вынуждены менять теории и представления, если эксперимент обнаруживает их несоответствие с физической реальностью; тем самым они признают, что эти представления имеют объективный характер.

Но вот наши авторы оставляют сферу конкретной истории физики и начинают в заключительном параграфе, озаглавленном «Физика и реальность», философствовать по поводу того, что же представляет собой физическая реальность. Тут обнаруживается, что в области философских обобщений они целиком находятся в плену буржуазной идеалистической философии. Противоречая методу, который они проводили в книге, разбирая конкретную историю физики, Эйнштейн и Инфельд делают неожиданный вывод о том, что понятия суть свободные изобретения человеческого разума. Вся эволюция физики представляется авторам уже не как движение ко всё более правильному отображению природы, а как набор свободных изобретений. Многие из этих изобретений, — рассуждают авторы, — которые в своё время физики считали реальностью, такие, например, как эфир, уже перестали существовать. Новая физика создала новые реальности, но и они могут исчезнуть в будущем. Что же, в таком случае, представляет наука, каков предмет её познания? «Она является, — пишут авторы, — созданием человеческого разума, с его свободно изобретёнными идеями и понятиями. Физические теории стремятся образовать картину реальности и установить её связь с обширным миром чувственных восприятий». И далее: «С помощью физических теорий мы пытаемся найти себе путь сквозь лабиринт наблюждённых фактов, упорядочить и постичь мир наших чувственных восприятий» (стр. 261 и 263).

Здесь надлежит оговориться. Если выше было сказано, что идеалистический вывод Эйнштейна и Инфельда является неожиданным, то эту формулировку следует понимать лишь в том смысле, что вывод оказывается в противоречии с изложением в книге истории развития физических понятий. Что касается идеологии авторов, то шатание в сторону идеализма, по крайней мере одного из них — А. Эйнштейна — не ново. Аналогичные мысли высказывал он, например, ещё в 1921 году, в лекциях об основах теории относительности, читанных в Принстонском университете. Уже в то время он говорил, будто бы мир понятий «представляет в известном смысле свободное творение

человеческого духа», и что «понятия и системы понятий ценны для нас лишь постольку, поскольку они облегчают нам обозрение комплексов наших переживаний»¹⁾. Подобные же махистские идеи высказывал Эйнштейн и во многих других своих работах²⁾.

Итак, наука преследует цель упорядочения и постижения мира наших чувственных восприятий! Но в середине двадцатого века всем хорошо известно, что наука не замыкается в кругу чисто созерцательных размышлений по поводу мира чувственных восприятий; она служит практическим целям, создаёт новую технику, высвобождает атомную энергию, в огромных масштабах повышает развитие производительных сил. Весь мир является свидетелем того, как тузы американского капитала используют достижения науки в качестве орудия атомной дипломатии, направляют их на ещё большее закабаление трудящихся. Можно удивляться чудовищной наивности крупных учёных, объявляющих это целеустремлённое развитие и применение науки всего лишь... упорядочением мира наших чувственных восприятий, делающих вид, что физики, работавшие над созданием атомной бомбы, руководствовались этой жалкой субъективно-идеалистической философией. Можно было бы удивляться, поправляемся мы, если бы мы не знали, что за этой убогой философией стоит и её поддерживает сложная система морального и всякого иного подкупа и давления современного капиталистического строя.

Мы знаем, как живучи эти идеалистические взгляды в классовом обществе.

Известно, что они заимствованы ещё у епископа Беркли; исходя из них, небезызвестный господин Мах ещё полсотни лет тому назад пытался построить «философию современного естествознания». Последователь-

¹⁾ См. А. Эйнштейн. Основы теории относительности, Книгоиздательство «Сеятель», 1923, стр. 8.

²⁾ См., например, статью «Физика и реальность» (1936), опубликованную в журнале «Под знаменем марксизма», № 11—12, 1937 г. И в этой статье махистские выводы Эйнштейна находятся в противоречии со стихийно-материалистической трактовкой ряда физических проблем.

ной философии, конечно, не получилось и не могло получиться. Но философы этого толка пытались навязать физике конкретные физические представления, вытекающие из их философии. Например, они отрицали существование атомов на том основании, что атомы непосредственно не воспринимаются органами чувств.

Это суждение было очень быстро опровергнуто ходом развития физики: существование атомов в природе было установлено, разумеется, сложными опосредованными путями, но с абсолютной достоверностью, настолько убедительной, что некоторые зарубежные физики, и сейчас ещё склоняющиеся к махизму, настойчиво работают над использованием атомной энергии.

Крайне наивны рассуждения Эйнштейна и Инфельда о процессе познания, который они представляют в виде двух последовательных стадий: сначала исследователи собирают факты, затем отыскивают их связи посредством чистого мышления. Эволюция физических идей, изложенная в книге ими самими, показывает, как эксперимент, научная практика всё время поправляют и направляют теоретическую мысль, откуда следует, что процесс познания не так прост, как думают авторы.

Столь же беспомощны философские суждения Эйнштейна и Инфельда о физических процессах и необычных свойствах микромира. Известно, например, что понятие траектории оказывается неприменимым к микрообъектам. Из этого факта Эйнштейн и Инфельд необоснованно заключают, будто «мы должны отказаться от описания атомных явлений в пространстве и времени» (стр. 264). Но разве не ясно, что особенности микрообъектов, сказывающиеся в том, что к ним невозможно применить понятие траектории в механическом смысле, отнюдь не исключают того обстоятельства, что их движение происходит в пространстве и времени? Известно, что изменение состояний микрообъекта определяется статистическими закономерностями. Эйнштейн и Инфельд на этом основании делают вывод будто в квантовой

физике «описываются не свойства, а вероятности» (стр. 264). Но разве физику, материалистически толкующему объект познания, не ясно, что статистические закономерности отражают свойства тех объектов, к которым эти закономерности применимы? Разве не объективные свойства микрообъектов вынуждают физиков применять в одних случаях статистику Бозе-Эйнштейна, а в других — статистику Ферми-Дирака? Разумеется, эти свойства микрочастиц не наглядны, и мы не можем познать их с помощью наших чувств *непосредственно*; мы познаём их весьма сложными, опосредованными путями, в частности, проверяя на опытах применимость тех или иных статистических закономерностей; но разве оправдание применимости математического аппарата состоит не в том, что он служит познанию объективных свойств микромира?

Итак, книга показывает, что философские взгляды Эйнштейна и Инфельда эклектичны; они колеблются между идеализмом и стихийным материализмом. Они споткнулись на том же старом вопросе, который послужил камнем преткновения для многих физиков ещё в начале двадцатого столетия, когда назрел кризис физики, а именно: имеют ли наши понятия и теории, постоянно претерпевающие изменения и сменяющиеся новыми, какую-либо объективную ценность?

Развитие физики не останавливается от того, что часть физиков, и даже очень крупных, исповедует махизм. Однако отрицание объективности предметов нашего познания и объективности его основных категорий, неверная оценка самого процесса познания, задерживают осмысливание теоретических проблем, возникающих в ходе развития современного естествознания, дезориентируют естествоиспытателей в тот момент, когда они мучительно ищут путей разрешения противоречий между новыми результатами экспериментов и старыми теориями. В этом и состоит вред идеализма для развития естествознания. Таким образом, исповедание идеалистической философии естествоиспытателем является его, может быть и неосознанной, изменой своему профессиональному делу, делу развития естество-

знания. Эта философия неизбежно вступает в противоречие с методом и практикой работы естествоиспытателей, как это можно обнаружить и в предлагаемой книге.

Перевод книги выполнен около семи лет тому назад с издания, вышедшего в свет в 1938 году. Война помешала выпуску перевода в свет. За это время Эйштейн и Инфельд переиздали книгу в Нью-Йорке без всяких изменений.

ПРЕДИСЛОВИЕ

Прежде чем вы начинаете чтение, вы вправе ожидать ответа на некоторые простые вопросы. С какой целью написана эта книга? Кто тот воображаемый читатель, для которого она предназначена?

Трудно начать с ясного и последовательного ответа на эти вопросы. Гораздо легче ответить на них в конце книги, хотя это было бы совершенно лишним. Мы находим, что проще сказать, чем эта книга не стремится быть. Мы не писали учебника по физике. Здесь нет систематического изложения элементарных физических фактов и теорий. Скорее наше стремление состояло в том, чтобы широкими линиями обрисовать попытки человеческого разума найти связь между миром идей и миром явлений. Мы стремились показать те активные силы, которые вынуждают науку создавать идеи, соответствующие реальности нашего мира. Но наше изложение должно быть простым. Сквозь лабиринт фактов и понятий мы должны были избрать столбовой путь, который казался нам самым характерным и значительным. Те факты и теории, которые не лежали на избранном пути, мы должны были опустить. Наша основная цель вынуждала нас сделать определённый выбор фактов и идей. О важности проблемы не следует судить по числу страниц, посвящённых ей. Некоторые существенные направления мысли не отражены не потому, что они казались нам несущественными, а потому, что они не лежат на том пути, который мы избрали.

Когда мы писали книгу, мы вели длинные дискуссии о характере нашего идеализированного читателя и сильно беспокоились о нём. Мы восполняли полное

отсутствие у него каких-либо конкретных сведений по физике и математике большим числом достоинств. Мы считали его заинтересованным в физических и философских идеях и были вынуждены восхищаться тем терпением, с каким он пробивался через менее интересные и более трудные страницы. Он ясно сознавал, что для того, чтобы понять какую-либо страницу, он должен был внимательно прочитать предыдущие. Он знал, что научная, хотя бы и популярная, книга не может читаться так же, как новелла.

Книга — это беседа между вами и нами. Вы можете найти её скучной или интересной, утомительной или возбуждающей, но наша цель будет достигнута, если эти страницы дадут некоторое представление о вечной борьбе изобретательного человеческого разума за более полное понимание законов, управляющих физическими явлениями.

А. Эйнштейн

Л. Инфельд

1. ПОДЪЁМ МЕХАНИСТИЧЕСКОГО ВОЗЗРЕНИЯ

Великая повесть о тайнах природы. — Первая руководящая идея. — Векторы. — Загадка движения. — Ещё одна руководящая идея. — Является ли теплота субстанцией? — Увеселительная горка. — Мера превращения. — Философские воззрения. — Кинетическая теория материи.

Великая повесть о тайнах природы

В нашем воображении рисуется книга. Это искусно написанная повесть о событиях, обстоятельства которых скрыты от нас под покровом загадочных тайн. Повесть эта даёт нам все существенные нити и заставляет нас создать свою собственную теорию происходящего. Если мы внимательно следуем замыслу повести, мы приходим к полному раскрытию всех обстоятельств ещё раньше, чем автор раскрывает их в конце книги. Само это раскрытие, если речь идёт не о плохой повести, не разочаровывает нас: более того, оно появляется в тот самый момент, когда мы его ждём.

Можем ли мы уподобить читателя такой книги учёным, которые через все следующие друг за другом поколения продолжают добиваться раскрытия тайн в книге природы? Сравнение неверно и его нужно впоследствии отбросить, но оно имеет некоторое оправдание; его следует расширить и видоизменить, чтобы сделать более соответствующим попыткам науки разгадать тайну Вселенной.

Эта великая повесть о тайнах ещё не окончена. Мы даже не можем быть уверены в том, что она имеет окончательное завершение. Но уже прочитанное дало нам много. Оно научило нас основам языка природы. Оно

позволило нам понять многие пути её развития и было источником радости и духовного подъёма в периоды усиленного продвижения науки. Но мы ясно представляем себе, что, несмотря на все прочитанные и разобранные тома, мы ещё далеки от её конца, если, конечно, такой конец вообще существует. В каждой стадии мы стремимся найти объяснение, находящееся в согласии с уже открытыми идеями. Теории, принятые в качестве пробных, объяснили много фактов, но никакого общего решения, совместимого со всем тем, что нам известно, ещё пока не достигнуто. Очень часто совершенная на вид теория при дальнейшем чтении оказывалась неверной. Оказывалось, что новые факты противоречили теории или же не объяснялись ею. Чем больше мы читали, тем более полно и высоко оценивали совершенную конструкцию книги, хотя полная разгадка её кажется всё удаляющейся по мере того, как мы продвигаемся вперёд.

Со времени великолепных рассказов Конан-Дойля почти в каждой детективной новелле наступает такой момент, когда исследователь собрал все факты, в которых он нуждается, по крайней мере, для некоторой фазы своей проблемы. Эти факты часто кажутся совершенно странными, непоследовательными и в целом не связанными. Однако великий детектив заключает, что в данный момент он не нуждается ни в каких дальнейших розысках и что только чистое мышление приведёт его к установлению связи между собранными фактами. Он играет на скрипке, или, развалившись в кресле, наслаждается трубкой, как вдруг, о Юпитер, эта связь найдена! Он не только уже имеет в руках объяснение всех обстоятельств дела, но он знает, какие другие определённые события должны были случиться. Так как теперь он совершенно точно знает, где искать их, он может, если ему хочется, идти собирать дальнейшие подтверждения своей теории.

Учёный, читая книгу природы, если нам позволено будет повторить банальную фразу, должен найти разгадку для себя, но он не может, как это часто делает нетерпеливый читатель, обратиться к концу книги.

В нашем случае читатель — это тоже исследователь, который ищет, как объяснить, хотя бы отчасти, связь событий между собой. Чтобы получить даже частичное решение этой задачи, учёный должен собирать беспорядочные необходимые факты и своим творческим мышлением сделать их связанными и понятными. Наша цель — в последующих страницах описать в общих чертах, какова работа физиков, соответствующая чистому мышлению детектива. Мы будем, главным образом, касаться роли мыслей и идей в смелых исследованиях, имеющих целью познание физического мира.

Первая руководящая идея

Попытки прочитать великую повесть о тайнах природы так же стары, как и само человеческое мышление. Однако лишь немногим более трёх столетий назад учёные начали понимать язык повести. С этого времени, то-есть со времени Галилея и Ньютона, чтение продвигалось быстро. Развилась техника исследования, систематические методы отыскания и изучения руководящих идей. Были разрешены некоторые загадки природы, хотя многие решения в свете дальнейших исследований оказались временными и поверхностными.

Самая фундаментальная проблема, остававшаяся в течение тысячи лет неразрешённой из-за её сложности, — это проблема движения. Все движения, которые мы встречаем в природе, — движение камня, брошенного в воздух, движение плывущего корабля, движение повозки, тянущейся вдоль улицы, — в действительности очень сложны. Чтобы понять все эти явления, лучше всего начать с наиболее простых возможных случаев и постепенно продвигаться к более сложным. Рассмотрим тело, находящееся в покое. Чтобы изменить положение такого тела, необходимо оказать некоторое воздействие на него, толкнуть или поднять, или заставить действовать на него другие тела, например лошадь или паровую машину. Наша интуиция связывает движение с такими действиями, как толчок или тяга. Повторение

опыта заставило бы нас отважиться на дальнейшее утверждение, что если мы хотим, чтобы тело двигалось быстрее, мы должны толкать его сильнее. Кажется естественным заключение, что чем сильнее действие, оказываемое на тело, тем больше будет его скорость. Карета, запряжённая четвёркой лошадей, движется быстрее, чем карета, запряжённая парой. Таким образом, интуиция говорит нам, что скорость существенно связана с внешним воздействием.

Для читателей детективных выдумок привычно, что фальшивая нить запутывает повесть и отдаляет её разрешение. Метод рассуждения, навязываемый интуицией, неверен и приводит к ложным идеям о движении, которые сохранялись в течение столетий. Может быть, главным основанием продолжительной веры в эту интуитивную идею повсюду в Европе был великий авторитет Аристотеля. В *«Механике»*, в продолжение двух тысяч лет приписываемой ему, мы читаем:

«Движущееся тело останавливается, если сила, его толкающая, прекращает своё действие».

Открытие, сделанное Галилеем, и применение им методов научного рассуждения были одним из самых важных достижений в истории человеческой мысли, и оно отмечает действительное начало физики. Это открытие учит нас тому, что интуитивным выводам, базирующимся на непосредственном наблюдении, не всегда можно доверять, так как они иногда ведут по ложному следу.

Но где интуиция ведёт к ошибкам? Правильно ли сказать, что карета, запряжённая четвёркой лошадей, должна двигаться быстрее, чем запряжённая только двумя?

Проверим ближе основные факты движения, начиная с простых повседневных опытов, хорошо известных человечеству с начала цивилизации и полученных в жестокой борьбе за существование.

Предположим, что некто, идущий по ровной дороге с багажной тележкой, внезапно перестаёт толкать тележку. Тележка будет двигаться ещё некоторое время, пройдя небольшое расстояние, а затем остановится. Мы

спрашиваем: как можно увеличить это расстояние? Для этого имеются различные способы, например смазывание колёс или устройство более гладкой дороги. Чем легче вертятся колёса и чем ровнее дорога, тем дальше будет двигаться тележка. А что же даёт смазывание колёс или сглаживание неровностей пути? Только одно: становится меньше внешнее влияние. Уменьшается эффект, называемый трением как в колёсах, так и между колёсами и дорогой. Это уже теоретическое толкование наблюдаемых данных, толкование, которое пока ещё произвольно. Незначительный шаг дальше, и мы попадём на правильный след. Представим себе совершенно гладкий путь и колёса, вовсе не имеющие трения. Тогда ничто не остановит тележки и она будет катиться вечно. Этот вывод достигнут только размышлением об идеализированном эксперименте, который никогда не может быть осуществлён, так как невозможно исключить все внешние влияния. Идеализированный эксперимент указывает путь, на котором фактически были установлены основы механики движения.

Сравнивая оба метода подхода к проблеме, мы можем сказать, что интуитивная идея такова: чем больше воздействие, тем больше скорость. Таким образом, наличие скорости показывает, действуют ли на тело внешние силы. Новый же путь, указанный Галилеем, таков: если ничто не толкает и не тянет тело или если на тело ничто не действует каким-либо другим образом, короче говоря, если на тело не действуют никакие силы, оно покоится или движется прямолинейно и равномерно, то есть всегда с одинаковой скоростью по прямой. Следовательно, скорость сама по себе не показывает, действуют ли на тело внешние силы или нет. Правильный вывод Галилея был сформулирован спустя поколение Ньютоном в виде *закона инерции*. Этот закон — обычно первое из физики, что мы выучиваем в школе наизусть, и многие из нас могут его вспомнить.

Всякое тело сохраняет состояние покоя или равномерного прямолинейного движения, если только оно не вынуждено изменять его под влиянием действующих сил.

Мы видели, что закон инерции нельзя вывести непосредственно из эксперимента, его можно вывести лишь умозрительно — мышлением, связанным с наблюдением. Идеализированный эксперимент никогда нельзя выполнить в действительности, хотя он ведёт к глубокому пониманию действительных экспериментов.

Из многообразия сложных движений в окружающем нас мире мы выбираем в качестве первого примера прямолинейное и равномерное движение. Это движение — простейшее, ибо при этом на движущееся тело не действуют никакие внешние силы. Однако прямолинейное и равномерное движение никогда нельзя реализовать; камень, брошенный с башни, или тележка, толкаемая вдоль дороги, никогда не могут двигаться абсолютно прямолинейно и равномерно, потому что мы не можем полностью исключить влияния внешних сил.

В хорошей повести о загадочных тайнах самые очевидные нити часто ведут к ложным подозрениям. В наших попытках понять законы природы мы подобным же образом находим, что самое очевидное интуитивное объяснение зачастую бывает ложным.

Человеческое мышление творит вечно изменяющуюся картину вселенной. Вклад Галилея в науку состоял в разрушении интуитивного воззрения и в замене его новым. В этом — значение открытия Галилея.

Но немедленно же возникают дальнейшие вопросы о движении. Если не скорость является показателем силы, действующей на тело, то что же тогда? Ответ на этот фундаментальный вопрос был найден Галилеем, а вернее Ньютоном; он образует новую руководящую идею в наших исследованиях.

Чтобы найти правильный ответ, мы должны немного глубже вдуматься в опыт с тележкой на абсолютно гладкой дороге. Прямолинейность и равномерность движения в нашем идеализированном опыте были обязаны отсутствию внешних сил. Теперь представим себе, что прямолинейно и равномерно движущаяся тележка получает толчок в направлении движения. Что произойдёт при этом? Очевидно, её скорость увеличится. Так же очевидно, что толчок в направлении, противоположном направлению

движения, должен уменьшить скорость. В первом случае движение тележки ускоряется толчком, во втором — замедляется. Вывод вытекает сразу же: действие внешней силы изменяет скорость. Таким образом, не сама скорость, а её изменение есть следствие толчка или тяги. Сила либо увеличивает, либо уменьшает скорость, соответственно тому, действует ли она в направлении движения или в противоположном направлении. Галилей видел это ясно и написал в своём труде *«Беседы о двух новых науках»*:

«... скорость, однажды сообщённая движущемуся телу, будет строго сохраняться, поскольку устранены внешние причины ускорения или замедления, — условие, которое обнаруживается только на горизонтальной плоскости, ибо в случае движения по наклонной плоскости вниз уже существует причина ускорения, в то время как при движении по наклонной плоскости вверх налицо замедление; из этого следует, что движение по горизонтальной плоскости вечно, ибо, если скорость будет постоянной, движение не может быть уменьшено или ослаблено, а тем более уничтожено».

Идя по этому верному пути, мы достигаем более глубокого понимания проблемы движения. Основой классической механики, как она сформулирована Ньютоном, является связь между силой и изменением скорости, а не между силой и самой скоростью, как мы думали, согласно интуиции.

Мы использовали два понятия, играющих принципиальную роль в классической механике: силу и изменение скорости. В дальнейшем развитии науки оба эти понятия расширяются и обобщаются. Поэтому они должны быть исследованы подробнее.

Что такое сила? Интуитивно мы чувствуем, что именно обозначается этим термином. Это понятие возникает из усилия, которое мы производим при толчке, броске или тяге, из того мускульного ощущения, которое сопровождает все эти действия. Но обобщение этих понятий выходит далеко за пределы столь простых примеров. Мы можем думать о силе, даже не воображая себе лошадь, тянущую повозку. Мы говорим о силе притяжения между Солнцем и Землёй, Землёй и Луной, и о таких силах, которые вызывают приливы и отливы. Мы говорим о силе,

с которой Земля воздействует на все предметы вокруг нас, удерживая их в сфере своего влияния, и о силе ветра, производящей морские волны и приводящей в движение листья деревьев. Когда и где мы наблюдаем изменение скорости, тогда и там причиной этому является внешняя сила в самом общем смысле. Ньютон писал в своих *«Принципах»*:

«Воздействующая сила есть действие, оказываемое на тело, чтобы изменить его состояние покоя или равномерного прямолинейного движения.

Эта сила проявляется только в действии, она не сохраняется в теле, когда действие прекращается, ибо тело сохраняет всякое новое состояние, которое оно приобретает, исключительно благодаря его инерции. Воздействующие силы имеют различное происхождение: таковы силы удара, давления и центростремительные».

Если камень падает с вершины башни, его движение неравномерно: его скорость возрастает с падением. Мы заключаем, что в направлении движения действует внешняя сила или, другими словами, что Земля притягивает камень. Возьмём другой пример. Что происходит, когда камень брошен прямо вверх? Скорость уменьшается до тех пор, пока камень не достигнет наивысшей точки, после чего он начинает падать на Землю. Это уменьшение скорости вызывается той же силой, что и ускорение падающего тела. В одном случае сила действует в направлении движения, в другом случае — в противоположном направлении. Сила одна и та же, но она вызывает или возрастание скорости или замедление, соответственно тому, падает ли камень или он брошен вверх.

Векторы

Все движения, которые мы только что рассматривали, — *прямолинейные*, то-есть являются движениями по прямой линии. Теперь мы должны сделать дальнейший шаг. Мы приходим к пониманию законов природы, анализируя простейшие случаи и опуская в своих первых попытках все усложнения. Прямая линия проще, чем кривая. Однако рассмотрением только прямолинейного движения удовлетвориться невозможно. Движения Луны, Земли и планет — как раз те движения, к которым принципы ме-

ханики применялись с таким блестящим успехом, — это все движения по кривым путям. Переход от прямолинейного движения к криволинейному приносит новые трудности. Мы должны иметь смелость побороть их, если мы хотим понять принципы классической механики, давшей нам первую руководящую идею и создавшей тем самым исходную точку для развития науки.

Рассмотрим другой идеализированный эксперимент, в котором совершенно гладкий шар катится по гладкому столу. Мы знаем, что если шару дан толчок, то-есть если приложена внешняя сила, то его скорость изменится. Предположим теперь, что направление удара не совпадает с линией движения, как это имело место в примере с тележкой. Пусть удар направлен иначе, скажем, перпендикулярно к этой линии. Что происходит с шаром? Можно различать три стадии движения: начальное движение, действие силы и конечное движение, после того как сила перестаёт действовать. Согласно закону инерции скорость как перед действием силы, так и после него, абсолютно постоянна. Но имеется различие между равномерным движением до и после действия силы: изменилось направление. Направление начального движения шара и направление действия силы перпендикулярны друг к другу. Конечное движение будет совершаться не по какой-либо одной из этих линий, а где-то между ними, ближе к направлению силы, если толчок силен, а начальная скорость мала и ближе к первоначальной линии движения, если толчок незначителен, а начальная скорость велика. Наш новый вывод, основанный на законе инерции, таков: действие внешней силы изменяет не только скорость, но и направление движения. Понимание этого факта подготавливает нас к обобщению, введённому в физику понятием *вектора*.

Мы можем продолжать применение нашего непосредственного метода рассуждения. Исходная идея — это опять галилеев закон инерции. Мы ещё далеко не исчерпали следствий этой ценной руководящей идеи в решении загадки движения.

Рассмотрим два шара, движущихся в разных направлениях по гладкому столу. Для большей определённости

предположим, что оба направления перпендикулярны друг к другу. Так как никаких внешних сил нет, то движения шаров абсолютно равномерны. Предположим далее, что численно скорости их равны, то-есть оба шара за один и тот же промежуток времени покрывают одинаковое расстояние. Но правильно ли сказать, что оба шара имеют одинаковую скорость? Ответ может быть: либо да, либо нет! Если спидометры двух автомашин показывают сорок километров в час, то обычно говорят, что они имеют одинаковую скорость независимо от того, в каком направлении они движутся. Но наука для своих нужд должна создавать свой собственный язык, свои собственные понятия. Научные понятия часто начинаются с понятий, употребляемых в обычном языке повседневной жизни, но они развиваются совершенно иначе. Они преобразовываются и теряют двусмысленность, связанную с обычным языком, они приобретают строгость, что и позволяет применять их в научном мышлении.

С физической точки зрения гораздо выгоднее сказать, что скорости двух шаров, движущихся в различных направлениях, различны. Хотя это—дело чистого соглашения, но гораздо удобнее сказать, что четыре автомашины, едущие из одного и того же пункта по различным дорогам, имеют не одну и ту же скорость, даже если численно скорости, зарегистрированные на их спидометрах, все равны сорока километрам в час. Это различие между скоростью, взятой по абсолютной величине и скоростью, в которой учитывается направление, иллюстрирует, как физика, отправляясь от понятия, употребляемого в повседневной жизни, изменяет его таким путём, который оказывается плодотворным в дальнейшем развитии науки.

Если длина измерена, то результат выражается некоторым числом единиц. Длина отрезка может быть равна 3 м 7 см; вес некоторого объекта 2 кг 3 г; измеренный промежуток времени равен столько-то минутам или секундам. В каждом таком случае результат измерения выражается числом. Однако одно только число недостаточно для описания некоторых физических понятий. Признание этого факта отмечает значительный успех в научном исследовании. Направление, так же как и число, существенно,

например, для характеристики скорости. Такая величина, обладающая и числовым значением и направлением, называется *вектором*. Обычный символ для него—это стрелка. Скорость может быть представлена стрелкой или, короче говоря, вектором, длина которого в некоторой избранной шкале единиц выражает численное значение скорости, а направление которого есть направление движения.

Если четыре автомашины расходятся с численно одинаковой скоростью из одного пункта, то их скорости могут быть представлены четырьмя векторами одинаковой длины, как это видно на рисунке 1. В избранной шкале один сантиметр пред-

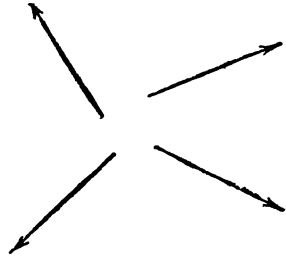


Рис. 1.

ставляет шестнадцать километров в час. Таким путём любая скорость может быть обозначена вектором и, наоборот, если известна шкала, то из такой векторной диаграммы может быть установлена скорость.

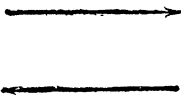


Рис. 2.

Если две автомашины проходят по дороге мимо друг друга и их спидометры показывают сорок километров в час, то мы характеризуем их скорости двумя различными векторами со стрелками, заострёнными в противоположных направлениях (рис. 2.) Точно так же и стрелки, указывающие направление «в город» и «из города» в ньюйоркском метро, должны быть заострены в противоположных направлениях. Но все поезда, идущие в город, с численно равной скоростью, имеют одинаковую скорость и по направлению, которая может быть представлена одним и тем же вектором. Однако вектор ничего не говорит о том, какую станцию поезд проходит или по какому из многих параллельных путей он идёт. Другими словами, согласно выбранному условию все такие векторы, какие нарисованы ниже, можно считать равными: они лежат либо вдоль одной и той же линии, либо вдоль ей параллельных и имеют стрелки,

заострённые в том же самом направлении (рис. 3). Следующий рисунок показывает различные векторы, ибо они отличаются либо по длине, либо по направлению, либо по тому и другому вместе. Те же самые четыре вектора

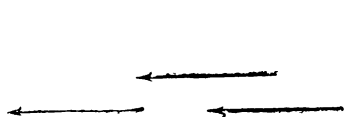


Рис. 3.

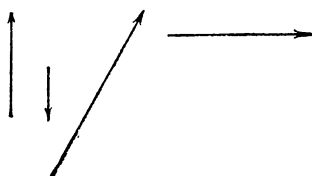


Рис. 4.

можно нарисовать другим путём, так, чтобы все они расходились из одной точки (рис. 5). Так как исходная точка несущественна, то эти векторы могут представлять скорости четырёх автомашин, движущихся из одного пункта, либо же скорости четырёх автомашин в различных частях страны, путешествующих с указанными скоростями в указанных направлениях.

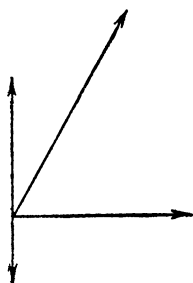


Рис. 5.

Это векторное представление можно применить к описанию обсуждавшихся ранее фактов прямолинейного движения. Мы говорили о тележке, движу-

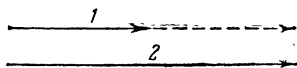


Рис. 6.

щейся равномерно по прямой и получающей толчок в направлении её движения, который увеличивает её скорость. Графически это можно представить двумя векторами: коротким, обозначающим скорость до толчка, и длинным, имеющим то же направление и обозначающим скорость после толчка (рис. 6). Значение пунктирного вектора ясно. Он представляет собой изменение скорости, вызванное толчком. В случае, когда сила направлена против движения

и движение замедляется, диаграмма выглядит иначе. Пунктирный вектор опять соответствует изменению скорости, но в этом случае его направление иное. Ясно, что не только сами скорости, но и их изменения — тоже векторы. Но всякое изменение скорости вызвано внешней силой; следовательно, и сила должна быть представлена тоже вектором. Для того чтобы характеризовать силу, недостаточно установить, с каким усилием мы толкаем тележку; мы должны также сказать, в каком направлении мы толкаем. Сила, как и скорость и её изменение, должна быть представлена вектором, а не только одним числом. Поэтому внешняя сила — это тоже вектор, кото-

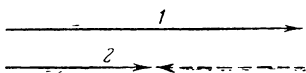


Рис. 7.

рый должен иметь то же направление, что и изменение скорости. На обоих рисунках пунктирные векторы показывают как направление силы, так и изменение скорости.

Здесь скептик может заметить, что он не видит никакого преимущества от введения векторов. Всё, что было сделано, — это перевод признанных ранее фактов на необычный и сложный язык. В этой стадии, в самом деле, было бы трудно убедить скептика, что он неправ. Пока он, действительно, прав. Но мы увидим, что именно этот странный язык приводит к важным обобщениям, в которых векторы оказываются существенными.

Загадка движения

До тех пор, пока мы имеем дело с прямолинейным движением, мы далеки от понимания движений, наблюдаемых в природе. Мы должны рассмотреть криволинейные движения. Наш следующий шаг — определить законы, управляющие такими движениями. Это нелёгкая задача. В случае прямолинейного движения понятия скорости, изменения скорости и силы оказываются чрезвычайно полезными. Но мы не видим непосредственно, как можно применить их к криволинейному движению. В самом деле, можно представить себе, что старые понятия окажутся непригодными для описания движения в общем

случае и что нужно создать новые понятия. Следует ли нам пробовать идти старыми путями, или нужно искать новые?

Обобщение понятий — процесс, часто применяемый в науке. Метод обобщения определён неоднозначно, ибо обычно существует множество путей его осуществления. Однако, при всяком обобщении должно быть строго удовлетворено одно требование: любое обобщённое понятие должно сводиться к первоначальному, когда выполнены первоначальные условия.

Лучше всего это можно объяснить на примере, с которым мы имеем дело теперь. Мы можем попробовать обобщить прежние понятия скорости, изменения скорости и силы для случая движения вдоль кривой. Когда мы говорим о кривой, мы включаем в это понятие и прямую. Прямая есть особый тривиальный пример кривой. Поэтому, если скорость, изменение скорости и сила введены для движения по кривой, то они тем самым автоматически вводятся и для движения по прямой. Но этот результат не должен противоречить результатам, полученным раньше. Если кривая становится прямой, то все обобщённые понятия должны свестись к обычным понятиям, описывающим прямолинейное движение. Но это ограничение недостаточно, чтобы однозначно определить обобщение. Оно явно оставляет многие возможности. История науки показывает, что самые простые обобщения иногда оказываются удачными, а иногда нет. Мы должны сперва делать догадки. В нашем случае нетрудно найти правильный метод обобщения. Новые обобщённые понятия оказываются очень удачными и помогают нам понять как движение брошенного камня, так и движение планет.

Что же означают слова «скорость», «изменение скорости» и «сила» в общем случае криволинейного движения? Начнём со скорости. Пусть вдоль кривой слева направо движется очень маленькое тело. Такое маленькое тело часто называют *частицей*. Точка на кривой на нашем рисунке показывает положение частицы в некоторый момент времени. Какова скорость, соответствующая этому моменту времени и положению? Опять руководящая идея Галилея наводит нас на тот путь, каким введена скорость.

Мы должны ещё раз использовать своё воображение и представить себе идеализированный эксперимент. Частица движется вдоль кривой слева направо под влиянием внешних сил. Представим себе, что в данный момент времени в точке, отмеченной на рисунке, все эти силы вне-



Рис. 8.

запно перестают действовать. Тогда согласно закону инерции движение должно быть равномерным и прямолинейным. Практически мы, конечно, никогда не можем освободить тело от всех внешних влияний. Мы можем только сделать предположение: «что должно произойти, если... » и судить об уместности нашего предположения



Рис. 9.

с помощью заключений, которые можно из него сделать, и проверки согласия этих заключений с экспериментом.

Вектор на следующем рисунке указывает предполагаемое направление равномерного движения, если все внешние силы исчезли. Это так называемое тангенциальное или касательное направление. Если смотреть на движущуюся частицу через микроскоп, то можно увидеть очень небольшую часть её пути, представляющуюся в виде небольшого, едва искривлённого отрезка. Касательная линия является его продолжением. Нарисованный таким образом вектор представляет скорость в данный момент. Вектор скорости лежит на касательной линии. Его длина представляет собой численную величину скорости или ту

скорость, которая указывается, например, спидометром автомашин.

Наш идеализированный эксперимент, в котором уничтожены силы для того, чтобы найти вектор скорости, нельзя принимать слишком серьезно. Он только помогает нам понять, что мы должны называть вектором скорости при криволинейном движении, и позволяет нам определить его для данного момента в данной точке.

На рисунке 10 показаны векторы скорости для трёх различных положений частицы, движущейся вдоль

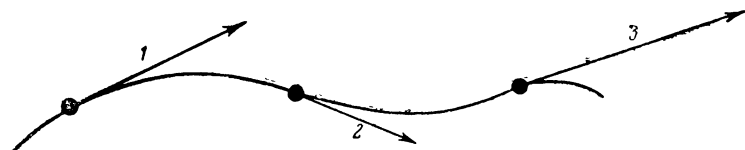


Рис. 10.

кривой. В этом случае во время движения меняются не только направления, но и величины скорости, как показывает длина векторов.

Удовлетворяет ли это новое понятие скорости требованию, сформулированному для всех обобщений? Иначе говоря, сводится ли оно к прежнему понятию скорости, если кривая становится прямой? Очевидно, да. Касательная к прямой есть сама прямая. Вектор скорости лежит на линии движения, так же как это было в случае движущейся тележки или катящегося шара.

Следующий шаг — это введение изменения скорости частицы, движущейся вдоль кривой. Оно может быть дано различными путями, из которых мы выберем самый простой и удобный. Последний рисунок показывал несколько векторов скоростей, представляющих движение вдоль кривой в разных точках. Первые два из них можно опять нарисовать так, чтобы они имели общую исходную точку (рис. 11), что возможно проделывать с векторами. Пунктирный вектор мы называем изменением скорости. Его начальная точка представляет собой конец первого вектора, а конечная точка — конец второго вектора. Этим

и определено изменение скорости. Такое определение может на первый взгляд показаться искусственным и бессмысленным. Оно становится гораздо яснее в особом случае, в котором векторы 1 и 2 имеют одинаковое направление (рис. 12). Конечно, это означает переход к случаю прямолинейного движения. Если оба вектора имеют одну и ту же начальную точку, то пунктирный вектор опять связывает их конечные точки. Рисунок 12 совпадает с рисунком на стр. 38, а прежнее понятие оказывается частным случаем нового понятия. Следует заме-

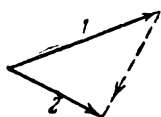


Рис. 11.

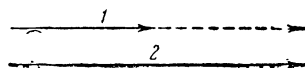
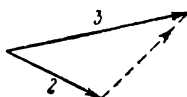


Рис. 12.

тить, что мы должны были разделить обе линии на рисунке, ибо иначе они совпали бы и стали неразличимы.

Теперь мы должны сделать последний шаг в процессе обобщения. Это будет самой важной из всех догадок, которые мы сделали до сих пор. Связь между силой и изменением скорости должна быть установлена так, чтобы мы могли найти руководящую идею, позволяющую нам понять общие проблемы движения.

Руководящая идея для объяснения движения вдоль прямой была весьма простой: внешняя сила вызывает изменение скорости; вектор силы имеет то же направление, что и изменение скорости. Но что теперь следует рассматривать в качестве руководящей идеи для криволинейного движения? Совершенно то же самое! Единственное различие в том, что изменение скорости имеет теперь более общее значение, чем раньше. Мимолётный взгляд на пунктирные векторы на двух последних рисунках показывает это очень ясно. Если скорость известна для всех точек кривой, то направление силы в любой точке может быть найдено сразу же. Нужно нарисовать векторы скорости для двух моментов, отделённых очень короткими интервалами времени, а стало-быть, соответствующих положениям, очень близким друг к другу. Вектор, проведённый

из конца первого вектора к концу второго, показывает направление действующей силы. Но существенно, что оба вектора скорости должны быть отделены лишь «очень коротким» интервалом времени. Строгий анализ таких слов, как «очень близкий», «очень короткий», далеко не прост. Именно этот анализ привёл Ньютона и Лейбница к открытию дифференциального исчисления.

Путь, который привёл к обобщению руководящей идеи Галилея, длинен и извилист. Мы не можем показать здесь, какими изобильными и плодотворными оказались последствия этого обобщения. Его применение приводит к

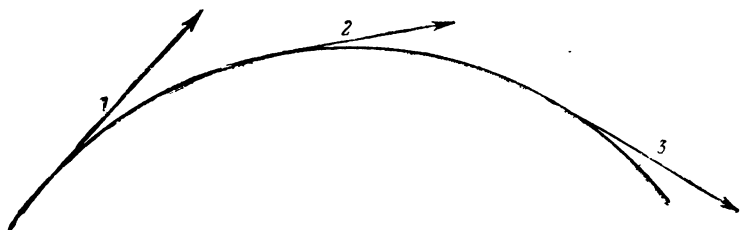


Рис. 13.

простому и удобному объяснению многих фактов, до того времени несогласованных и непонятных.

Из всего разнообразия движений мы возьмём лишь самое простое и применим к его объяснению только что сформулированные законы.

Пуля, выпущенная из ружья, камень, брошенный под углом к горизонту, струя воды, выходящая из трубы, — все они описывают хорошо известную траекторию одного и того же типа — параболу. Вообразим себе, например, что к камню присоединён спидометр, так что вектор скорости камня может быть определён для любого момента. Результат представлен на рисунке 13. Направление действующей на камень силы совершенно такое же, как и направление изменения скорости; мы уже видели, как его можно определить. Следующий рисунок показывает, что сила вертикальна и направлена вниз. Совершенно то же самое мы видим, рассматривая движение камня, брошенного с вершины башни. Пути, а

также и скорости, совершенно различны, но изменения скоростей имеют одинаковое направление — к центру Земли.

Камень, привязанный к верёвке и вращающийся в го-

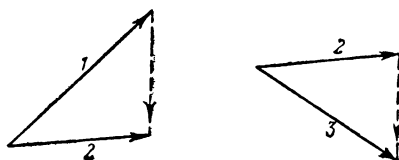


Рис. 14.

ризонтальной плоскости, движется по окружности. Все векторы на диаграмме, представляющей это движение, имеют одинаковую длину, если величина скорости постоянна (рис. 15). Тем не менее вектор скорости непрерывно меняется, так как траектория не прямолинейна.

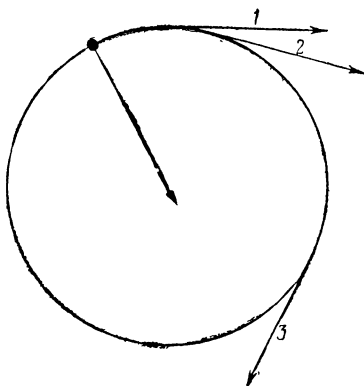


Рис. 15.

Только в равномерном прямолинейном движении не участвуют никакие силы. Здесь же сила налицо, и скорость изменяется, но не по величине, а по направлению. Сила, вызывающая это изменение, действует между камнем и рукой, держащей верёвку. Сразу же возни-

кают дальнейшие вопросы: в каком направлении действует сила? Опять векторная диаграмма даёт ответ. На рисунке 16 даны векторы скоростей для двух очень близких точек и найдено ускорение. Видно, что этот последний вектор должен быть направлен вдоль верёвки к центру окружности и всегда перпендикулярен к вектору скорости или касательной. Другими словами рука через верёвку воздействует на камень с некоторой силой.

Совершенно аналогичен и более важный пример — обращение Луны вокруг Земли. Обращение Луны можно считать приблизительно за равномерное круговое движение. Сила, действующая на Луну, направлена к Земле, что можно вывести на том же основании, на каком в предыдущем примере выведено, что сила была направлена к руке. Никакой верёвки, связывающей Луну и Землю, нет,

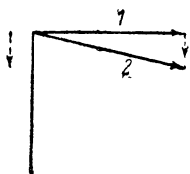


Рис. 16.

но мы можем представить себе линию между центрами обоих тел; сила лежит на этой линии и направлена к центру Земли, как и сила, действующая на камень, брошенный в воздух или падающий с башни.

Всё, что мы сказали о движении, можно суммировать в одном предположении. *Сила и изменение скорости суть векторы, имеющие одно и то же направление.* Это чрезвычайно важная руководящая идея, но она недостаточна для полного объяснения всех наблюдаемых движений. Переход от аристотелева образа мышления к галилееву положил самый важный краеугольный камень в обоснование науки. Прорыв был сделан, линия дальнейшего развития была ясна. Наш интерес здесь лежит в первоначальной стадии развития, в исследовании начальной руководящей идеи, в раскрытии того, как рождаются новые физические понятия в жестокой борьбе со старыми идеями. Мы касались только новаторских работ в науке, состоящих в нахождении новых и неожиданных путей развития; мы касались только прогресса в научной мысли, создающей вечно изменяющуюся картину мира. Начальные и основоположные шаги всегда имеют революционный характер.

Научное воображение находит старые понятия слишком ограниченными и заменяет их новыми. Развитие, продолжающееся по какой-либо уже принятой линии, эволюционно до тех пор, пока не достигается следующий поворотный пункт, когда должно быть завоёвано новое поле исследования. Но чтобы понять, какие основания и какие трудности вызывают изменение основных понятий, мы должны знать не только исходные руководящие идеи, но и выводы, которые могут быть из них сделаны.

Одна из наиболее важных характерных черт современной физики состоит в том, что выводы, сделанные из начальных идей, имеют не только качественный, но и количественный характер. Рассмотрим опять камень, падающий с башни. Мы видели, что его скорость возрастает по мере того, как он падает, но мы хотели бы знать гораздо больше. А именно, каково это изменение? Каковы положение и скорость камня в любой момент после того, как он начал падать? Нам хочется уметь предсказывать события и определять с помощью эксперимента, подтверждает ли наблюдение эти предсказания, а тем самым и исходные положения.

Чтобы сделать количественные выводы, мы должны использовать математический язык. Самые фундаментальные идеи науки по существу своему просты и, как правило, могут быть выражены языком, понятным каждому. Но чтобы охватить всю совокупность следствий, выводимых из той или иной общей идеи, требуется знание высоко утончённой техники исследования. И если мы хотим сделать выводы, которые можно сравнить с результатами эксперимента, нам необходима математика как орудие исследования. Поскольку мы касаемся только фундаментальных физических идей, мы можем избежать языка математики. Так как в этой книге мы проводим это последовательно, мы должны иногда ограничиваться ссылкой без доказательств на некоторые результаты, необходимые для понимания руководящих идей, возникающих в дальнейшем развитии. Этот отказ от математического языка оплачивается потерей в точности и необходимостью временами ссылаться на результаты без указания на то, как они были достигнуты.

Очень важный пример движения — движение Земли вокруг Солнца. Известно, что её путь представляет собой замкнутую кривую, называемую эллипсом. Построение векторной диаграммы изменения скорости показывает, что сила, действующая на Землю, направлена к Солнцу. Но после всего сказанного — это скучная информация. Нам хотелось бы уметь предсказывать положения Земли и других планет для любого произвольного момента времени. Нам хотелось бы предсказывать следующее

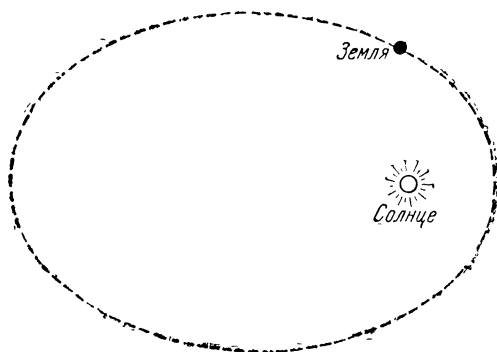


Рис. 17.

солнечное затмение и многие другие астрономические события. Всё это возможно сделать, но не на основе одной только исходной идеи, указанной выше, ибо необходимо знать не только направление силы, но и её абсолютное значение, её величину. Вдохновенной догадкой об этом мы обязаны Ньютону. Согласно его закону тяготения сила притяжения между двумя телами простым образом зависит от расстояния их друг от друга: она уменьшается, когда увеличивается расстояние. Когда расстояние удваивается, она уменьшается в $2 \times 2 = 4$ раза, когда расстояние увеличивается в три раза — в $3 \times 3 = 9$ раз.

Таким образом, мы видим, что в случае силы тяготения нам удалось выразить в простой форме зависимость силы от расстояния между движущимися телами. Подобным же образом мы поступаем во всех иных случаях,

когда действуют силы других видов, например электрические, магнитные и другие силы. Мы стремимся дать для силы простое выражение. Такое выражение оправдывается лишь в том случае, когда из него можно сделать выводы, подтверждаемые экспериментом.

Но знание одной только силы тяготения недостаточно для описания движения планеты. Мы видели, что векторы, представляющие силу и изменение скорости, для любого короткого промежутка времени имеют одно и то же направление, но мы должны вслед за Ньютоном сделать ещё один шаг, предположив простое отношение между их длинами. Если взять все другие условия одинаковыми, то-есть исследовать движение одного и того же тела и изменения скорости рассматривать через одинаковые промежутки времени, то, по Ньютону, изменение скорости пропорционально силе.

Таким образом, для количественных заключений о движении планет необходимы два дополнительных предположения. Одно — общего характера, устанавливающее связь между силой и изменением скорости. Другое — специального: оно устанавливает точную зависимость частного вида рассматриваемой силы от расстояния между телами. Первое — это общий закон движения Ньютона, второе — его закон тяготения. Совместно они определяют движение планет. Это можно сделать ясным при помощи следующего, несколько неуклюже звучащего рассуждения. Предположим, что в данный момент как положение, так и скорость планеты могут быть определены и что сила известна. В таком случае согласно закону Ньютона мы узнаем изменение скорости за очень короткий промежуток времени. Зная начальную скорость и её изменение, мы можем найти скорость и положение планеты в конце указанного промежутка времени. Повторяя этот процесс, мы можем проследить весь путь движения, не прибегая в дальнейшем к помощи начальных данных. Однако метод, применённый здесь, практически весьма неудобен. Практически такая последовательная процедура была бы столь же скучна, сколь и не точна. К счастью, она не является необходимой: математика даёт нам более короткий путь и делает возможным точное описание движения,

на которое нужно гораздо меньше чернил, чем мы употребляем для написания одной только фразы. Достигнутые таким путём выводы могут быть доказаны или опровергнуты наблюдением.

Внешнюю силу того же вида, что и в рассмотренном примере движения Земли, можно обнаружить и в движении камня, падающего в воздухе, и во вращении Луны по её орбите; это — сила земного притяжения материальных тел. Ньютон установил, что движение падающих камней, движение Луны и планет — это только очень специальные проявления универсальной силы тяготения, действующей между двумя любыми телами. В простых случаях движение может быть описано и предсказано с помощью математики. В отдельных чрезвычайно сложных случаях, когда рассматривается действие многих тел друг на друга, математическое описание не так просто, но основные принципы те же самые.

Мы находим, что выводы, к которым мы пришли, следуя нашей исходной руководящей идее, осуществляются в движении брошенного камня, в движении Луны, Земли и планет.

Такова фактически вся наша система положений, которая должна быть доказана или опровергнута экспериментом. Ни одно из положений не может быть выделено для самостоятельного испытания. Найдено, что в отношении планет, движущихся вокруг Солнца, система механики действует блестяще. Тем не менее мы легко можем представить себе, что другая система механики, основанная на других предположениях, может оказаться столь же хорошей.

Физические понятия суть свободные творения человеческого разума и неоднозначно определены внешним миром, как это иногда может показаться. В нашем стремлении понять реальность мы подобны человеку, который хочет понять механизм закрытых часов. Он видит циферблат и движущиеся стрелки, даже слышит тиканье, но он не имеет средств открыть их. Если он остроумен, он может нарисовать себе картину механизма, которая отвечала бы всему, что он наблюдает, но он никогда не может быть вполне уверен в том, что его картина единственная, кото-

рая могла бы объяснить его наблюдения. Он никогда не будет в состоянии сравнить свою картину с реальным механизмом и он не может даже представить себе возможность или смысл такого сравнения. Но он, конечно, уверен в том, что по мере того, как возрастает его знание, его картина реальности становится всё проще и проще и будет объяснять всё более широкий ряд его чувственных восприятий. Он также может верить в существование идеального предела знаний и в то, что человеческий разум приближается к этому пределу. Этот идеальный предел он может назвать объективной истиной.

Ещё одна руководящая идея

Впервые изучающие механику получают впечатление, что всё в этой ветви науки просто, основательно и сохраняется на все времена. Едва ли кто-нибудь подозревал существование новой важной руководящей идеи, которая никем не была замечена в течение трёх столетий. Эта оставшаяся вне поля зрения идея связана с одним из фундаментальных понятий механики — с понятием *массы*.

Вернёмся снова к идеализированному эксперименту, а именно к тележке на совершенно гладкой поверхности. Если тележка вначале находится в покое, а затем получает толчок, то она будет двигаться прямолинейно и равномерно с определённой скоростью. Предположим, что воздействие силы на покоящуюся тележку можно по желанию повторять сколько угодно раз, следовательно, механизм, производящий толчки, действует каждый раз одинаково и возбуждает одинаковую силу, действующую на одну и ту же тележку. Однако, сколько бы ни повторялся эксперимент, конечная скорость тележки будет всегда одна и та же. Но что случится, если эксперимент изменяется, если раньше тележка была пустая, а теперь она нагружена? Нагруженная тележка будет иметь меньшую конечную скорость, чем пустая. Вывод таков: если одна и та же сила действует на два различных тела, причём оба вначале покоятся, то результирующие скорости будут неодинаковыми. Мы говорим, что конечная скорость за-

висит от массы тела, она меньше, если масса тела больше.

Поэтому мы знаем, по крайней мере в теории, как определить массу тела или, точнее, как определить, во сколько раз одна масса больше другой. Пусть одинаковые силы действуют на две покоящиеся массы. Найдя, что скорость первой массы в три раза больше, чем скорость второй, мы заключаем, что первая масса в три раза меньше второй. Конечно, это не очень удобный путь определения отношения двух масс. Тем не менее мы легко можем представить, что это можно сделать либо указанным, либо аналогичным путём, основанным на применении закона инерции.

Как же мы фактически определяем массу на практике? Конечно, не таким методом, какой только что описан. Каждый знает, каков правильный ответ. Мы определяем её посредством взвешивания на весах.

Обсудим подробнее два различных пути определения массы.

Первый эксперимент не имеет ничего общего с тяжестью, притяжением к Земле. Тележка, получив толчок, движется по абсолютно гладкой горизонтальной плоскости. Сила тяжести, заставляющая тележку оставаться на плоскости, не изменяется и не играет никакой роли в определении массы. Это определение массы отличается от взвешивания. Мы никогда не могли бы применять весы, если бы Земля не притягивала тела, если бы не существовала тяжесть. Различие между обоими определениями масс состоит в том, что первое никак не связано с существованием силы тяжести, в то время как второе целиком основано на её существовании.

Мы спрашиваем: если мы определяем отношение двух масс обоими путями, описанными выше, то получим ли мы одинаковый результат? Ответ, данный экспериментом, совершенно ясен. Результаты точно одинаковы! Этот вывод нельзя было бы предугадать: он основывается на наблюдении, а не на рассуждении. Назовём, ради простоты, массу, определённую первым путём, *инертной массой*, а массу, определённую вторым путём — *тяжёлой массой*. В нашем мире они равны, но мы легко могли бы

представить себе случай, когда это вовсе не имело бы места. Немедленно возникает другой вопрос: является ли это равенство обеих масс чисто случайным, или же оно имеет более глубокий смысл? С точки зрения классической физики ответ таков: равенство обеих масс случайно, и нет никакого смысла придавать этому факту большое значение. Ответ современной физики совершенно противоположен: равенство обеих масс имеет фундаментальный смысл и составляет новую, весьма существенную руководящую идею, ведущую к более глубокому познанию мира. Действительно, это была одна из самых важных идей, из которых развилась так называемая теория относительности.

Нам представляется, что повесть о неких тайнах ниже по своему достоинству, если она загадочные события описывает как случайные. Конечно, нас больше удовлетворила бы повесть, которая следовала бы разумному образцу. Точно так же и теория, которая даёт объяснение равенства тяжёлой и инертной массы, превосходит теорию, трактующую их равенство как некоторую случайность, конечно, если обе эти теории одинаково удовлетворяют наблюдаемым фактам.

Так как это равенство инертной и тяжёлой массы было фундаментальным для формулировки теории относительности, мы остановимся здесь подробнее на её проверке. Какие эксперименты доказывают, что обе массы одинаковы? Ответ заключается в старом эксперименте Галилея, в котором он бросал тела различной массы с башни. Он заметил, что время, которое требовалось для падения, было всегда одинаково, то-есть движение падающего тела не зависит от массы. Чтобы связать этот простой, но чрезвычайно важный экспериментальный результат с равенством обеих масс, необходимы более сложные рассуждения.

Поддаваясь действию внешней силы, покоящееся тело приходит в движение и достигает некоторой скорости. Оно уступает действию силы более или менее легко, соответственно его инертной массе, сильнее сопротивляясь изменению движения тогда, когда масса велика, чем тогда, когда она мала. Не претендуя на строгость, мы можем

сказать: готовность, с какою тело отзывается на воздействие внешней силы, зависит от его инертной массы. Если бы Земля притягивала все тела с одинаковой силой, то самая большая масса должна была бы двигаться медленнее при падении, чем любая другая. В действительности же все тела падают одинаково. Это означает, что сила, с которой Земля притягивает различные массы, различна. Так, Земля, притягивая камень с некоторой силой, ничего не знает об его инертной массе. «Призывная» сила Земли зависит от тяжёлой массы. «Ответное» движение камня зависит от инертной массы. Так как «ответное» движение всегда одинаково — все тела падают с одной и той же высоты одинаково, — то отсюда вытекает, что тяжёлая и инертная массы равны.

То же самое заключение физик формулирует более педантично: ускорение падающего тела возрастает пропорционально его тяжёлой массе, а убывает пропорционально его инертной массе. Так как все падающие тела имеют одно и то же постоянное ускорение, то обе массы должны быть равны.

В нашей новости о великих тайнах природы нет проблем, полностью разрешённых и установившихся на все времена. Три сотни лет спустя мы должны были вернуться к первоначальной проблеме движения, исправить процедуру исследования, найти руководящую идею, которая не была ранее найдена, и тем самым построить новую картину окружающего нас мира.

Является ли теплота субстанцией?

Здесь мы начинаем исследовать новую руководящую идею, возникшую в области тепловых явлений. Однако, невозможно разделить науку на отдельные несвязанные разделы. В самом деле, мы скоро увидим, что введённые здесь новые понятия тесно переплетаются с понятиями, уже известными, и с понятиями, которые мы ещё встретим. Ход мыслей, развитый в одной ветви науки, часто может быть применён к описанию явлений, с виду совершенно отличных. В этом процессе первоначальные понятия часто видоизменяются, чтобы продвинуть пони-

мание как явлений, из которых они произошли, так и тех, к которым они вновь применены.

Самые основные понятия в описании тепловых явлений это — *температура* и *теплота*. В истории науки потребовалось чрезвычайно много времени для того, чтобы оба эти понятия были разделены, но когда это разделение было произведено, оно вызвало быстрый прогресс науки. Хотя эти понятия теперь известны каждому, мы исследуем их подробнее, подчеркнув различие между ними.

Наше чувство осязания совершенно определённо сообщает нам, что одно тело тёплое, а другое — холодное. Но это чисто качественный критерий, недостаточный для количественного описания, а иногда даже двусмысленный. Это подтверждается хорошо известным экспериментом: пусть мы имеем три сосуда, содержащих относительно холодную, тёплую и горячую воду. Если мы опустим одну руку в холодную воду, а другую — в горячую, то получим ощущение, что первая вода холодна, а вторая — горяча. Если затем мы опустим обе руки в одну и ту же тёплую воду, то мы получим два противоречивых ощущения. На этом же основании жители северных и экваториальных стран, встречаясь в Нью-Йорке в весенний день, держались бы различных мнений о том, тёплая или холодная была погода в момент их встречи. Мы разрешаем все эти вопросы применением термометра, инструмента, спроектированного в примитивной форме Галилеем. (Опять то же известное имя!) Применение термометра основано на некоторых очевидных физических предположениях. Мы напомним о них, приведя несколько строк из лекции, прочитанной около ста сорока лет тому назад Блэком, который способствовал великому делу разъяснения трудностей, связанных с обоими понятиями — понятием теплоты и понятием температуры.

«Благодаря применению этого инструмента мы узнали, что если мы возьмём тысячу или более различных видов вещества, таких, как металлы, камни, соли, дерево, перья, шерсть, вода и многообразие других жидкостей, причём все они вначале будут различной *теплоты*, поместим их вместе в одну и ту же комнату без огня и без солнечного света, то теплота будет передаваться от более горячего из этих тел

к более холодному, может быть, в течение нескольких часов или в течение дня, а в конце этого времени термометр, следовательно приложенный ко всем телам, покажет точно одну и ту же степень нагретости».

Выделенное курсивом слово *теплота* согласно теперешней терминологии должно быть заменено словом *температура*.

Врач, рассматривая термометр, с помощью которого он измерял температуру больного человека, может рассуждать приблизительно так: «Термометр показывает свою собственную температуру длиной своего ртутного столбика. Мы предполагаем, что длина ртутного столбика возрастает пропорционально возрастанию температуры. Но термометр был в течение нескольких минут в соприкосновении с моим пациентом, так что и пациент и термометр имеют одну и ту же температуру. Поэтому я заключаю, что температура моего пациента та же, что и температура, зарегистрированная термометром». Доктор, вероятно, действует механически, но он применяет физические законы, не рассуждая о них.

Но содержит ли термометр то же самое количество теплоты, что и тело человека? Конечно, нет. Чтобы предположить, что два тела содержат одинаковое количество теплоты именно потому, что их температуры одинаковы, следует, как заметил Блэк,

«держаться очень поспешного взгляда о предмете. Это означает смешивание количества теплоты в различных телах с её общей силой или интенсивностью, хотя ясно, что это — неодинаковые вещи, которые следует различать, когда мы рассуждаем о распределении теплоты».

Это различие становится понятным из рассмотрения очень простого эксперимента. Чтобы изменить температуру килограмма воды от комнатной температуры до точки кипения, необходимо некоторое время. Гораздо большее время требуется для нагревания двенадцати килограммов воды в том же сосуде на том же пламени. Мы истолковываем этот факт как указание на то, что теперь требуется больше «чего-то», и это «что-то» мы называем *теплотой*.

Следующее важное понятие — *удельная теплота*, получено из следующего эксперимента: пусть один сосуд содер-

жит килограмм воды, а другой — килограмм ртути и пусть оба нагреваются одинаковым образом. Ртуть станет горячей гораздо скорее, чем вода, тем самым показывая, что необходимо меньше «теплоты», чтобы поднять температуру ртути на один градус. Вообще говоря, для того чтобы нагреть на один градус, скажем, от четырёх до пяти градусов по Цельсию, различные вещества, такие, как вода, ртуть, железо, медь, дерево и т. д., все одинаковой массы, требуются различные количества «теплоты». Мы говорим, что каждое вещество имеет свою индивидуальную *теплоёмкость*, или *удельную теплоту*.

Получив понятие теплоты, мы можем исследовать его природу ближе. Пусть мы имеем два тела, одно горячее, а другое холодное, или точнее, одно тело более высокой температуры, чем другое. Установим между ними контакт и освободим их от всех других внешних влияний. Мы знаем, что в конечном итоге они достигнут одной и той же температуры. Но как это получается? Что происходит с того времени, когда они приведены в соприкосновение, до достижения ими одинаковой температуры? На ум приходит картина течения теплоты от одного тела к другому, аналогично тому, как вода течёт с более высокого уровня к низшему. Эта, хотя и примитивная, картина оказывается соответствующей многим фактам, так что можно провести аналогию:

Вода	—	Теплота
Более высокий уровень	—	Более высокая температура
Низший уровень	—	Низшая температура

Течение продолжается до тех пор, пока оба уровня, то-есть обе температуры, не сравняются. Этот наивный взгляд можно сделать более полезным для количественного рассмотрения. Если смешиваются вместе определённые массы воды и спирта, знание удельных теплот позволяет предсказать конечную температуру смеси. Наоборот, наблюдение конечной температуры и небольшое знание алгебры позволяют нам найти отношение двух удельных теплот.

Мы приходим к понятию теплоты, которое оказывается здесь похожим на другие физические понятия. Согласно

нашему взгляду теплота — это вещество, такое же, как и масса в механике. Её количество может либо изменяться, либо же оставаться постоянным, подобно деньгам, которые можно либо отложить в сейф, либо же истратить. Количество денег в сейфе будет оставаться неизменным до тех пор, пока сейф остаётся закрытым; точно так же будут неизменными количества массы и теплоты в изолированном теле. Идеальный дорожный термос аналогичен такому сейфу. Больше того, как масса в изолированной системе остаётся неизменной, даже если имеет место химическое превращение, так же и теплота сохраняется даже в том случае, когда она переходит от одного тела к другому. Даже если теплота употребляется не на повышение температуры тела, а, скажем, на таяние льда или на превращение воды в пар, мы можем попрежнему думать о ней как о веществе, так как можем снова получить её при замерзании воды или сжижении пара. Старые названия — скрытая теплота таяния или испарения — показывают, что эти понятия получены из представления о теплоте как о веществе. Скрытая теплота временно скрывается, подобно деньгам, положенным в сейф, но её можно использовать, если известен запирающий механизм.

Но теплота, разумеется, не вещество в том же смысле, как масса. Массу можно взвесить на весах, а можно ли взвесить теплоту? Весит ли кусок железа больше, когда он докрасна нагрет, по сравнению с тем, когда он холоден как лёд? Эксперимент показывает, что нет. Если теплота — вещество, то она — невесомое вещество. «Тепловое вещество» обычно называлось *калорием (теплородом)*; через него мы впервые знакомимся с целым семейством невесомых веществ. Позднее мы будем иметь случай проследить историю этого семейства невесомых, его подъём и падение. Теперь же достаточно отметить зарождение отдельного члена этого семейства.

Цель всякой физической теории — объяснить максимально широкую область явлений. Она оправдывается постольку, поскольку делает события понятными. Мы видели, что субстанциональная теория объясняет много тепловых явлений. Однако, скоро станет очевидным, что

это опять ложная идея, что теплоту нельзя считать веществом, хотя бы и невесомым. Это ясно, если мы вспомним о некоторых простых экспериментах, отметивших начало цивилизации.

О веществе мы думаем, как о чём-то, что никогда не может быть ни создано, ни разрушено. Однако, первобытный человек с помощью трения создал теплоту, достаточную для того, чтобы зажечь дерево. Примеры нагревания посредством трения слишком многочисленны и хорошо известны, чтобы нужно было о них рассказывать. Во всех этих случаях создаётся некоторое количество теплоты, — факт, трудно объяснимый с точки зрения субстанциональной теории. Верно, что защитник этой теории может придумать доводы с целью объяснить этот факт. Его рассуждение должно быть приблизительно таким: «Субстанциональная теория может объяснить видимое создание теплоты. Возьмём простейший пример, когда два куска дерева трутся друг о друга. Так вот трение — это нечто такое, что воздействует на дерево и изменяет его свойства. При этом свойства изменяются так, что неизменное количество теплоты должно создавать более высокую температуру, чем-прежде. В конце концов, единственное, что мы замечаем, это — повышение температуры. Возможно, что трение изменяет теплоёмкость дерева, а не общее количество теплоты».

В этой стадии обсуждения было бы бесполезным спорить с защитником субстанциональной теории; это вопрос, который может быть разрешён только экспериментально. Представим себе два одинаковых куска дерева и предположим, что температура их изменена одинаково, но различными методами; в одном случае, например, путём трения, а в другом — при помощи соприкосновения с радиатором. Если оба куска железа имеют одинаковую теплоёмкость при новой температуре, то рушится вся субстанциональная теория. Имеются очень простые методы определения теплоёмкостей, и судьба этой теории зависит от результата именно таких измерений. В истории физики часто встречаются такие испытания, которые способны произнести приговор о жизни или смерти теории; они называются *crucial* (круцис), то-есть решающими эксперимента-

ми. Решением суда такого эксперимента может быть оправдана только одна теория явлений. Определение удельных теплоёмкостей двух тел одного и того же рода при одинаковых температурах, достигнутых соответственно трением и тепловым потоком, представляет собой типичный пример решающего эксперимента. Этот эксперимент был произведён около ста сорока лет тому назад Румфордом; он нанёс смертельный удар субстанциональной теории теплоты.

В докладе Румфорда мы читаем:

«Часто случается, что обычные житейские дела и занятия предоставляют нам возможности наблюдения некоторых наиболее любопытных процессов природы; очень интересные физические эксперименты нередко можно сделать без особых забот или затрат с помощью механизма, придуманного для выполнения простых механических задач в ремеслах и производстве.

У меня очень часто были случаи для подобных наблюдений; и я убеждался, что привычка быстро реагировать на всё, что встречается в обычном ходе деловой жизни, приводила, так сказать, случайно или в резвых экскурсиях воображения, которые возникали под влиянием размышлений над самыми обычными явлениями, — к полезным сомнениям и разумным планам исследования и совершенствования гораздо чаще, чем все самые напряжённые размышления физиков в часы, специально отведённые для научных занятий.

Недавно, будучи обязанным наблюдать за сверлением пушки на заводах военного арсенала в Мунче, я был удивлён очень значительной степенью теплоты, которую приобретала медная пушка за короткое время сверления; ещё интенсивнее (гораздо интенсивнее, чем теплота кипящей воды, как я обнаружил опытом) была теплота металлических стружек, отделённых от пушки при сверлении...

Откуда приходит теплота, фактически представленная в вышеупомянутом механическом процессе?

Доставляется ли она металлическими стружками, которые отделяются при сверлении от твёрдой массы металла?

Если бы это было так, то, согласно современному учению о скрытой теплоте и о теплоёмкости их не только должна была измениться, но само изменение это должно быть достаточно велико, чтобы объяснить всю произведённую теплоту.

Но никакого такого изменения не было; я обнаружил это, взяв равные по весу количества этих стружек, а также тонких полосок той же самой металлической болванки, отделённых мелкой пилкой, и положив их при одинаковой температуре (температуре кипящей воды) в сосуды с холодной водой,

взятой в одинаковых количествах (например, при температуре 59,5° по Фаренгейту); вода, в которую были положены стружки, судя по всему, не нагрелась больше или меньше, чем другая часть воды, в которую были положены полоски металла».

Наконец, мы подходим к выводу Румфорда:

«Обсуждая этот предмет, мы не должны забывать учёта того самого замечательного обстоятельства, что источник теплоты, порождённый трением, оказался в этих экспериментах явно *неисчерпаемым*.

Совершенно необходимо добавить, что это нечто, чем любое *изолированное* тело или система тел может непрерывно снабжать *без ограничения*, не может быть *материальной субстанцией*; и мне кажется чрезвычайно трудным, если не совершенно невозможным, создать какую-либо точную идею о чём-то, что в состоянии возбуждаться и передаваться подобно тому, как возбуждается и передаётся в этих экспериментах теплота, если только не допустить, что это что-то есть *движение*».

Таким образом, мы видим разрушение старой теории, или, чтобы быть более точным, мы видим, что субстанциональная теория ограничивается проблемами теплового потока. И опять, как указал Румфорд, мы должны искать новые руководящие идеи. Чтобы сделать это, оставим на время проблему теплоты и вернёмся к механике.

Увеселительная горка

Проследим за движением маленького вагона, поднятого до наиболее высокой точки волнообразной горки. Когда он освобождается, он начинает катиться вниз под влиянием силы тяжести, а затем поднимается и опускается вдоль причудливо искривлённой линии, заставляя пассажиров весьма остро переживать своё путешествие вследствие внезапного изменения скорости. Каждый зигзаг дорожки имеет свою наивысшую точку. Однако, никогда на всём протяжении движения вагон не достигнет той же самой высоты, с которой он начал движение. Полное описание движения было бы очень сложным. С одной стороны, это механическая проблема, так как налицо изменение скорости и положения во времени. С другой стороны, имеется трение, а стало быть, образование теплоты в рельсах и

колёсах. Единственное существенное основание для разделения физического процесса на эти два аспекта — это возможность использовать обсуждённые раньше понятия. Это разделение приводит к идеализированному эксперименту, ибо физический процесс, в котором проявляется

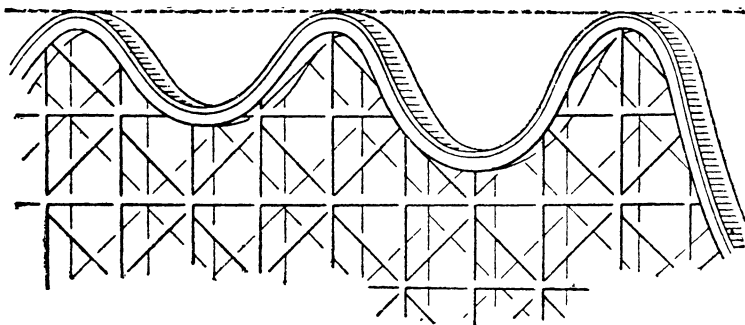


Рис. 18.

только механический аспект, можно только вообразить, но никогда нельзя реализовать.

Для идеализированного эксперимента мы можем вообразить, что некто научился полностью исключать трение, которое всегда сопровождает движение. Он решает применить свое открытие к конструкции нового аттракциона — волнообразной горки и должен найти, как построить её. Вагон должен пробежать вверх и вниз от своей исходной точки, скажем, на высоте тридцати метров над уровнем земли. Учась на опыте и ошибках, он скоро узнает, что он может следовать очень простому правилу: он может построить свою горку любой формы, какую он пожелает, при условии, что ни одна точка его дорожки не лежит выше исходной. Если вагон будет двигаться без трения до самого конца горки, то на своём пути он может достигнуть высоты в тридцать метров столько раз, сколько наш конструктор пожелает, но никогда эта высота не может быть превзойдена. На реально выполнимой горке начальная высота никогда не может быть достигнута ва-

гоном из-за трения, но наш воображаемый инженер не нуждается в рассмотрении последнего.

Проследим за движением на идеализированной горке идеализированного вагона, начинающего катиться вниз от исходной точки. Когда он движется, его расстояние от земли уменьшается, но его скорость увеличивается. Это предположение на первый взгляд напоминает нам один из уроков по языку: «У меня нет ни одного карандаша, но у вас есть шесть апельсинов». Однако, оно не так глупо. Нет никакой связи между тем, что я не имею ни одного карандаша, а вы имеете шесть апельсинов, но существует очень реальное соотношение между расстоянием вагона от земли и его скоростью. Мы можем точно подсчитать скорость вагона в любой момент, если мы знаем, на какой высоте над землёй он находится; мы вынуждены, однако, опустить здесь этот подсчёт из-за его количественного характера, лучше всего выражаемого математической формулой.

В наивысшей точке скорость вагона равна нулю, а высота — тридцати метрам от земли. В самой низкой точке расстояние от земли равно нулю, но скорость вагона наибольшая. Эти факты можно выразить другими словами. В наивысшей точке у вагона есть *потенциальная энергия*, но нет *кинетической энергии*, или энергии движения. В самой низкой точке у вагона наибольшая кинетическая энергия, но нет никакой потенциальной энергии. Во всех промежуточных положениях, в которых имеется и некоторая скорость, и некоторое возвышение над землёй, вагон имеет и кинетическую и потенциальную энергию. Потенциальная энергия увеличивается с поднятием, между тем как кинетическая энергия становится больше по мере того, как возрастает скорость. Принципы механики достаточны для того, чтобы объяснить движение. В математической формуле находятся два выражения энергии, каждое из которых при движении меняется, хотя сумма их не изменяется. Таким образом, возможно строго математически ввести понятия потенциальной энергии, зависящей от положения, и кинетической энергии, зависящей от скорости. Введение обоих названий, конечно, произвольно и оправдывается лишь удобством. Сумма двух количеств остаётся

неизменной и называется константой движения. Полную энергию, кинетическую плюс потенциальную, можно сравнить, например, с деньгами, которые сохранялись неизменными по величине, но непрерывно обменивались по твёрдому курсу то на одну валюту, то на другую, скажем, на доллары, фунты и обратно.

В реальной горке, при движении по которой трение препятствует вагону вновь подняться до высоты исходной

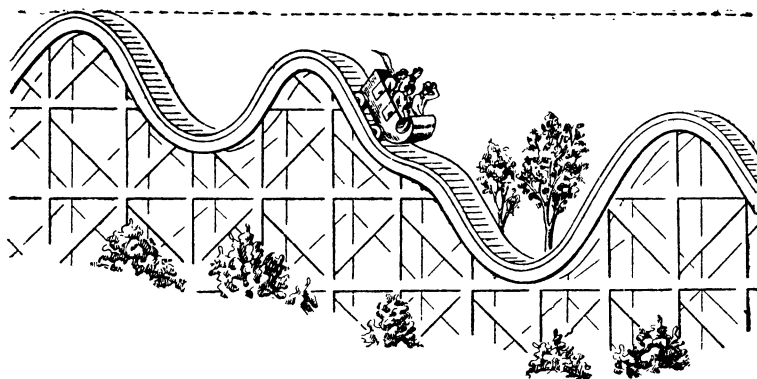


Рис. 19.

точки, имеет место непрерывный взаимообмен между кинетической и потенциальной энергией. Однако, здесь сумма их не остаётся постоянной, а становится всё меньше и меньше. Теперь необходимо сделать важный и смелый шаг — поставить в связь механический и тепловой аспекты движения. Значение следствий и обобщений, сделанных из этого шага, будет видно из дальнейшего.

В этом случае в рассмотрение вовлекается нечто большее, чем кинетическая и потенциальная энергия, а именно теплота, создаваемая трением. Соответствует ли эта теплота уменьшению механической, то-есть кинетической и потенциальной, энергии? Новое предположение неизбежно. Если теплоту можно рассматривать как форму энергии, то, может быть, сумма всех трёх энергий — теплоты, кинетической и потенциальной энергий — остаётся

постоянной. Не одна теплота, а теплота и другие формы энергии, взятые вместе, неразрушимы подобно субстанции. Это похоже на то, как если бы человек, обменивая свои доллары на фунты, должен был из тех же денег заплатить франками за комиссию по обмену; общая сумма денег тоже сохраняется, так что сумма долларов, фунтов и франков представляет собой определённую величину, которую можно установить соответственно определённому курсу обмена.

Прогресс науки разрушил старое понятие теплоты как субстанции. Мы пытаемся создать новую субстанцию, энергию, одной из форм которой является теплота.

Мера превращения

Меньше ста лет назад Майер ввёл, а Джоуль экспериментально подтвердил новую идею, которая привела к понятию теплоты как формы энергии. Удивительно, что почти все фундаментальные работы о природе теплоты были сделаны не физиками-профессионалами, а людьми, которые рассматривали физику исключительно как своё любимое занятие. Это были — многосторонний шотландец Блэк, немецкий врач Майер и американский предприниматель граф Румфорд. Был среди них и английский пивовар Джоуль, проделавший в свободное время ряд наиболее важных экспериментов, касающихся сохранения энергии.

Джоуль экспериментально подтвердил предположение о том, что теплота — это форма энергии, и определил меру превращения.

Стоит потратить время, чтобы посмотреть, каковы были его опыты.

Кинетическая и потенциальная энергия системы составляют вместе её механическую энергию. Мы предполагаем, что в случае движения вагона по увеселительной горке часть механической энергии превращается в теплоту. Если это верно, то как в этом, так и во всех других аналогичных физических процессах должна существовать определённая *мера превращения* механической энергии в тепловую (механический эквивалент теплоты). Это строго количе-

ственный вопрос, но тот факт, что данное количество механической энергии может быть превращено в определённое количество теплоты, весьма важен. Нам хотелось бы знать, каким числом выражается мера превращений, то-есть сколько теплоты мы получим из данного количества механической энергии.

Определение этого числа как раз и было предметом исследований Джоуля.

Механизм одного из его экспериментов очень похож на механизм часов с гирями. Завод таких часов со-

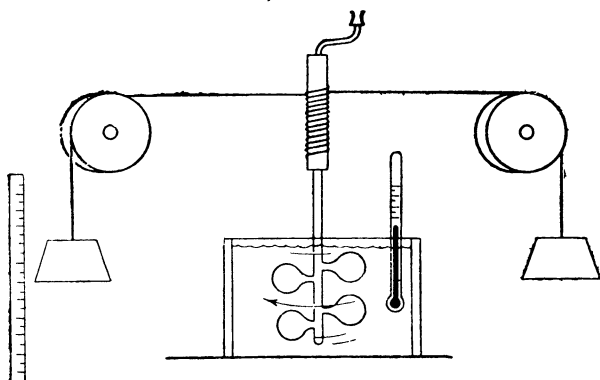


Рис. 20.

стоит в поднятии двух гирь, благодаря чему к системе прибавляется потенциальная энергия. Постепенно гири падают, и завод часов уничтожается. В конце определённого времени гири достигнут своего наинизшего положения, и часы остановятся. Что произошло с энергией? Потенциальная энергия гирь превратилась в кинетическую энергию механизма, а затем постепенно рассеялась в виде теплоты.

Искусное изменение в этого рода механизме позволило Джоулю измерить тепловую потерю, а тем самым и меру превращения. В его приборе две гири вызывали вращение колеса с лопастями, помещённого в воду (рис. 20). Потенциальная энергия гирь превращалась в кинетическую энергию движущихся частиц воды, а стало

быть, в теплоту, которая увеличивала температуру воды. Джоуль измерял это изменение температуры и, зная теплоёмкость воды, подсчитывал количество поглощённой теплоты. Он подытожил результаты многих опытов в следующих положениях:

1. Количество теплоты, произведённой трением тел, твёрдых или жидких, всегда пропорционально количеству затраченной силы (силой Джоуль обозначал энергию).

2. Количество теплоты, необходимое для увеличения температуры фунта воды (взвешенной в вакууме и взятой при температуре между 55 и 60°) на 1° Фаренгейта, требует для своего развития расхода механической силы (энергии), представленной падением 772 фунтов с высоты в один фут *).

Другими словами, потенциальная энергия 772 фунтов, поднятых на один фут над землёй, эквивалентна количеству теплоты, необходимой для того, чтобы поднять температуру одного фунта воды от 55 до 56° по шкале Фаренгейта. Последующие эксперименты внесли несколько большую точность, но механический эквивалент теплоты — это то существенное, что Джоуль нашёл в своей первоначальной работе.

Поскольку эта важная работа была сделана, дальнейший прогресс шёл быстро. Скоро было признано, что механическая энергия и тепловая — это только два вида из многих форм энергии. Всё, что может быть превращено в какую-либо из этих форм, есть тоже форма энергии. Излучение, испускаемое солнцем, есть энергия, ибо часть её превращается на земле в теплоту. Электрический ток обладает энергией, ибо он нагревает проводник и вращает ротор мотора. Уголь обладает химической энергией, высвобождающейся в виде теплоты во время сгорания. В каждом явлении природы одна форма энергии всегда превращается в другую, так что существует некоторая вполне определённая мера такого пре-

*) В переводе на метрические меры приведённое в тексте положение будет звучать так:

Количество теплоты, необходимое для увеличения температуры килограмма воды (взвешенной в вакууме и взятой при температуре между 14 и 15°) на 1° по Цельсию, требует для своего развития расхода механической силы (энергии), представленной падением 427 килограммов с высоты одного метра. (Прим. пер.)

вращения. В замкнутой системе, изолированной от внешних влияний, энергия сохраняется и, следовательно, ведёт себя подобно субстанции. Сумма всех возможных форм энергии в такой системе постоянна, хотя количество любого из этих видов энергии может изменяться. Если мы рассматриваем всю Вселенную как замкнутую систему, мы можем вместе с физиками девятнадцатого столетия гордо заявить, что энергия вселенной неизменна, что никакая часть её никогда не может быть создана или уничтожена.

В таком случае существуют два понятия субстанции: *вещество и энергия*. Оба подчиняются законам сохранения: масса и полная энергия изолированной системы не могут изменяться. Вещество имеет вес, а энергия невесома. Поэтому мы имеем два различных понятия и два закона сохранения. Можно ли и теперь использовать эти идеи в прежнем виде? Или эта, несомненно, хорошо обоснованная, картина изменилась в свете новейших исследований? Да, изменилась! Дальнейшие изменения в обоих понятиях связаны с теорией относительности. Позднее мы вернёмся к этому вопросу.

Философские воззрения

Результаты научного исследования очень часто вызывают изменения в философских взглядах на проблемы, которые распространяются далеко за пределы ограниченных областей самой науки. Какова цель науки? Что требуется от теории, которая стремится описать природу? Эти вопросы, хотя и выходят за пределы физики, близко связаны с ней, так как наука даёт тот материал, из которого они вырастают. Философские обобщения должны основываться на научных результатах. Однако, раз возникнув и получив широкое распространение, они очень часто влияют на дальнейшее развитие научной мысли, указывая одну из многих возможных линий развития. Успешное восстание против принятого взгляда имеет своим результатом неожиданное и совершенно новое развитие, становясь источником новых философских воззрений. Эти замечания неизбежно звучат неопределённо и неост-

роумно до тех пор, пока они не иллюстрированы примерами, взятыми из истории физики.

Мы постараемся здесь описать первые философские идеи о целях науки. Эти первые идеи сильно влияли на развитие физики до тех пор, пока, около ста лет назад, они не были отброшены, благодаря новым данным, новым фактам и теориям, которые образовали новую основу для науки.

Во всей истории науки от греческой философии до современной физики имелись постоянные попытки свести внешнюю сложность естественных явлений к некоторым простым фундаментальным идеям и отношениям. Это основной принцип всей натуральной философии. Он выражен уже в работе атомистов. Двадцать три столетия назад Демокрит писал:

«Условно сладкое, условно горькое, условно горячее, условно холодное, условен цвет. А в действительности существуют атомы и пустота. То-есть объекты чувств предполагаются реальными и в порядке вещей — рассматривать их как таковые, но на самом деле они не существуют. Реальны только атомы и пустота».

Эта идея остаётся в древней философии ни чем иным, как остроумным вымыслом воображения. Законы природы, устанавливающие связь следующих друг за другом событий, были неизвестны грекам. Наука, связывающая теорию и эксперимент, фактически началась с работ Галилея. Мы проследили за первыми шагами её развития, приводящими к законам движения. На протяжении двухсот лет научного исследования сила и материя были основными понятиями во всех попытках понять природу. Невозможно представить себе одно без другого, ибо материя обнаруживает своё существование в качестве источника силы, благодаря её действию на другую материю.



Рис. 21.

Рассмотрим простейший пример: две частицы, между которыми действуют силы. Легче всего представить себе силы притяжения и отталкивания. В обоих случаях векто-

«Её призвание будет выполнено по мере того, как будет выполнено сведение явлений природы к простым силам и будет доказано, что это единственно возможное сведение, которое допускают явления».

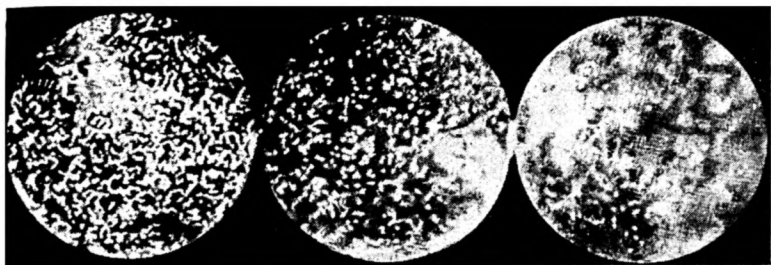
Физику двадцатого столетия это воззрение представляется недалёким и наивным. Ему страшно было бы подумать, что величайшие успехи исследования могли бы скоро закончиться, перестав возбуждать умы, если непогрешимая картина строения Вселенной установлена на все времена.

Хотя эти догматы сводили бы описание всех событий к простым силам, они оставляли открытым вопрос о точной зависимости сил от расстояния. Возможно, что для различных явлений эта зависимость различна. Необходимость введения многих различных видов сил для различных событий, конечно, неудовлетворительна с философской точки зрения. Тем не менее, это так называемое *механистическое воззрение*, наиболее ясно сформулированное Гельмгольцем, сыграло в своё время важную роль. Развитие кинетической теории материи есть одно из величайших достижений науки, непосредственно вызванное механистическим воззрением.

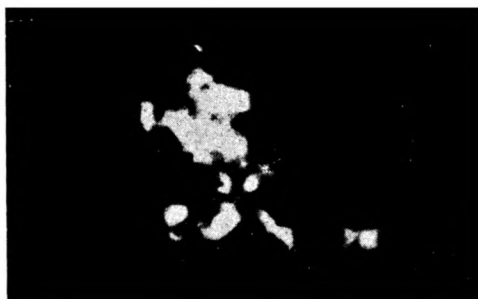
Прежде чем показать его упадок, временно станем на ту точку зрения, которой придерживались физики прошлого столетия, и посмотрим, какие заключения мы можем вывести из этой картины внешнего мира.

Кинетическая теория материи

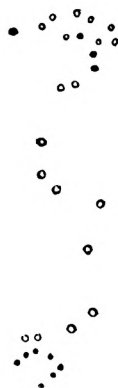
Возможно ли объяснить тепловые явления в терминологии, относящейся к движению частиц, взаимодействующих между собой с помощью простых сил? Пусть замкнутый сосуд содержит определённую массу газа, например, воздуха, при определённой температуре. Нагревая воздух, мы поднимаем его температуру и таким образом увеличиваем энергию. Но как эта теплота связана с движением? Возможность такой связи внушается нам и нашим догматически принятым философским воззрением и тем, что теплота порождается движением. Теплота должна представлять собой механическую энергию,



а) Броуновские частицы, видимые через микроскоп.
(Сфотографировано Ж. Перреном.)



б) Одна броуновская частица, сфотографированная с долгой выдержкой.
(Сфотографировано Брумбергом и Вавиловым.)



с) Последовательные положения, наблюдаемые для одной из броуновских частиц.



д) Путь, выведенный из этих последовательных положений.

ры сил лежат на линии, соединяющей материальные точки (рис. 21). Требование простоты приводит нас к картине частиц, притягивающих или отталкивающих друг друга; любое другое предположение о направлении действующих сил привело бы к гораздо более сложной картине. Можем ли мы сделать столь же простое предположение о длине векторов сил? Если мы пожелаем избежать слишком специальных предположений, мы можем высказать одно соображение: сила, действующая между двумя заданными частицами, зависит только от расстояния между ними, подобно силам тяготения. Это предположение оказывается довольно простым. Можно было бы представить гораздо более сложные силы, например зависящие не только от расстояния, но и от скоростей обеих частиц. С материей и силой в качестве основных понятий мы едва ли можем связать более простые предположения, чем те, что силы действуют вдоль линии, связывающей частицы, и зависят только от расстояния. Но возможно ли описать все физические явления с помощью сил исключительно этого рода?

Огромные достижения механики во всех её ветвях, её поразительный успех в развитии астрономии, приложение её идей к проблемам, повидимому, отличным от механических по своему характеру, — всё это способствовало развитию уверенности в том, что с помощью простых сил, действующих между неизменными объектами, возможно описать все явления природы. На протяжении двух столетий, последовавших за временем Галилея, такая попытка, сознательная или бессознательная, проявляется почти во всех научных трудах. Особенно ясно её сформулировал Гельмгольц около середины девятнадцатого столетия:

«Таким образом, задачу физической науки мы видим, в конце концов, в том, чтобы свести физические явления к неизменным силам притяжения или отталкивания, величина которых целиком зависит от расстояния. Разрешимость этой задачи есть условие полного понимания природы».

Таким образом, линия развития науки согласно Гельмгольцу определена и следует строго установленному курсу:

если всякая проблема есть механическая проблема. Задача *кинетической теории* состоит в том, чтобы представить понятие материи именно таким путём. Согласно этой теории газ есть совокупность огромного числа частиц, или молекул, движущихся во всех направлениях, соударяющихся друг с другом и изменяющих своё направление движения после каждого столкновения. В таком газе должна существовать средняя скорость молекул,

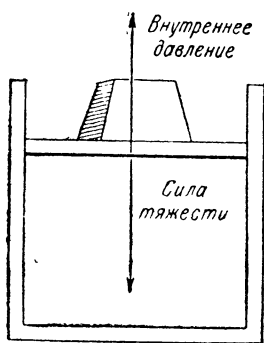


Рис. 22.

подобно тому как в человеческом обществе существует средний возраст или средний доход. Поэтому должна существовать также и средняя кинетическая энергия частицы. Чем больше теплоты в данном сосуде, тем больше средняя кинетическая энергия. Таким образом, согласно этой картине теплота не является специфической формой энергии, отличной от механической, а она есть не что иное, как именно кинетическая энергия молекулярного движения. Любой определённой температуре соответствует определённая средняя кинетическая энергия молекул. В самом деле, это не произвольное предположение. Мы вынуждены рассматривать кинетическую энергию молекул как меру температуры газа, если мы хотим создать последовательную механистическую картину строения вещества.

Эта картина — нечто большее, чем игра воображения. Можно показать, что кинетическая теория газов не только находится в согласии с экспериментом, но и действительно приводит к более глубокому пониманию фактов. Это можно проиллюстрировать несколькими примерами.

Пусть мы имеем сосуд, закрытый поршнем, который может свободно двигаться. Сосуд содержит определённое количество газа, который должен сохранять свою температуру неизменной. Если поршень вначале покоится в некотором положении, то его можно поднять вверх

или, добавляя нагрузку, опустить. Чтобы сдвинуть поршень вниз, нужно употребить силу, действующую против внутреннего давления газа. Каков механизм этого внутреннего давления согласно кинетической теории? Огромное число частиц, составляющих газ, движется во всех направлениях. Они бомбардируют все стенки и поршень, отскакивая назад, подобно мячам, брошенным в стену. Эта непрерывная бомбардировка большого числа частиц поддерживает поршень на определённой высоте, сопротивляясь силе тяжести, действующей по направлению вниз на поршень и нагрузку. В одном направлении действует постоянная сила тяготения, а в другом — очень много беспорядочных ударов молекул. Конечный результат действия на поршень всех этих малых беспорядочных сил должен быть равен результату действия силы тяготения, если сохраняется равновесие.

Предположим, что поршень сдвинули вниз так, что он сжал газ до некоторой части его первоначального объёма, скажем, до половины, а температура его осталась неизменной. Что должны мы ожидать в этом случае согласно кинетической теории? Будет ли сила, происходящая от бомбардировки молекул, эффективнее, чем прежде, или нет? Теперь частицы заполняют сосуд теснее, чем прежде. Хотя средняя кинетическая энергия попрежнему та же самая, удары частиц о поршень теперь происходят чаще, а стало быть, полная сила будет больше. Из этой картины, представленной кинетической теорией, ясно, что для того чтобы удержать поршень в его нижнем положении, требуется большая нагрузка. Этот простой экспериментальный факт хорошо известен, но предсказание его логически вытекает из кинетического взгляда на материю.

Рассмотрим другой эксперимент. Возьмём два сосуда, содержащих одинаковые объёмы различных газов, скажем, водорода и азота, оба при одинаковой температуре. Предположим, что оба сосуда закрыты одинаковыми поршнями, на которых наложены равные нагрузки. Коротко говоря, это означает, что оба газа имеют равные объёмы, температуру и давление. Так как температура одинакова, то согласно теории такова же и средняя ки-

нетическая энергия частиц. Так как давления одинаковы, то оба поршня бомбардируются с одной и той же общей силой. В среднем каждая частица обладает одной и той же энергией, а оба сосуда имеют равный объём. Поэтому, хотя газы химически и различны, *число молекул в каждом сосуде должно быть одинаковым*. Этот результат очень важен для понимания многих химических явлений. Он означает, что число молекул в данном объёме при определённой температуре и давлении есть нечто такое, что характеризует не какой-либо отдельный газ, а все газы. Наиболее изумительно то, что кинетическая теория не только предсказывает существование такого универсального числа, но и позволяет нам определить его. К этому вопросу мы скоро вернёмся.

Кинетическая теория материи объясняет как количественно, так и качественно, законы газов, найденные с помощью эксперимента. Более того, теория не ограничивается газами, хотя её наибольшие успехи были достигнуты в этой области.

Газ можно довести до сжижения понижением его температуры. Падение температуры вещества означает уменьшение средней кинетической энергии его частиц. Поэтому ясно, что средняя кинетическая энергия частиц жидкости меньше, чем средняя кинетическая энергия частиц соответствующего газа.

Поразительная демонстрация движения частиц жидкости была впервые дана так называемым *броуновским движением*, замечательные явления которого остались бы совершенно таинственными и непонятными без кинетической теории материи. Оно было впервые наблюждено ботаником Броуном, а объяснено лишь спустя восемьдесят лет, в начале этого столетия. Единственный прибор, необходимый для наблюдения броуновского движения, — это микроскоп, даже не особенно хорошего качества.

Броун работал с зёрнами некоторых растений, то есть, по его словам:

«частицами или зёрнами необычно малой величины, размером от одной четырёхтысячной до одной пятитысячной доли дюйма в длину».

Далее он рассказывает:

«Проверяя формы этих частиц, погружённых в воду, я наблюдал многие из них в явном движении... Эти движения были таковы, что после многих повторных наблюдений я убедился в том, что они возникают не от потоков в жидкости и не от её постепенного испарения, а принадлежат самим частицам».

То, что наблюдал Броун, было непрерывным колебанием зёрен, взвешенных в воде и наблюдаемых в микроскоп. Это поразительное зрелище!

Существенен ли выбор отдельных растений для наблюдаемого явления? Чтобы ответить на этот вопрос, Броун повторил эксперимент со многими различными растениями и нашёл, что все зёрна, если только они достаточно малы, обнаруживают такое же движение, будучи взвешенными в воде. Больше того, он обнаружил тот же вид неутомимого, беспорядочного движения у очень малых частиц как органических, так и неорганических веществ. Даже с распылёнными кусочками камня он наблюдал такие же явления! (См. вкл. лист I в конце книги.)

Как можно объяснить это движение? Кажется, что оно противоречит всему прежнему опыту. Наблюдение положения одной взвешенной частицы, произведённое через, скажем, каждые двадцать секунд, обнаруживает фантастическую форму её пути. Удивительно то, что её движение, повидимому, имеет характер вечного движения. Колеблющийся маятник, помещённый в воду, скоро остановится, если только он не будет толкаться некоторой внешней силой. Существование никогда не уменьшающегося движения кажется противоречащим всему предыдущему опыту. Эта трудность была блестяще объяснена кинетической теорией материи.

Если мы будем рассматривать воду даже через самый мощный микроскоп, мы не можем увидеть молекул и их движения, нарисованного нам кинетической теорией материи. Из этого можно заключить, что если представление о воде как о совокупности частиц и правильно, то величина этих частиц лежит за пределами видимости самых лучших микроскопов. Тем не менее останемся верными теории и предположим, что она представляет последоза-

тельную картину реальности. Броуновские частицы, видимые через микроскоп, бомбардируются меньшими частицами, составляющими воду. Если частицы достаточно малы, то возникает броуновское движение. Оно возникает потому, что эта бомбардировка неодинакова со всех сторон и не может быть уравновешена в силу своего хаотического и случайного характера. Таким образом, наблюдаемое движение есть результат движения ненаблюдаемого. Поведение больших частиц отражает некоторым образом поведение молекул, составляя, так сказать, увеличение столь большое, что оно становится видимым через микроскоп. Хаотичный и случайный характер пути броуновских частиц отражает хаотичность пути меньших частиц, которые составляют вещество. Из сказанного мы можем заключить, что количественное изучение броуновского движения может дать нам более глубокое проникновение в кинетическую теорию материи. Ясно, что видимое броуновское движение зависит от величины невидимых бомбардирующих молекул. Броуновского движения не было бы вовсе, если бы бомбардирующие молекулы не обладали определённым количеством энергии или, другими словами, если бы они не имели массы и скорости. Поэтому неудивительно, что изучение броуновского движения может привести к определению массы молекулы.

Благодаря трудолюбивому исследованию, и теоретическому, и экспериментальному, были получены количественные результаты кинетической теории. Идея, возникшая при изучении броуновского движения, была одной из тех, которая привела к количественным данным. Те же самые данные могут быть получены различными путями, исходя из совершенно различных предположений. Тот факт, что все эти методы являются опорой одного и того же воззрения, очень важен, ибо это показывает внутреннюю последовательность кинетической теории материи.

Здесь мы напомним лишь один из многих результатов, достигнутых экспериментом и теорией. Предположим, что мы имеем один грамм самого лёгкого из всех элементов — водорода — и спрашиваем: сколько частиц в этом грамме? Ответ будет характеризовать не только

водород, но и все другие газы, так как мы уже знаем, при каких условиях два газа имеют одинаковое число частиц.

Теория позволяет нам ответить на этот вопрос, исходя из известных измерений броуновского движения взвешенных частиц. Ответ представляет собой поразительно большое число: тройка, за которой следует двадцать три других цифры. Число молекул в одном грамме водорода таково:

303 000 000 000 000 000 000 000.

Вообразим, что молекулы грамма водорода так увеличились по своей величине, что стали видимыми через микроскоп, а их диаметр достиг одной двухтысячной сантиметра, то-есть таков же, как и диаметр броуновских частиц. Тогда для того чтобы тесно уложить их друг возле друга, мы должны были бы взять ящик, каждая сторона которого имеет длину около половины километра!

Мы легко можем подсчитать массу одной водородной молекулы, разделив единицу на вышеуказанное число. Ответ даёт фантастически малое число:

0,000 000 000 000 000 000 000 003 3 грамма,

представляющее массу молекулы водорода.

Эксперименты с броуновским движением являются лишь одними из многих независимых экспериментов, приводящих к определению этого числа, играющего чрезвычайно важную роль в физике.

В кинетической теории материи и во всех её важных достижениях мы видим осуществление общей философской программы: свести объяснение всех явлений к механическому взаимодействию между частицами материи.

Мы суммируем:

В механике будущий путь движущегося тела может быть предсказан, а его прошлое может быть раскрыто, если известны для данного момента условия движения тела и действующие на него силы. Так, например, могут быть предсказаны будущие пути всех планет. Дей-

ствующие на них силы суть ньютоновы силы тяготения, зависящие только от расстояния. Огромные результаты классической механики внушают нам мысль, что механистическое воззрение можно последовательно применить ко всем ветвям физики, что все явления можно объяснить действием сил, представляющих собой притяжение или отталкивание, зависящих только от расстояния и действующих между неизменными частицами.

В кинетической теории материи мы видим, как это воззрение, возникающее из механических проблем, охватывает явления теплоты и как оно приводит к преуспевающей картине строения материи.

II. УПАДОК МЕХАНИСТИЧЕСКОГО ВОЗЗРЕНИЯ

Две электрические жидкости. — Магнитные жидкости. — Первая серьёзная трудность. — Скорость света. — Свет как субстанция. — Загадка цвета. — Что такое волна? — Волновая теория света. — Продольны или поперечны световые волны? — Эфир и механистическое воззрение.

Две электрические жидкости

Последующие страницы содержат скучный отчёт о некоторых очень простых экспериментах. Отчёт будет скучным не только потому, что описание экспериментов неинтересно по сравнению с самим осуществлением их, но и потому, что самый смысл экспериментов не очевиден до тех пор, пока его не выяснит теория. Наша цель состоит в том, чтобы показать яркий пример, характеризующий роль теории в физике.

1. Пусть металлический стержень укреплен на стеклянной подставке, а концы стержня связаны с помощью металлических проводников с электроскопом. Что такое электроскоп? Это простой прибор, который в основном состоит из двух листочков золотой фольги, подвешенных на конце короткого металлического стержня. Они заключены в стеклянную банку или бутылку, так что металл находится в контакте только с неметаллическими телами, называемыми изоляторами. Кроме электроскопа и металлического стержня, в нашем распоряжении имеются твёрдая каучуковая палочка и кусок фланели.

До осуществления эксперимента обратим внимание на то, висят ли листочки сомкнутыми вместе, ибо это их нормальное положение, или нет. Если они случайно не сомкнуты, то прикосновение пальца к металлическому стержню сведёт их вместе. После того как эти предвари-

тельные мероприятия проделаны, каучуковая палочка энергично натирается фланелью и приводится в соприкосновение с металлом. Листочки сразу же разойдутся друг от друга. Они остаются в таком положении даже

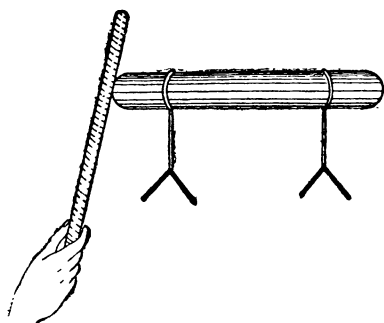


Рис. 23.

после того, — как каучуковая палочка будет отодвинута в сторону (рис. 23).

2. Проделаем другой эксперимент, используя те же приборы, что и раньше, но предварительно приведя листочки электроскопа в прежнее положение, когда они свободно висят, касаясь друг друга. Сейчас мы не будем касаться каучуковой палочкой металлического стержня, а

только поднесём её близко к металлу. Листочки электроскопа опять разделяются. Но это разделение листочков сейчас оказывается совсем иным. Когда каучуковая палочка удаляется, совсем не коснувшись металла, листочки вместо того, чтобы оставаться разделёнными, немедленно спадают, возвращаясь к своему нормальному положению.

3. Для третьего эксперимента слегка изменим приборы. Предположим, что металлический стержень состоит из двух кусков, соединённых вместе. Мы натираем каучуковую палочку фланелью и снова подносим её близко к металлу. Происходит то же явление, — листочки разделяются. Но теперь сначала отделим части металлического стержня друг от друга и только после этого удалим каучуковую палочку. Мы замечаем, что в этом случае листочки остаются разделёнными, а не спадают до своего нормального положения, как это было во втором эксперименте (рис. 24).

Едва ли эти простые и наивные эксперименты могут возбудить живейший интерес или энтузиазм. В средние века тот, кто их осуществлял, был бы, вероятно, осуждён; нам они кажутся и скучными и нелогичными. Было

бы очень трудно, не смущаясь, повторить их после чтения сухого отчёта об их выполнении. Некоторые теоретические рассуждения, однако, делают их понятными. Мы могли бы сказать больше: едва ли возможно представить себе такие эксперименты выполненными как осуществление случайной игры воображения, без предварительно существовавших более или менее определённых идей об их значении.

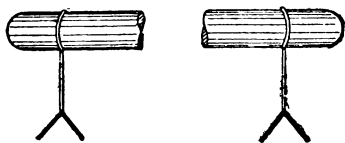


Рис. 24.

Теперь мы укажем идеи, лежащие в основе очень простой и наивной теории, объясняющей все описанные факты.

Существуют две электрические жидкости, одна называется положительной (+), а другая — отрицательной (—). Они подобны субстанциям в уже разъяснённом смысле: сумма их не может быть увеличена или уменьшена, так что целое сохраняется в любой изолированной системе. Имеется, однако, существенное отличие между этим случаем и случаем с теплотой, веществом или энергией. Мы имеем две электрические субстанции. Здесь невозможно применение предыдущей аналогии с деньгами, если не сделать некоторого обобщения. Тело электрически нейтрально, если положительная и отрицательная электрические жидкости полностью уничтожают друг друга. Человек ничего не имеет или потому, что у него действительно ничего нет, или потому, что сумма денег, отложенных в его сейфе, в точности равна сумме его долгов. С двумя родами электрических жидкостей мы можем сравнить дебет и кредит в бухгалтерских книгах.

Далее, теория полагает, что обе электрические жидкости одинакового рода отталкивают друг друга, в то время как обе жидкости противоположного рода притягивают. Это можно представить графически следующим образом (рис. 25).

Необходимо последнее теоретическое предположение:

Имеется два вида тел: тела, в которых жидкости могут двигаться свободно, — так называемые *проводники*, и

тела, в которых они не могут двигаться, — так называемые *изоляторы*. Как всегда бывает в таких случаях, это деление тел на два вида нельзя рассматривать слишком серьёзно. Идеальный проводник, как и идеальный изолятор, — это абстракции, которые никогда не могут быть реализованы. Металлы, земля, человеческое тело — всё это примеры проводников, хотя и неодинакового качества. Стекло, резина, фарфор и им подобные тела — это изоляторы. Воздух лишь частично является изолятором, как это знает тот, кто видел описанные эксперимен-

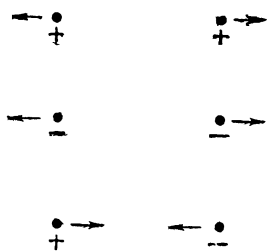


Рис. 25.

ты. Плохие результаты электростатических экспериментов часто объясняются влажностью воздуха, увеличивающей его проводимость.

Эти теоретические положения достаточны для объяснения трёх описанных экспериментов. Мы рассмотрим их ещё раз в том же порядке, как и раньше, но в свете теории электрических жидкостей.

1. Каучуковая палочка, как и все другие тела при нормальных условиях, электрически нейтральна. Она содержит обе жидкости, положительную и отрицательную, в равных количествах. Трением о фланель мы разделяем их. Это утверждение часто условно, ибо это есть приложение терминологии, созданной теорией, к описанию процесса трения. Тот вид электричества, который каучуковая палочка имеет в избытке, впоследствии был назван отрицательным, — название, которое, конечно, является лишь делом соглашения. Если бы эксперименты были осуществлены со стеклянной палочкой, натёртой кошачьим мехом, мы должны были бы назвать избыток электричества на ней положительным, чтобы не противоречить уже принятым положениям. Но продолжим рассказ. Мы передаём электрическую жидкость металлическому проводнику, касаясь его каучуком. В этом проводнике она движется свободно, распространяясь по всему металлу, включая и золотые листочки. Так как

отрицательные жидкости взаимно отталкиваются, то оба листочка стремятся удалиться друг от друга, насколько это возможно, в результате чего и наблюдается их разделение. Металл покоится на стеклянной подставке или каком-либо ином изоляторе, так что электрическая жидкость остаётся на проводнике, поскольку это допускает слабая проводимость воздуха. Теперь мы понимаем, почему мы должны коснуться металла пальцем в начале эксперимента. В этом случае металл, человеческое тело и земля составляют один большой проводник, по которому разливается электрическая жидкость, так что практически на электрооскопе ничего не остаётся.

2. Второй эксперимент начинается так же, как и первый. Но теперь каучук не касается металла, а лишь подносится к нему. Обе жидкости в проводнике, имея возможность свободно двигаться, разделяются; одна притягивается к палочке, а другая отталкивается. Они вновь смешиваются, когда каучуковый стержень удаляется, так как жидкости противоположного рода притягивают друг друга.

3. Затем в присутствии натёртой каучуковой палочки мы разделяем металлический стержень на две части и, наконец, удаляем палочку. В этом случае после удаления каучуковой палочки обе жидкости не смешиваются, так что золотые листочки сохраняют избыток одной электрической жидкости и остаются разделёнными.

В свете этой простой теории все упомянутые здесь факты кажутся понятными. Та же теория даёт больше, позволяя нам понять не только эти, но и многие другие «факты» в области «электростатики». Цель всякой теории — вести нас к новым фактам, наводить на мысль о новых экспериментах и приводить к открытию новых явлений и новых законов. Пример сделает это ясным. Представим себе изменение во втором эксперименте. Предположим, что я оставляю каучуковую палочку возле металла и в то же время касаюсь металла своим пальцем. Что теперь случится? Теория даёт ответ: отталкиваемая палочкой отрицательная (—) жидкость теперь может удалиться через моё тело, так что в результате в металлическом стержне остаётся только одна жидкость, положительная (+). Лис-

точки электроскопа остаются разделёнными. И действительно, эксперимент подтверждает это предсказание.

Теория, о которой мы сейчас рассказываем, конечно, наивна и не совпадает с точкой зрения современной физики. Тем не менее это хороший пример, показывающий характерные черты всякой физической теории.

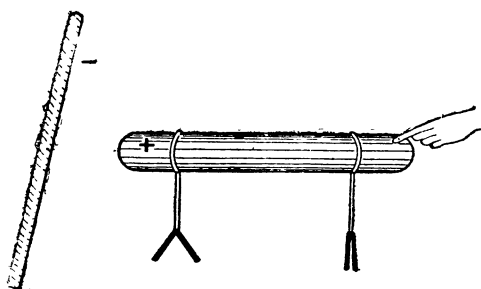


Рис. 26.

В науке нет вечных теорий. Всегда происходит так, что некоторые факты, предсказанные теорией, опровергаются экспериментом. Всякая теория имеет свой период постепенного развития и триумфа,

после которого она может испытать быстрый упадок. Подъём и падение субстанциональной теории теплоты, уже обсуждавшиеся здесь, являются одним из многих подобных примеров. Другие примеры, более глубокие и важные, будут обсуждаться позднее. Почти всякий большой успех в науке возникает из кризиса старой теории, благодаря попытке найти выход из создавшихся трудностей. Мы должны проверить старые идеи, старые теории, хотя они принадлежат прошлому, ибо это — единственное средство понять важность новых идей и границы их справедливости.

На первых страницах нашей книги мы сравнивали роль исследователя с ролью детектива, который, собрав необходимые факты, находит правильное решение посредством чистого мышления. В одном весьма существенном отношении это сравнение следует считать чрезвычайно поверхностным. И в жизни, и в детективных новеллах преступление дано. Детектив должен просмотреть письма, отпечатки пальцев, пули, ружья, но, по крайней мере, он знает, что убийство совершилось. Для учёного дело обстоит не так. Было бы нетрудно пред-

ставить себе человека, который ничего не знает об электричестве; все древние довольно счастливо жили, ничего не зная о нём. Пусть этому человеку будет дан металл, золотой листок, бутылки, каучуковая палочка, фланель, словом все материалы, необходимые для осуществления трёх наших экспериментов. Он может быть очень культурным лицом, но он, вероятно, нальёт в бутылки вино, использует фланель для чистки и никогда не проникнется вдруг идеей о том, чтобы проделать те эксперименты, которые мы описали. Для детектива факт преступления дан, и задача формулируется так: кто убил Кука Робина? Учёный должен, по крайней мере, отчасти сам совершить преступление, затем довести до конца исследование. Более того, его задача состоит в том, чтобы объяснить не один только данный случай, а все связанные с ним явления, которые происходили или могут ещё произойти.

В факте введения понятия жидкостей мы видим влияние тех механистических идей, которые стремятся всё объяснить с помощью субстанций и простых сил, действующих между ними. Чтобы видеть, можно ли механистическую точку зрения применить к описанию электрических явлений, мы должны рассмотреть следующую проблему. Пусть даны два небольших шара, имеющих электрический заряд, то-есть несущих избыток какой-то одной электрической жидкости. Мы знаем, что шары будут либо притягивать, либо отталкивать друг друга. Но зависит ли сила только от расстояния и если да, то как? Самым простым будет предположение, что эта сила зависит от расстояния так же, как и сила тяготения, которая уменьшается, скажем, до одной девятой своей первоначальной величины, если расстояние увеличивается в три раза. Эксперименты, проделанные Кулоном, показали, что этот закон действительно справедлив. Спустя сто лет после Ньютона, открывшего закон тяготения, Кулон обнаружил такую же зависимость электрической силы от расстояния. Но закон Ньютона и закон Кулона существенно различаются в следующих двух отношениях. Гравитационное притяжение существует всегда, в то время как электрические силы существуют только

в том случае, если тела обладают электрическими зарядами. В законе тяготения имеется только притяжение, а электрические силы могут как притягивать, так и отталкивать.

Здесь возникает тот же самый вопрос, который мы рассматривали в связи с теплотой. Являются ли электрические жидкости невесомыми субстанциями или нет? Другими словами, будет ли вес куска металла одинаков, когда он нейтрален и когда он заряжен? Весы никакого различия не обнаруживают. Мы заключаем, что электрические жидкости тоже являются членами семейства невесомых субстанций.

Дальнейший прогресс в теории электричества требует введения двух понятий. Мы опять будем избегать строгих определений, используя вместо них аналогии с уже известными понятиями. Мы помним, как существенно было для понимания тепловых явлений различие между самой теплотой и температурой. Равным образом и здесь важно различать электрический потенциал и электрический заряд. Различие между обоими понятиями становится ясным из следующей аналогии:

Электрический потенциал — Температура
Электрический заряд — Теплота

Два проводника, например два шара различной величины, могут иметь одинаковый заряд, то-есть одинаковый избыток электрической жидкости, но потенциал будет различным в обоих случаях, а именно: он выше для меньшего шара и ниже для большего. Электрическая жидкость будет иметь большую плотность и, стало быть, будет более сжата на малом проводнике. Так как отталкивательные силы должны с плотностью возрастать, то тенденция заряда улетучиться будет больше в меньшем шаре, чем в большем. Эта тенденция заряда убежать с проводника есть непосредственное выражение его потенциала. Чтобы ясно показать различие между зарядом и потенциалом, мы сформулируем несколько предложений, описывающих поведение нагретых тел, и соответствующие им предложения, касающиеся заряженных проводников.

Т е п л о т а

Два тела, имеющих вначале различную температуру, спустя некоторое время после того, как они приведены в соприкосновение, достигают одной и той же температуры.

Равные количества теплоты производят различные изменения температуры в двух телах, если теплоёмкости этих тел различны.

Термометр, находящийся в контакте с каким-либо телом, длиной своего ртутного столбика показывает свою собственную температуру, а вместе с тем и температуру тела.

Но такую аналогию нельзя продолжать слишком далеко. Следующий пример показывает как сходство, так и различие. Если горячее тело приведено в контакт с холодным, то теплота течёт от горячего к холодному телу. Предположим, с другой стороны, что мы имеем два изолированных проводника, имеющих равные, но противоположные заряды, положительный и отрицательный. Оба — при разных потенциалах. Согласились считать потенциал, соответствующий отрицательному заряду, более низким, чем потенциал, соответствующий положительному. Если оба проводника сдвинуты до соприкосновения друг с другом или соединены проволокой, то из теории электрических жидкостей следует, что они

Э л е к т р и ч е с т в о

Два изолированных проводника, имеющих вначале различные потенциалы, очень скоро после того, как они приведены в соприкосновение, достигают одного и того же потенциала.

Равные величины электрических зарядов производят различные изменения электрических потенциалов в двух телах, если электрические ёмкости тел различны.

Электроскоп, находящийся в контакте с каким-либо проводником, разделением золотых листочков показывает свой собственный электрический потенциал, а вместе с тем и электрический потенциал проводника.

не покажут никакого заряда, а это означает, что никакой разности электрических потенциалов нет вовсе. Мы должны представить себе, что «течение» электрического заряда от одного проводника к другому совершается за очень короткое время, в течение которого разность потенциалов уравнивается. Но как это происходит? Течёт ли положительная жидкость к отрицательно заряженному телу или отрицательная — к положительно заряженному?

В фактах, которые здесь разбирались, мы не видели никакого основания для решения этого вопроса. Мы можем предположить осуществляющейся либо одну из этих возможностей, либо и ту и другую, считая, что течение электричества совершается одновременно в обоих направлениях. Это вопрос лишь о том, какое принять соглашение, и нельзя придавать значения выбору, ибо мы знаем, что нет никакой возможности эксперименталь-

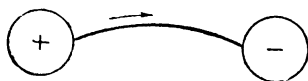


Рис. 27.

но решить этот вопрос. Дальнейшее развитие, ведущее к гораздо более глубокой теории электричества, дало решение этой проблемы, которая совершенно бессмысленна, пока она сформулирована в пределах примитивной теории электрических жидкостей. В дальнейшем мы будем придерживаться следующего способа выражения: электрические жидкости текут от проводника с более высоким потенциалом к проводнику с более низким потенциалом. Таким образом в случае наших двух проводников электричество течёт от положительно заряженного проводника к отрицательно заряженному. Это выражение — исключительно дело соглашения и с этой точки зрения совершенно произвольно.

Все эти затруднения показывают, что аналогия между теплотой и электричеством ни в коем случае не является полной.

Мы видели, какова возможность приспособления механистического воззрения к описанию элементарных фактов электростатики. То же самое возможно и в отношении магнитных явлений.

Магнитные жидкости

Мы будем поступать здесь так же, как и раньше, начиная с очень простых фактов, а затем разыскивая их теоретическое объяснение.

1. Пусть у нас имеются два длинных магнита; один из них свободно подвешен за середину так, что он занимает горизонтальное положение, а другой мы возьмём в руку. Если концы обоих магнитов поднесены друг к другу, то между ними обнаруживается сильное притяжение. Это можно всегда наблюдать (рис. 28). Если притяжение не имеет места, мы должны повернуть магнит и попробовать другой конец. Концы магнитов называются их *полюсами*. Продолжая эксперимент,

мы двигаем полюс магнита, который держим в руке, вдоль другого магнита. При этом наблюдается уменьшение притяжения, а когда полюс достигает

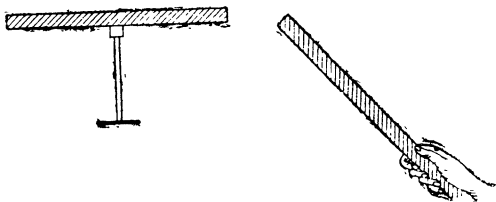


Рис. 28.

середины подвешенного магнита, то вообще никакого проявления сил нет. Если полюс движется дальше в том же направлении, то наблюдается отталкивание, достигающее наибольшей силы у второго полюса подвешенного магнита.

2. Приведённый выше пример наводит на следующую мысль. Каждый магнит имеет два полюса. Нельзя ли изолировать один из них? Осуществление этой идеи кажется очень простым, а именно: разломить магнит на две равные части. Мы видели, что никакого взаимодействия между полюсом одного магнита и серединой другого магнита нет. Но если мы действительно разломим магнит, то результат окажется весьма удивительным и неожиданным. Если мы повторим эксперимент, описанный под номером 1, но лишь с половиной подвешенного магнита, то результаты будут совершенно те же

самые, как и раньше. Там, где раньше не было никакого следа магнитной силы, теперь находится сильный полюс.

Как следует объяснить эти факты? Мы можем попробовать набросать теорию магнетизма, аналогичную теории электрических жидкостей. Это внушено тем обстоятельством, что здесь, как и в электрических явлениях, мы имеем и притяжение, и отталкивание. Вообразим себе два проводника в форме шаров, обладающих равными зарядами, один — положительным, а другой — отрицательным. Здесь слово «равные» означает величины, имеющие одинаковое абсолютное значение: например, $+5$ и -5 имеют одинаковое абсолютное значение. Предположим, что шары связаны посредством изолятора, например стеклянного стержня. Схематически это устройство может быть

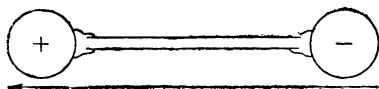


Рис. 29.

представлено стрелкой, направленной от отрицательно заряженного проводника к положительно заряженному. Мы назовём это электрическим диполем.

Ясно, что два таких ди-

поля вели бы себя совершенно так же, как и магнитные стержни в эксперименте I. Если мы рассматриваем наше изобретение как модель реального магнита, мы можем сказать, предполагая существование магнитных жидкостей, что магнит — это не что иное, как магнитный диполь, имеющий на своих концах две жидкости разных родов. Эта простая теория, подражающая теории электричества, вполне подходит для объяснения первого эксперимента. По этой теории должно быть притяжение на одном конце, отталкивание на другом и уравнивание равных и противоположных сил в середине. Но как обстоит дело со вторым экспериментом? Разламывая стеклянный стержень электрического диполя, мы получаем два изолированных полюса. То же самое должно было бы иметь

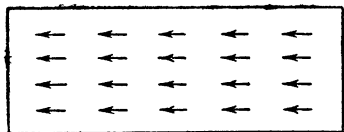


Рис. 30.

разламывая стеклянный стержень электрического диполя, мы получаем два изолированных полюса. То же самое должно было бы иметь

место и для железного стержня магнитного диполя, что противоречит результатам второго эксперимента. Таким образом, это противоречие вынуждает нас ввести несколько более точную теорию. Вместо нашей первоначальной модели мы можем представить себе, что магнит состоит из *очень малых элементарных* магнитных диполей, которые не могут быть разрушены на отдельные полюсы. Во всём магните господствует порядок, ибо все элементарные диполи в нём имеют одинаковое направление. Мы непосредственно видим, почему разрезание магнита вызывает появление двух новых полюсов на новых концах и почему эта более тонкая теория объясняет факты как эксперимента 1, так и эксперимента 2.

Многие факты можно объяснить и без этого уточнения теории. Возьмём пример: мы знаем, что магнит притягивает куски железа. Почему? В куске обычного железа обе магнитные жидкости смешаны так, что не обнаруживается никакого чистого эффекта. Поднесение положительного полюса действует как «приказ к разделению» жидкостей в результате притяжения отрицательной жидкости железа и отталкивания положительной. В конечном счёте возникает притяжение между железом и магнитом. Если магнит отодвинут, жидкости более или менее возвращаются к своему первоначальному положению, что зависит от степени их «вспоминания» о приказывающем голосе внешней силы.

Необходимо немного сказать о количественной стороне проблемы. Имея два очень длинных магнитных стержня, мы могли бы исследовать притяжение (или отталкивание) их полюсов, когда они близко поднесены друг к другу. Если стержни достаточно длинны, то действие других концов стержней ничтожно. Как зависит притяжение или отталкивание от расстояния между полюсами? Ответ, данный экспериментом Кулона, таков: зависимость от расстояния та же, что и в законе тяготения Ньютона, и в законе электростатики Кулона.

Мы опять видим в этой теории приложение общей точки зрения: тенденцию описать все явления посредством сил притяжения и отталкивания, зависящих только от расстояния и действующих между неизменными частицами.

Здесь следовало бы упомянуть один хорошо известный факт, который мы используем в дальнейшем. Земля — это большой магнитный диполь. Нет ни малейшего намёка на объяснение того, почему это так. Северный географический полюс почти совпадает с отрицательным (—) магнитным полюсом, а Южный географический полюс — с положительным (+) магнитным. Названия положительный и отрицательный — это дело лишь соглашения, но, поскольку они так однажды обозначены, это вынуждает нас и в любых других случаях соответственно различать полюсы. Магнитная игла, насаженная на вертикальную ось, подчиняется «приказу» магнитной силы Земли. Она направляет свой (+) полюс к Северному географическому полюсу, то-есть по направлению к (—) магнитному полюсу Земли.

Хотя в области электрических и магнитных явлений, указанных здесь, мы можем последовательно провести механистическую точку зрения, нет никакого основания гордиться этим или радоваться этому. Некоторые черты этой теории являются, конечно, неудовлетворительными, если не обескураживающими. Мы должны были изобрести новые виды субстанций: две электрические жидкости и элементарные магнитные диполи. Изобилие субстанций начинает становиться чрезмерным.

Силы просты. Они одинаково выражены для тяготения, электричества и магнетизма. Но цена, уплаченная за эту простоту, высока: введение новых невесомых субстанций. Они являются довольно искусственными понятиями и совершенно не связаны с основной субстанцией — массой.

Первая серьёзная трудность

Мы уже готовы к тому, чтобы отметить первую серьёзную трудность в приложении нашей общей философской точки зрения. Позднее будет показано, что эта трудность, совместно с другими, ещё более серьёзными, привела к полному разрушению уверенности в том, что все явления могут быть объяснены механистически.

Особенно быстрое развитие электричества как ветви науки и техники началось с открытия электрического

тока. Здесь мы находим в истории науки один из очень немногих примеров, в которых случай сыграл существенную роль. История конвульсий лягушечьей лапки рассказана во многих вариантах. Не считаясь с достоверностью в отношении деталей, можно сказать, что нет никакого сомнения, что случайное открытие Гальвани привело Вольту в конце восемнадцатого столетия к построению прибора, известного под названием *вольтовой батареи*. Теперь она практически не употребляется, но на неё ещё указывают как на очень простой пример источника тока в школьных демонстрациях и в учебниках.

Принцип её построения прост. Берётся несколько стеклянных стаканов, из которых каждый содержит воду и немного серной кислоты. В каждом стакане имеются две металлические пластинки — одна медная, а другая цинковая, — погружённые в раствор. Медная пластинка одного стакана соединена с цинковой следующего, так что только цинковая пластинка первого стакана и медная последнего остаются не соединёнными. Мы можем обнаружить разность электрических потенциалов медной пластинки первого стакана и цинковой последней посредством весьма чувствительного электроскопа, если число «элементов», то-есть число стаканов с пластинками, составляющими батарею, достаточно велико.

Мы ввели батарею, составленную из некоторых элементов только для того, чтобы получить нечто, легко измеряемое уже описанным прибором. Для дальнейших рассуждений с таким же успехом будет служить один элемент. Обнаруживается, что потенциал меди выше, чем потенциал цинка. Слово «выше» употребляется здесь в том же смысле, в каком $+2$ больше, чем -2 . Если один проводник связан со свободной медной пластинкой, а другой с цинком, оба станут заряженными, первый положительно, а второй отрицательно. В этой стадии рассуждений ничего особенно нового или поразительного не появилось, и мы можем попробовать применить наши предыдущие представления о разности потенциалов. Мы видели, что разность потенциалов между двумя проводниками можно быстро уничтожить посредством соединения проводников проволокой, в которой возникает по-

ток электрической жидкости от одного проводника к другому. Этот процесс был уподоблен выравниванию температур посредством теплового потока. Но производит ли поток в вольтовой батарее работу?

По словам Вольта, пластинки ведут себя как проводники:

«...слабо заряженные, которые действуют непрерывно или так, что их заряд после каждого разряда вновь восстанавливается; которые, одним словом, снабжают неограниченным зарядом или производят непрерывное действие или импульс электрической жидкости».

Результат этого эксперимента удивителен потому, что разность потенциалов между медной и цинковой пластинками не уменьшается, как в случае двух заряженных проводников, связанных проволокой. Разность эта остаётся неизменной, а следовательно, согласно теории жидкостей должен возникать постоянный поток электрической жидкости от высшего потенциального уровня (медная пластинка) к низшему (цинковая пластинка). Пытаясь спасти теорию жидкостей, мы можем предположить, что действует некоторая постоянная сила, которая возрождает разность потенциалов и вызывает поток электрической жидкости. Но явление в целом удивительно, если рассматривать его с энергетической точки зрения. В проволоке, по которой течёт ток, порождается заметное количество теплоты, достаточное даже для того, чтобы расплавить проволоку, если она тонка. Поэтому в проволоке создаётся тепловая энергия. Но вся вольтова батарея образует изолированную систему, так как она не получает энергии извне. Если мы хотим спасти закон сохранения энергии, мы должны найти место, где происходят превращения, за счёт которых создаётся теплота. Нетрудно установить, что в батарее происходят сложные химические процессы, в которых активное участие принимают как сама жидкость, так и погружённые в неё медь и цинк. С энергетической точки зрения здесь имеется цепь превращений: химическая энергия → энергия текущей электрической жидкости, то-есть тока, → теплота. Вольтова батарея не сохраняется вечно, химические изменения, связанные с потоком электричества, после некоторого времени делают батарею неработоспособной.

Эксперимент, который по-настоящему обнаружил большие трудности в применении механистических идей, должен для впервые слушающего о нём звучать странно. Он осуществлён Эрстедом около ста двадцати лет назад. Последний пишет:

«Этими экспериментами, кажется, показано, что магнитная игла сдвигалась из своего положения с помощью гальванического прибора и именно тогда, когда гальваническая цепь была замкнута, но не разомкнута, как напрасно считали несколько лет назад некие очень известные физики».

Предположим, что мы имеем вольтовую батарею и кусок металлической проволоки. Если проволока соединена с медной пластинкой, но не связана с цинковой, то существует разность потенциалов, но ток течь не может. Предположим, что проволока изогнута в форме кольца, в центре которого расположена магнитная игла, причём как проволоочное кольцо, так и игла лежат в одной и той же плоскости. Пока проволока не прикасается к цинковой пластинке, ничего не происходит. Никаких действующих сил нет, наличие разности потенциалов не оказывает влияния на положение иглы. Кажется трудным понять, почему «очень известные физики», как выразился Эрстед, ожидали такого влияния.

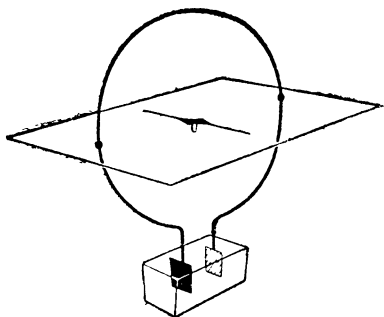


Рис. 31.

Соединим теперь проволоку с цинковой пластинкой. Немедленно произойдут странные вещи. Магнитная игла выходит из своего первоначального положения. Один из её полюсов направлен теперь к читателю, если страница этой книги представляет плоскость кольца (рис. 31). Эффект показывает, что на магнитный полюс действует сила, *перпендикулярная* к плоскости кольца. Перед лицом экспериментальных фактов мы едва ли можем избежать такого вывода о направлении действующей силы.

Этот эксперимент интересен в первую очередь тем, что он показывает связь между двумя на первый взгляд совершенно различными явлениями — магнетизмом и электрическим током. Имеется и другая, даже более важный момент. Сила взаимодействия между магнитным полюсом и малыми отрезками проволоки, по которой течёт ток, не может лежать вдоль линии, связывающей проволоку и иглу или частицы текущей электрической жидкости и элементарные магнитные диполи. Сила перпендикулярна к этой линии! Впервые появляется сила, совершенно отличная от тех сил, к которым, соответственно нашей ме-

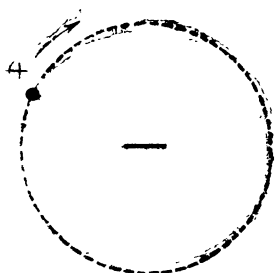


Рис. 32.

ханистической точке зрения, мы стремились свести все действия внешнего мира. Мы помним, что силы тяготения, электростатики, магнетизма, подчиняющиеся законам Ньютона и Кулона, действуют вдоль линии, соединяющей оба притягивающихся или отталкивающихся тела.

Эта трудность была ещё более подчеркнута экспериментом, который с большим искусством осуществлён Роуландом почти шестьдесят лет назад. Оставляя в стороне технические детали, мы могли бы описать этот эксперимент следующим образом. Вообразим себе маленький заряженный шар (рис. 32). Представим себе далее, что этот шар очень быстро движется по окружности, в центре которой находится магнитная игла. Принципиально этот эксперимент таков же, что и эксперимент Эрстеда, единственное отличие состоит в том, что вместо обычного тока мы имеем механически совершающееся движение электрического заряда. Роуланд нашёл, что результат в самом деле подобен тому, который наблюдался, когда по витку проволоки протекал ток. Магнит отклоняется перпендикулярной силой.

Пусть теперь заряд движется быстрее. В результате, сила, действующая на магнитный полюс, возрастает; отклонение магнита от его начального положения становится более заметным. Это наблюдение представляет

новое большое усложнение. Сила не только не совпадает с линией, связывающей заряд и магнит, но и интенсивность её зависит от скорости заряда. Вся механистическая точка зрения базировалась на уверенности в том, что все явления могут быть объяснены в пределах сил, зависящих только от расстояния, а не от скорости. Результат эксперимента Роуланда, конечно, подрывает эту уверенность. Всё же мы можем попробовать остаться консервативными и искать решения в рамках старых идей.

Трудности этого рода, внезапные и неожиданные препятствия в триумфальном развитии теории, часто вырастают в науке. Иногда простое обобщение старых идей оказывается, по крайней мере временно, хорошим выходом. Например, в настоящем случае казалось бы достаточным расширить предыдущую точку зрения и ввести более общее понятие сил, действующих между элементарными частицами. Однако, очень часто оказывается невозможным подправить старую теорию, и трудности приводят к её упадку и к подъёму новой. В данном случае сыграло роль не только поведение ничтожной магнитной иглы, которая разрушила на первый взгляд хорошо обоснованные и преуспевающие механистические теории. Другой удар, ещё более энергичный, был нанесён с совершенно другой стороны. Но это другая история, и мы расскажем её позднее.

Скорость света

В галилеевых *Беседах о двух новых науках* мы находим разговор учителя и его учеников о скорости света:

С а г р е д о: Но какого рода и насколько большой должны мы считать эту скорость света? Является ли движение света мгновенным или же, подобно движению других тел, оно требует времени? Можем ли мы решить это с помощью эксперимента?

С и м п л и ч и о: Повседневный опыт показывает, что распространение света мгновенно, ибо, когда мы наблюдаем на большом расстоянии действие артиллерии, то пламя достигает наших глаз без потери времени, а звук достигает уха лишь через значительный промежуток времени.

С а г р е д о: Ну, Симпличио, я в состоянии вывести из этого общеизвестного опыта лишь то, что звук, достигая

наших ушей, путешествует медленнее, чем свет; это не говорит ещё о том, распространяется ли свет мгновенно или же, хотя он и движется чрезвычайно быстро, но всё же требует времени...

С а л в и а т и: Малая доказательность этих и других подобных наблюдений однажды заставила меня изобрести метод, с помощью которого можно было бы точно удостовериться в том, является ли освещение, то-есть распространение света, действительно мгновенным...

Далее Сальвиати продолжает объяснять метод своего эксперимента. Для того чтобы понять его идею, представим себе, что скорость света не только конечна, но и мала, что движение света замедлилось подобно тому, как может замедлиться на экране реальное движение при просмотре медленно движущегося фильма. Два человека, *А* и *В*, держат закрытые фонари и стоят, скажем, на расстоянии одного километра друг от друга. Первый человек, *А*, открывает свой фонарь. Оба они согласились, что *В* откроет свой фонарь в момент, когда он увидит свет *А*. Предположим, что в нашем «медленном движении» свет проходит один километр в секунду. *А* посылает сигнал, открывая свой фонарь, *В* видит это спустя секунду и посылает ответный сигнал. Этот сигнал получается *А* спустя две секунды после того, как он послал свой сигнал. То-есть, если свет движется со скоростью одного километра в секунду, то протечёт две секунды между посылкой и приёмом сигналов *А*, если предположить, что *В* находится на расстоянии одного километра. Наоборот, если *А* не знает скорости света, но предполагает, что его компаньон действует согласованно, и он заметил, что *В* открыл фонарь две секунды спустя после того, как он открыл свой, то он может заключить, что скорость света равна одному километру в секунду.

При той экспериментальной технике, которая была во времена Галилея, он имел мало шансов определить скорость света таким путём. Если расстояние было порядка одного километра, то он должен был бы определять промежутки времени порядка одной стотысячной секунды.

Галилей сформулировал проблему определения скорости света, но он не разрешил её. Формулировка про-

блемы часто более существенна, чем её разрешение, которое может быть делом лишь математического или экспериментального искусства. Постановка новых вопросов, развитие новых возможностей, рассмотрение старых проблем под новым углом зрения требуют творческого воображения и отражают действительный успех в науке. Принцип инерции, закон сохранения энергии были получены только благодаря новым и оригинальным идеям в отношении уже хорошо известных экспериментов и явлений. Много примеров такого рода можно найти на последующих страницах этой книги, где будет подчеркнута важность рассмотрения известных фактов в новом свете и будут описаны новые теории.

Возвращаясь к сравнительно простому вопросу об определении скорости света, мы можем заметить, что удивительно, почему Галилей не установил, что его эксперимент мог бы быть осуществлён значительно проще и точнее одним человеком. Вместо того, чтобы ставить на некотором расстоянии от себя своего компаньона, он мог бы установить там зеркало, которое автоматически отбрасывало бы сигнал сразу же после его получения.

Около двухсот пятидесяти лет спустя зеркало использовал Физо, который был первым, кто определил скорость света с помощью экспериментов со светом, исходящим от земного источника. С помощью астрономических наблюдений скорость света была определена Рёмером гораздо раньше, хотя и с меньшей точностью.

Совершенно ясно, что благодаря своей огромной величине скорость света могла быть измерена только при условии, если расстояния были сравнимы с расстояниями между Землёй и другими планетами солнечной системы, или же с помощью весьма утончённой экспериментальной техники. Первый метод — это метод Рёмера, второй же — метод Физо. Со времени этих первых экспериментов скорость света, представляющая весьма важную величину, измерялась много раз со всё возрастающей точностью. В наше время для этой цели была изобретена Майкельсоном весьма утончённая аппаратура. Результат этих экспериментов можно выразить просто: скорость света в вакууме примерно равна 300 000 километров в секунду.

Свет как субстанция

Мы опять начинаем с нескольких экспериментальных фактов. Только что приведённая величина относится к скорости света *в вакууме*. Свет распространяется с этой скоростью в пустом пространстве. Мы можем видеть и через пустой стеклянный сосуд, когда из него удалён воздух. Мы видим планеты, звёзды, небесные тела,

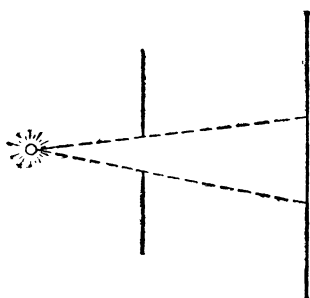


Рис. 33.

хотя свет доходит от них к нашим глазам через пустое пространство. Тот простой факт, что мы можем видеть через стеклянный сосуд, независимо от того, имеется ли внутри его воздух или нет, показывает нам, что наличие воздуха имеет весьма малое значение. На этом основании мы можем осуществлять оптические эксперименты в обыкновенной комнате с тем же самым эффектом, как если бы там не было воздуха.

Один из наиболее простых оптических фактов — это прямолинейное распространение света. Опишем примитивные эксперименты, показывающие это. Перед точечным источником помещён экран с отверстием. Точечный источник — это очень малый источник света, скажем, маленькое отверстие в закрытом фонаре. На отдалённой стене отверстие в экране будет представлено в виде светлого пятна на тёмном фоне. Рисунок 33 показывает, как это явление связано с прямолинейным распространением света. Все подобные явления, даже в более сложных случаях, в которых кроме света и тени появляются ещё и полутени, можно объяснить, если предположить, что и в вакууме, и в воздухе свет распространяется по прямым линиям.

Возьмём другой случай, когда свет проходит через вещество. Пусть световой пучок проходит через вакуум и падает на стеклянную пластинку. Что происходит? Если бы закон прямолинейного движения был

попрежнему справедлив, то путь светового пучка шёл бы вдоль линии, указанной на рисунке 34 пунктиром. Но в действительности это не так. Луч преломляется, как указано на рисунке. Явление, которое мы здесь наблюдаем, называется *рефракцией* (*преломлением*). Одной из многих демонстраций рефракции является известный опыт с палкой, которая, будучи наполовину опущенной в воду, кажется переломленной.

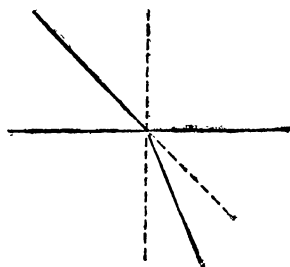


Рис. 34.

Этих фактов достаточно для того, чтобы построить элементарную механистическую теорию света. Наша цель здесь — показать, как идеи субстанции, частиц и сил проникают в область оптики и как, наконец, разрушается старая философская точка зрения.

Теория высказывается здесь в её самой простой и самой примитивной форме. Предположим, что все светящиеся тела испускают частицы света или корпускулы, которые, падая на наши глаза, производят в них ощущение света. Мы уже настолько приучены вводить новые субстанции, если это необходимо для механистического объяснения, что можем сделать это ещё раз без больших колебаний. Эти корпускулы, двигаясь по инерции, должны проходить по прямым линиям через пустое пространство с известной скоростью, принося к нашим глазам сообщения от тел, испускающих свет. Все явления, показывающие прямолинейное

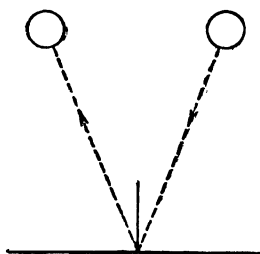


Рис. 35.

распространение света, подкрепляют корпускулярную теорию света, ибо именно этот вид движения предписан корпускулам. Теория объясняет очень просто и отражение света зеркалом; это отражение такого же рода, как и отражение, обнаруживаемое в механических экспериментах с упругими мячами, ударяющимися в стену, как показывает рисунок 35;

Объяснение рефракции немного труднее. Не входя в детали, мы всё же видим возможность её механистического объяснения. Если корпускулы падают, например, на поверхность стекла, то возможно, что на них действует сила, создаваемая частицами вещества, которая, правда, довольно странна, ибо действует только в непосредственном соседстве с веществом. Как мы знаем, любая сила, действующая на движущуюся частицу, изменяет её скорость. Если сила, действующая на световую корпускулу, есть притяжение, перпендикулярное к поверхности стекла, то новое движение луча будет где-то между линией первоначального пути и перпендикуляром к поверхности стекла. Кажется, что это элементарное объяснение обещает успех корпускулярной теории света. Однако, чтобы определить полезность и степень справедливости этой теории, мы должны исследовать новые и более сложные факты.

Загадка цвета

Всё богатство цветов в природе впервые объяснил не кто иной, как всё тот же гениальный Ньютон. Здесь мы даём описание одного из экспериментов Ньютона в его собственных словах:

«В начале 1666 года (в это время я занимался шлифовкой стёкол иных форм, чем сферические) я достал треугольную стеклянную призму, чтобы с нею произвести опыты над знаменитым явлением цветов. Для этой цели, затемнив свою комнату и проделав небольшое отверстие в оконных ставнях для пропускания в нужном количестве солнечного света, я поместил призму там, где входил свет, так что он мог преломляться к противоположной стене. Зрелище живых и ярких красок, получавшихся при этом, доставляло мне приятное удовольствие».

Солнечный свет — «белый». После прохождения через призму обнаруживаются все цвета, которые существуют в видимом мире. Сама природа воспроизводит те же самые результаты в прекрасной цветной дуге — радуге. Попытки объяснить это явление очень стары. Библейская легенда о том, что радуга — это божественный знак примирения с человеком, — это, в некотором смысле, тоже «теория». Но она не даёт удовлетворительного объ-

яснения, почему радуга время от времени повторяется и почему её появление всегда связано с дождём. Вся загадка цвета впервые подверглась научному обсуждению, и разрешение её было намечено в великой работе Ньютона.

Один край радуги всегда красный, а другой — фиолетовый. Между ними расположены все другие цвета. Приведём ньютоновское объяснение этого явления. Каждый цвет уже представлен в белом свете. Все цвета передаются через межпланетное пространство и атмосферу в унисон и дают эффект в виде белого света. Белый свет — это, так сказать, смесь разнородных корпускул, принадлежащих к разным цветам. В эксперименте Ньютона призма разделяет их в пространстве. Согласно механической теории, рефракция (преломление) обязана силам, которые происходят от частиц стекла и действуют на частицы света. Эти силы различны для частиц, принадлежащих к различным цветам, они наибольшие для фиолетового и наименьшие для красного. Путь корпускул каждого отдельного цвета будет преломляться по-своему и будет отделяться от других, когда свет покидает призму. В радуге роль призмы играют капли воды.

Субстанциональная теория света теперь более усложнена, чем прежде. Мы имеем уже не одну световую субстанцию, а множество, и каждая из них относится к отдельному цвету. Однако, если в теории имеется доля правды, её следствия должны согласоваться с наблюдением.

Серии цветов в белом солнечном свете, обнаруженные экспериментом Ньютона, называются *солнечным спектром* или, точнее, его *видимым спектром*. Описанное здесь разложение белого света на составляющие его компоненты называется *дисперсией* света. Разделённые цвета спектра можно было бы смешать снова вместе с помощью второй, должным образом приспособленной, призмы, если только данное объяснение не является ложным. Процесс был бы как раз обратным предыдущему. Мы получили бы белый свет из цветов, разделённых ранее. Ньютон экспериментально подтвердил, что в самом деле возможно этим путём получить белый свет из

его спектра, а спектр из белого света, столько раз, сколько кому хочется. Эти эксперименты создали строгую основу для теории, в которой корпускулы, принадлежащие каждому цвету, ведут себя как неизменяемые субстанции. По этому поводу Ньютон писал:

«... эти цвета не порождены вновь, а лишь стали видными благодаря разделению, ибо, если их снова полностью смешать вместе, то они вновь составят тот свет, который они составляли до разделения. По той же причине изменения, которые получаются при соединении различных цветов, не реальны, ибо, если различные лучи вновь разъединить, они будут проявлять точно те же цвета, как и до вхождения в смесь. Как вы знаете, синие и жёлтые порошки при тонком смешивании кажутся невооружённому глазу зелёными, и всё же цвета составляющих частиц не изменились в действительности, а лишь смешались. Ибо, если посмотреть в хороший микроскоп, они попрежнему будут казаться только синими и жёлтыми».

Предположим, что мы выделили очень узкую полосу спектра. Это означает, что из всего множества цветов мы позволили лишь одному пройти сквозь щель, другие же задержали экраном. Луч, который проходит сквозь щель, будет состоять из однородного света, то-есть света, который не может быть разделён на дальнейшие компоненты. Это следствие теории и его легко можно проверить экспериментально. Такой луч однородного цвета никаким путём нельзя разделить дальше. Имеется простой способ получения источника однородного света. Например, натрий, будучи раскалён, испускает однородный жёлтый свет. Производить обычные оптические эксперименты с однородным светом часто очень удобно, ибо легко понять, что в этом случае результат будет гораздо проще.

Представим себе, что внезапно произошло очень странное событие: наше солнце стало испускать только однородный свет некоторого определённого цвета, скажем, жёлтого. Тогда огромное многообразие цветов на земле немедленно исчезло бы. Всё выглядело бы либо жёлтым, либо чёрным.

Это предсказание есть следствие субстанциональной теории света, ибо новые цвета не могут быть созданы.

Справедливость его можно проверить экспериментально: в комнате, где единственным источником света является раскалённый натрий, всё кажется либо жёлтым, либо чёрным. Богатство красок в мире отражает многообразие цветов, из которых состоит белый свет.

Субстанциональная теория света во всех этих случаях действует блестяще, хотя необходимость введения стольких субстанций, сколько имеется цветов, может нас несколько беспокоить. Предположение, что все корпускулы света имеют одну и ту же скорость в пустом пространстве, также кажется очень искусственным.

Вполне можно представить себе, что другой ряд положений, теория совершенно другого характера, действовала бы столь же хорошо и давала бы все необходимые объяснения. В самом деле, скоро мы убедимся в наличии другой теории, основанной на совершенно иных понятиях и всё же объясняющей ту же самую область оптических явлений. Однако, прежде чем сформулировать положения, лежащие в основе этой новой теории, мы должны осветить вопрос, никак не связанный с этими оптическими явлениями. Мы должны вернуться к механике и спросить:

Что такое волна?

Какая-нибудь сплетня, начавшаяся в Лондоне, очень быстро доходит до Эдинбурга несмотря на то, что в пространстве её принимало участие не одно только лицо, передвигавшееся между этими двумя городами. Имеются два совершенно различных способа передачи или движения слухов из Лондона в Эдинбург и движения лиц, передающих слух.

Ветер, проносясь над хлебными полями, создаёт волны, которые распространяются по всему полю. И здесь мы должны различать между движением волны и движением отдельных растений, которые совершают лишь малые колебания. Все мы видели волны, которые распространяются всё более и более широкими кругами, когда в воду озера брошен камень. Движение волны сильно отличается от движения частиц воды. Частицы движутся

лишь вверх и вниз. Наблюдаемое движение волны — это перемещение состояния вещества, а не самого вещества. Пробка, плавающая на волне, ясно показывает это, ибо она движется вверх и вниз, подражая действительному движению воды, а не переносится вдоль волны.

Чтобы лучше понять механизм волны, рассмотрим опять идеализированный эксперимент. Предположим, что огромное пространство сплошь заполнено водой, или воздухом, или какой-либо другой «средой». Где-то в центре имеется шар (рис. 36). В начале эксперимента никакого движения нет вовсе. Вдруг шар начинает ритмически «дышать», расширяясь и сжимаясь в объёме, однако всё время оставаясь сферическим по форме. Что происходит в среде? Начнём рассмотрение в тот момент, когда шар начинает расширяться. Частицы среды, находящиеся в непосредственной близости к шару, отталкиваются, так что плотность прилегающего к шару слоя воды или воздуха увеличивается против своего нормального значения. Точно так же, когда шар сжимается, то плотность той части среды, которая непосредственно окружает шар, будет уменьшаться. Эти изменения плотности распространяются во всей среде. Частицы, составляющие среду, проделывают лишь малые колебания, но движение в целом — это движение поступательной волны. Существенно новым здесь является то, что впервые мы рассматриваем движение чего-то, что есть не вещество, а энергия, распространяющаяся в веществе.

Применяя пример пульсирующего шара, мы можем ввести два общих физических понятия, важных для характеристики волн. Первое — это скорость, с которой распространяется волна. Она будет зависеть от среды и, например, различна для воды и воздуха. Второе понятие — *длины волны*. В волнах на поверхности моря или реки длина волны — это расстояние от углубления одной волны до углубления следующей или же расстояние от гребня одной волны до гребня следующей. Морские волны имеют большую длину волны, чем волны на реке. В наших волнах, образующихся благодаря пульсации шара, длина волны — это расстояние, взятое в некоторый определённый момент между двумя соседними шаро-

выми слоями, у которых одновременно плотность имеет максимальное или минимальное значение. Очевидно, что это расстояние зависит не только от среды. Большое влияние будет, конечно, иметь скорость пульсации шара; так, длина волны будет короче, если пульсация становится быстрее, и длиннее, если пульсация медленнее.

Понятие волны оказывается очень существенным в физике. Оно является определённо механическим понятием. Явление сводится к движению частиц, которые согласно кинетической теории являются составной частью материи. Таким образом, всякая теория, которая употребляет понятие волны, может, вообще говоря, считаться механической теорией. В частности, объяснение акустических явлений существенно опирается на это понятие. Колеблющиеся тела, например, такие, как органы струны или струны виолончели, являются

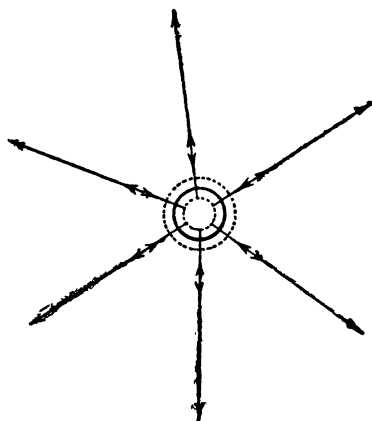


Рис. 36.

источниками звуковых волн, которые распространяются в воздухе, аналогично тому, как это имеет место для волн, образующихся от пульсирующего шара. Таким образом, с помощью понятия волны можно все акустические явления свести к механическим.

Уже было подчёркнуто, что мы должны отличать друг от друга движение частиц и движение самой волны, которая является состоянием среды. Оба движения совершенно различны, но очевидно, что в нашем примере пульсирующего шара оба движения происходят вдоль одной и той же прямой. Частицы среды колеблются в небольших пределах, и плотность увеличивается и уменьшается периодически в соответствии с этим движением. Направление, в котором распространяются волны, и направление, вдоль которого совершаются колебания, од-

но и то же. Волны этого типа называются *продольными*. Но является ли этот тип волн единственным? Для наших дальнейших рассуждений важно ясно представить себе возможность другого типа волны, которая называется *поперечной*.

Изменим наш предыдущий пример. Пусть мы попрежнему имеем шар, но он погружён в среду другого рода: вместо воздуха или воды взято нечто вроде студня. Боль-

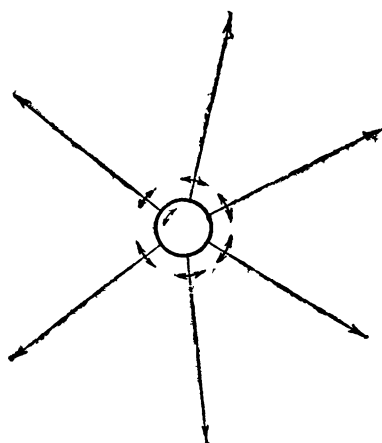


Рис. 37.

ше того, шар больше не пульсирует, а поворачивается на небольшой угол сначала в одном направлении, а затем в обратном, всегда с одним и тем же ритмом и вокруг определённой оси. Студень прилипает к шару и прилипающие частицы вынуждены повторять его движение. Эти частицы вынуждают повторять то же движение частицы, расположенные немного дальше, и т. д., так что в среде возникает волна.

Если мы помним о различии между движением среды и движением волны, то мы видим, что в данном случае они явно не совпадают. Волна распространяется в направлении радиуса шара, а частицы среды движутся перпендикулярно к этому направлению. Следовательно, мы создали поперечную волну.

Волны, распространяющиеся на поверхности воды, поперечны. Плавающая пробка движется вверх и вниз, а волна распространяется вдоль горизонтальной плоскости. С другой стороны, звуковые волны дают нам наиболее известный пример продольных волн.

Ещё одно замечание: волна, созданная пульсирующим или колеблющимся в однородной среде шаром, — это *сферическая* волна. Она называется так потому, что в любой данный момент все точки среды, размещающиеся

на любой сфере, окружающей источник, ведут себя одинаковым образом. Рассмотрим часть такой сферы на большом расстоянии от источника (рис. 38). Чем дальше от источника мы берём такую часть сферы и чем меньшую часть мы берём, тем больше она похожа на часть плоскости. Не стремясь быть слишком строгими, мы можем сказать, что нет существенного различия между частью плоскости

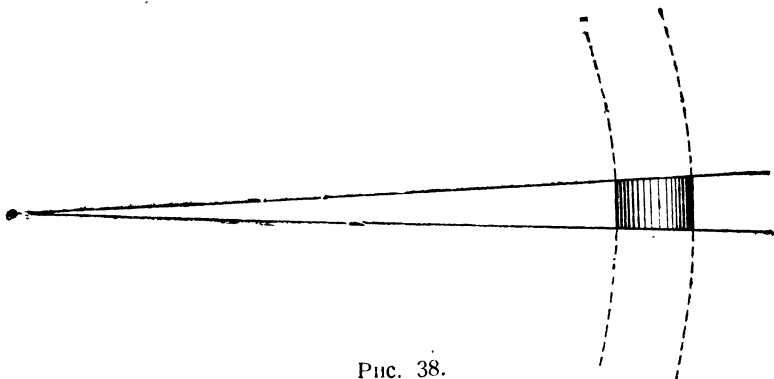


Рис. 38.

и частью сферы, радиус которой достаточно велик. Очень часто мы говорим о небольшой части поверхности волны, далеко продвинувшейся от её источника, как о *плоской* волне. Чем дальше мы помещаем заштрихованную на рисунке часть поверхности от центра сферы и чем меньше угол между радиусами, тем более она приближается к участку плоской волны. Понятие плоской волны, подобно многим другим физическим понятиям, есть не больше, как абстракция, которую мы можем осуществить лишь с известной степенью точности. Тем не менее, это — полезное понятие, и оно нам далее понадобится.

Волновая теория света

Вспомним, почему мы прекратили описание оптических явлений. Нашей целью было ввести другую теорию света, отличную от корпускулярной, но также пытающуюся объяснить ту же область фактов. Чтобы сделать

это, мы должны были прекратить наш рассказ и ввести понятие волн. Теперь мы можем вернуться к нашему предмету.

Первым, кто выдвинул совершенно новую теорию света, был современник Ньютона — Гюйгенс. В своём трактате о свете он писал:

«Если, кроме того, свет употребляет для своего прохождения некоторое время, — что мы сейчас проверим, — то из этого следует, что это движение, сообщённое окружающей материи, следует одно за другим во времени; поэтому, оно подобно звуку, распространяется сферическими поверхностями и волнами; я называю их волнами по тому сходству, которое они имеют с волнами, образующимися на воде, когда в неё брошен камень, и представляющими собой последовательно расширяющиеся круги, хотя они и возникают от другой причины и находятся лишь на плоской поверхности».

По Гюйгенсу, свет — это волна, передача энергии, а не субстанции. Мы видели, что корпускулярная теория объясняет многие наблюдённые факты. В состоянии ли это сделать и волновая теория? Мы должны снова поставить те вопросы, на которые уже дали ответ с помощью корпускулярной теории, чтобы увидеть, может ли волновая теория ответить на них с таким же успехом. Сделаем это здесь в форме диалога между *Н* и *Г*, где *Н* — собеседник, убеждённый в справедливости корпускулярной теории Ньютона, а *Г* — убеждённый в справедливости теории Гюйгенса. Ни тому, ни другому не разрешено применять доводов, полученных после того, как работа обоих великих мастеров была закончена.

Н. В корпускулярной теории скорость света имеет вполне определённый смысл. Это — скорость, с которой корпускулы движутся в пустом пространстве. Что она означает в волновой теории?

Г. Конечно, она означает скорость световой волны. Всякому известно, что волна распространяется с некоторой определённой скоростью, и то же должно быть с волнами света.

Н. Это не так просто, как кажется. Звуковые волны распространяются в воздухе, морские волны в воде. Каждая волна должна иметь материальную среду, в которой она распространяется. Но свет проходит через вакуум,

в то время как звук не проходит. Предположить волну в пустом пространстве фактически означает вовсе не предполагать никакой волны.

Г. Да, это трудность, хотя и не новая для меня. Мой учитель изучал её очень внимательно и решил, что единственный выход — предположить существование гипотетической субстанции, эфира, — передающей среды, заполняющей всю вселенную. Вселенная, так сказать, погружена в эфир. Если у нас есть смелость ввести это понятие, то всё становится ясным.

Н. Но я возражаю против такого предположения. Во-первых, оно вводит новую гипотетическую субстанцию, а мы уже имеем много субстанций в физике. Имеется также и другое основание против него. Вы не сомневаетесь в том, что мы должны всё объяснять в пределах механики. А как относительно эфира? В состоянии ли вы ответить на простой вопрос о том, как эфир построен из своих элементарных частиц и как он обнаруживается в других явлениях?

Г. Ваше первое возражение, конечно, справедливо. Но, вводя некий искусственный невесомый эфир, мы сразу отделяемся от гораздо более искусственных световых корпускул. Мы имеем только одну «таинственную» субстанцию вместо бесконечного числа их, соответствующего огромному числу цветов в спектре. Не кажется ли вам, что это и есть настоящий прогресс? По крайней мере все трудности сконцентрированы в одном пункте. Мы не нуждаемся больше в искусственном предположении, что частицы, относящиеся к различным цветам, движутся с одной и той же скоростью в пустом пространстве. Ваше второе возражение тоже справедливо. Мы не можем дать механического объяснения эфира. Но нет никакого сомнения в том, что дальнейшее изучение оптических и, может быть, других явлений обнаружит его структуру. В настоящее время мы должны ожидать новых экспериментов и заключений, но я надеюсь, что, в конце концов, мы будем в состоянии разрешить проблему о механической структуре эфира.

Н. Оставим на время этот вопрос, так как он не может быть разрешён теперь. Мне хотелось бы видеть, как ваша

теория, даже, если мы отбросим трудности, объясняет те явления, которые так ясны и понятны в корпускулярной теории. Возьмём, например, тот факт, что световые лучи проходят в *вакууме* или в воздухе вдоль прямых. Кусок бумаги, помещённый перед лампой, производит чёткую и резко очерченную тень на стене. Резкие тени были бы невозможны, если бы волновая теория была правильна, ибо волны огибали бы края бумаги и тем самым размазывали бы тень. Маленькое судно не является препятствием для морских волн, как вы знаете, они просто огибают его, не отбрасывая тени.

Г. Это не убедительный довод. Возьмите короткие волны на реке, ударяющие о борт большого корабля. Волны, возникающие на одной стороне корабля, не будут видны на другой. Если волны достаточно малы, а корабль достаточно велик, появляется очень чёткая тень. Очень возможно, что свет кажется нам проходящим по прямым линиям лишь потому, что его длина волны очень мала в сравнении с величиной обычных препятствий и отверстий, употребляемых в экспериментах. Возможно, что, если бы мы могли создать достаточно малые препятствия, то никакой тени не было бы. Мы можем встретиться с большими экспериментальными трудностями в конструкции приборов, которые могли бы показать, в состоянии ли свет огибать препятствия. Тем не менее, если бы такой эксперимент можно было осуществить, он был бы решающим в борьбе между волновой и корпускулярной теориями света.

Н. Волновая теория может привести к новым фактам в будущем, но я не знаю каких-либо данных, убедительно её подтверждающих. Пока с полной определённостью не доказано экспериментально, что свет может огибать препятствия, я не вижу какого-либо основания отказываться от корпускулярной теории, которая кажется мне проще и потому лучше, чем волновая.

На этом мы можем прервать диалог, хотя предмет его никоим образом не исчерпан.

Остаётся ещё показать, как волновая теория объясняет преломление света и многообразие цветов. Как мы знаем, корпускулярная теория в состоянии дать такое объясне-

ние. Мы начнём с преломления, но сначала будет полезно рассмотреть пример, не имеющий ничего общего с оптикой.

Пусть по большому открытому пространству прогуливаются два человека, держащие между собой твёрдый прут. Вначале они идут прямо вперёд, оба с одинаковой скоростью. Пока их скорости одинаковы, велики они или малы — безразлично, прут будет совершать параллельное перемещение, то-есть он не будет поворачиваться или изменять своё направление. Все последовательные положения прута параллельны друг другу. Но представим себе теперь, что в течение очень короткого времени, может быть, равного долям секунды, движения обоих людей стали неодинаковыми. Что произойдёт? Ясно, что в течение этого времени прут будет поворачиваться, так что он не будет больше перемещаться параллельно своему первоначальному положению. Когда опять возобновится движение с равными скоростями, оно будет иметь направление, отличное от первоначального. Это ясно показано на рисунке. Изменение направления происходит в течение того промежутка времени, в котором скорость обоих пешеходов была различной.

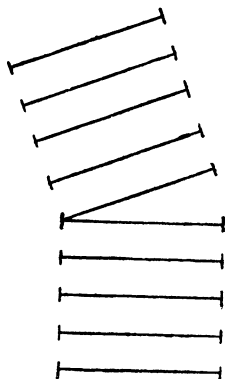


Рис. 39.

Этот пример позволит нам понять преломление волны. Плоскость волны, движущейся в эфире, ударяется о поверхность стекла. На следующем рисунке мы видим волну с сравнительно широким фронтом, который перемещается вперёд. Фронт волны — это плоскость, в которой в любой момент времени все части эфира находятся в одинаковом состоянии. Так как скорость зависит от среды, через которую в данный момент времени проходит свет, то скорость в стекле будет отличаться от скорости в пустом пространстве. В течение очень короткого времени, за которое фронт волны входит в стекло, различные части фронта волны будут иметь различные скорости. Ясно, что те части, которые уже достигли стекла, будут двигаться со скоростью

света в стекле, в то время как другие части попрежнему движутся со скоростью света в эфире. Благодаря этой разности в скоростях вдоль фронта волны, существующей в течение времени «погружения» в стекло, направление самой волны будет изменяться.

Итак, мы видим, что не только корпускулярная, но и волновая теория приводит к объяснению преломления.

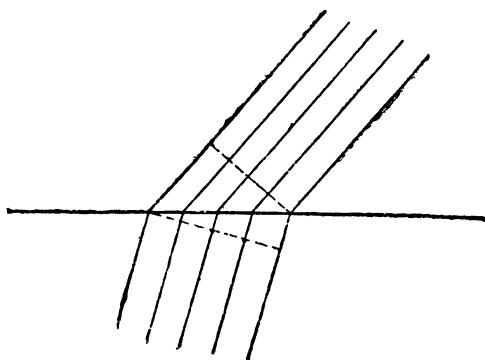


Рис. 40.

Дальнейшее рассмотрение и некоторое применение математики показывают, что объяснение волновой теории проще и лучше и что следствия из неё находятся в полном согласии с наблюдением. В самом деле, количественные методы рассмотрения позволяют нам вывести скорость света

в преломляющей среде, если мы знаем, как преломляется луч, когда он входит в неё. Прямые измерения блестяще подтверждают эти предсказания, а тем самым и волновую теорию света.

Остаётся ещё вопрос о цвете.

Необходимо вспомнить, что волна характеризуется двумя числами — её скоростью и длиной. Весьма существенным является следующее утверждение волновой теории света: *волны различной длины соответствуют различным цветам*. Длина волны однородного жёлтого света отлична от длины волны синего или фиолетового. Вместо искусственного разделения корпускул, относящихся к разным цветам, мы имеем естественное различие по длине волны.

Отсюда следует, что эксперименты Ньютона по дисперсии света могут быть описаны двумя различными языками — языком корпускулярной теории и языком волновой теории. Например:

Корпускулярный язык

Корпускулы, относящиеся к различным цветам, имеют одинаковую скорость в *вакууме*, но различные скорости в стекле.

Белый свет — это совокупность корпускул, относящихся к различным цветам, в то время как в спектрах они разделены.

Волновой язык

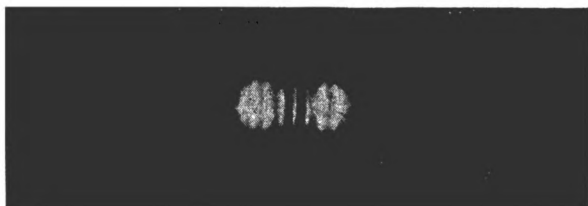
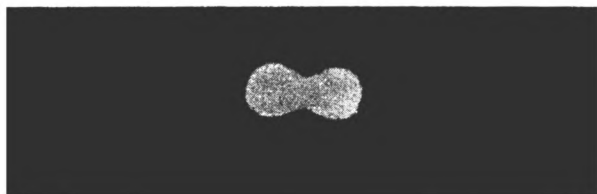
Лучи различных длин волн, относящиеся к различным цветам, имеют одинаковую скорость в эфире, но различные скорости в стекле.

Белый свет — это совокупность волн всех длин. в то время как в спектре они разделены.

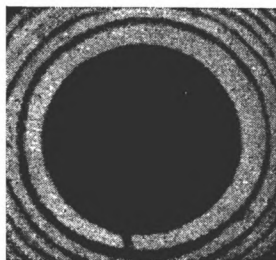
Кажется, было бы мудрым избежать двусмысленности, происходящей из факта существования двух различных теорий одних и тех же явлений, решив в пользу одной из них после внимательного рассмотрения достоинств и недостатков каждой. Диалог между *H* и *G* показывает, что это нелёгкая задача. Решение с этой точки зрения было бы скорее делом вкуса, чем научного убеждения. Во времена Ньютона и в течение свыше ста лет спустя большинство физиков предпочитало корпускулярную теорию.

История вынесла свой приговор — в пользу волновой теории и против корпускулярной — гораздо позднее, в середине девятнадцатого столетия. *H* в своём разговоре с *G* заявлял, что в принципе возможно было экспериментальное решение спора между обеими теориями. Корпускулярная теория не разрешает свету огибать препятствия и требует наличия чётких теней. С другой стороны, согласно волновой теории достаточно малые препятствия не будут отбрасывать никакой тени. В работах Юнга и Френеля этот результат был получен экспериментально, там же были сделаны теоретические заключения.

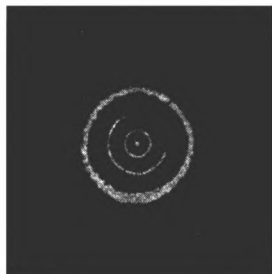
Мы уже обсуждали чрезвычайно простой эксперимент, в котором экран с отверстием помещался перед точечным источником света, а тень отбрасывалась на стену. В дальнейшем мы упростим эксперимент, полагая, что источник испускает однородный свет. Для получения наилучших результатов источник света должен быть сильным. Пред-



а) Вверху мы видим фотографию световых пятен после того, как два луча прошли через два маленьких отверстия, один за другим (сначала была открыта одна щель; затем она закрывалась, а другая открывалась). Внизу мы видим полосы, полученные в результате того, что луч прошёл через оба маленьких отверстия одновременно. (Сфотографировано В. Аркадьевым.)



б) Диффракция света в результате огибания лучом очень малого препятствия. (Сфотографировано В. Аркадьевым.)



с) Диффракция света в результате прохождения луча через очень малое отверстие. (Сфотографировано В. Аркадьевым.)

ставим себе, что отверстие в экране делается всё меньше и меньше. Если в нашем распоряжении есть сильный источник и нам удастся сделать отверстие достаточно малым, то обнаруживаются новые и удивительные явления, совершенно непонятные с точки зрения корпускулярной теории. Нет больше резкого различия между светом и темнотой. Свет постепенно блекнет, переходя в серию светлых и тёмных колец. Появление колец является необходимым с точки зрения волновой теории. Объяснение чередования светлых и тёмных полос будет ясно в случае несколько иной экспериментальной установки. Предположим, что мы имеем лист чёрной бумаги с двумя узкими щелями, через которые может проходить свет. Если щели расположены близко друг к другу и очень малы и если однородный свет достаточно силён, то на стене появится множество светлых и тёмных полос, постепенно ослабевающих по мере приближения к тёмному фону. Объяснение очень простое. Тёмная полоса появляется там, где впадина волны от одной щели встречается с гребнем волны от другой щели, так что обе уничтожаются. Полоса света — там, где встречаются две впадины или два гребня от волн, идущих от обеих щелей, и усиливают друг друга. Сложное объяснение тёмных и светлых колец в предыдущем примере, в котором мы применяли экран с одним отверстием, но принципиально оно то же самое. Это появление тёмных и светлых полос при прохождении света через две щели и тёмных и светлых колец при прохождении одного отверстия следует иметь в виду, ибо позднее мы вернёмся к обсуждению обеих различных картин. Описанные здесь эксперименты обнаруживают *диффракцию* света, — нарушение светом прямолинейности распространения, когда на пути световых волн расположены малые отверстия или препятствия (см. вкл. II в конце книги).

С небольшой помощью математики мы в состоянии пойти гораздо дальше. Можно установить, как велика, вернее, как мала, должна быть длина волны, чтобы создать такой прихотливый рисунок. Таким образом описанные эксперименты позволяют нам определить длину волны однородного света. Чтобы дать представление о том, как

малы эти величины, мы укажем длины волн крайних лучей видимого солнечного спектра, то-есть длины волн красного и фиолетового лучей.

Длина волны красного света равна 0,00008 сантиметра. Длина волны фиолетового света равна 0,00004 сантиметра.

Мы не должны удивляться, что эти величины очень малы. Точно очерченная тень, то-есть явление прямолинейного распространения света, наблюдается в природе лишь потому, что обычно встречающиеся отверстия и препятствия чрезвычайно велики по сравнению с длиной волны света. Свою волновую природу свет обнаруживает лишь тогда, когда применяются очень малые отверстия и препятствия.

Но история исследований для теории света никоим образом не окончена. Приговор девятнадцатого столетия не был последним и окончательным. Для современных физиков вся проблема выбора между корпускулами и волнами существует вновь, теперь уже в гораздо более глубокой и сложной форме. Примем поражение корпускулярной теории света, пока мы не признаем проблематического характера победы волновой теории.

Продольны или поперечны световые волны?

Все оптические явления мы рассматривали, говоря языком волновой теории. Изгибание света вокруг малых отверстий и препятствий и объяснение преломления — это самые сильные аргументы в её пользу. Руководимые механистической точкой зрения, мы признаём, что остаётся ещё один вопрос, на который следует ответить: определение механических свойств эфира. Для решения этой проблемы существенно знать, продольны или поперечны световые волны в эфире. Другими словами: распространяется ли свет подобно звуку? Вызвана ли волна изменением плотности среды, то-есть совершаются ли колебания частиц в направлении распространения? Или эфир похож на упругий студень — на среду, в которой могут осуществляться лишь поперечные волны и в которой частицы движутся в направлении, перпендикулярном к направлению распространения самих волн?

Прежде чем решить эту проблему, попробуем определить, какой ответ должен быть предложен. Очевидно, мы должны были бы радоваться, если бы световые волны оказались продольными. В этом случае трудности в описании механического эфира были бы не так велики. Картина строения эфира могла бы, вероятно, быть чем-то вроде механической картины строения газа, которая объясняет распространение звуковых волн. Было бы гораздо труднее создать картину строения эфира, передающего поперечные волны. Представить себе среду в виде студня или желе, построенную из частиц таким образом, что через неё распространяются поперечные волны, — это не лёгкая задача. Гюйгенс был убеждён, что эфир скорее окажется

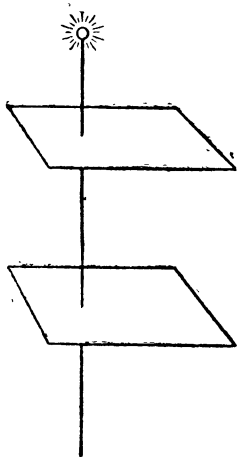


Рис. 41.

«воздухообразным», чем «желеобразным». Но природа очень мало прислушивается к нашим желаниям. Была ли природа в этом случае милосердна к попыткам физиков понять все явления с механистической точки зрения? Чтобы ответить на этот вопрос, мы должны рассмотреть некоторые новые эксперименты.

Мы рассмотрим подробно лишь один из многих экспериментов, который в состоянии дать нам ответ. Предположим, что мы имеем очень тонкую пластинку из турмалинового кристалла, вырезанную особым образом, в описании которого здесь нет необходимости. Пластинка кристалла долж-

на быть настолько тонка, чтобы можно было видеть сквозь неё источник света. Возьмём теперь две такие пластинки и поместим их между глазами и светом. Что мы увидим? Опять световую точку, если пластинки достаточно тонки. Очень велики шансы того, что эксперимент подтвердит наше ожидание. Не ставя себе целью установить, каковы эти шансы, допустим, что мы уже видим световую точку через оба кристалла. Будем теперь

постепенно изменять положение одного кристалла, поворачивая его. Это предложение будет иметь смысл лишь в том случае, если положение оси, вокруг которой происходит вращение, фиксировано. Мы возьмём в качестве оси линию, определяемую проходящим лучом. Это означает, что мы перемещаем все точки одного кристалла, кроме тех, которые лежат на оси. Но что за странная вещь! Свет делается всё слабее и слабее, пока не исчезает совершенно. Затем он вновь появляется, по мере того, как продолжается вращение, и вновь приобретает первоначальный вид, когда достигается первоначальное положение.

Не входя в детали подобных экспериментов, мы можем задать следующий вопрос: можно ли объяснить эти явления, если световые волны продольны? Если бы волны были продольны, частицы эфира должны были бы двигаться вдоль оси, то-есть в том же направлении, в каком идёт луч. Если кристалл вращается, ничего вдоль оси не изменяется. Точки на оси не передвигаются, и лишь очень небольшое смещение имеет место вблизи оси. Такого ясно различимого изменения, как уничтожение и появление вновь световой картины, не могло бы возникнуть для продольной волны. Это, а также и многие другие подобные явления могут быть объяснены лишь в том случае, если предположить, что световые волны не продольны, а поперечны! Или, другими словами, нужно предположить «желеобразный» характер эфира.

Это очень печально! Мы должны подготовиться к встрече непреодолимых трудностей в попытке механического описания эфира.

Эфир и механистическое воззрение

Обсуждение всех различных попыток описать механическую природу эфира как среды для передачи света привело бы к длинной истории. Механическая конструкция означает, как мы знаем, что субстанция состоит из частиц, между которыми вдоль прямой линии, соединяющей их, действуют силы, зависящие только от расстояния. Для того чтобы построить эфир в виде желеобразной субстан-

ции, физики должны принять несколько чрезвычайно неестественных предположений. Мы не будем приводить их здесь: они относятся к почти забытому прошлому. Но результат был значителен и важен. Искусственный характер всех этих предположений, необходимость введения такого множества их, причём все они совершенно независимы друг от друга, — всё это было достаточным, чтобы разбить уверенность в механистической точке зрения.

Но имеются другие и более простые возражения против эфира, чем трудности его построения. Если мы хотим объяснить оптические явления механистически, то следует предположить, что эфир существует повсюду. Если свет передаётся только в среде, то не может быть никакого пустого пространства.

Однако, из механики мы знаем, что межзвёздное пространство не оказывает сопротивления движению материальных тел. Планеты, например, проходят через эфир-желе, не встречая какого-либо сопротивления своему движению, которое должна была бы оказать материальная среда. Если же эфир не нарушает движения вещества, то не может быть никакого взаимодействия между частицами эфира и частицами вещества. Свет проходит через эфир а также через стекло и воду, но его скорость изменяется в последних субстанциях. Как можно объяснить этот факт механистически? — Повидимому, лишь предполагая некоторое взаимодействие между частицами эфира и частицами вещества. Мы только что видели, что для свободно движущихся тел следует предположить, что такого взаимодействия не существует. Другими словами, существует взаимодействие между эфиром и веществом в оптических явлениях, но никакого взаимодействия в механических явлениях! Это, конечно, очень парадоксальное заключение!

Повидимому, из всех этих трудностей будет единственный выход. При попытке понять явления природы с механистической точки зрения на всём протяжении развития науки до двадцатого столетия было необходимо вводить искусственные субстанции, такие, как электрические и магнитные жидкости, световые корпускулы или эфир. Результатом было только то, что все эти трудности концент-

рировались в нескольких существенных пунктах, таких, как эфир, в случае оптических явлений. Здесь все бесполезные попытки построить эфир простым путём, так же как и другие возражения, обнаруживают, что ошибка лежит в фундаментальном положении о том, что возможно объяснить все явления в природе с механистической точки зрения. Наука не имела успеха в последовательном проведении механистической программы и сегодня ни один физик не верит в возможность её выполнения.

В нашем кратком обозрении принципиальных идей физики мы встретили ряд нерешённых проблем, пришли к трудностям и препятствиям, которые обескуражили учёных в попытках сформулировать единое и последовательное воззрение на все явления внешнего мира. В классической механике мы встретили незамеченную руководящую нить исследования — равенство тяжёлой и инертной массы. Обнаружен искусственный характер электрической и магнитной жидкостей. Во взаимодействии между электрическим током и магнитной иглой встретились неразрешённые трудности. Следует напомнить, что эта сила действовала не по линии, соединяющей проводник и магнитный полюс, и зависела от скорости движущегося заряда. Закон, выражающий её направление и величину, был чрезвычайно сложен. И, наконец, установлено наличие больших трудностей с эфиром.

Современная физика атаковала все эти проблемы и разрешила их. Но в борьбе за эти решения возникли новые и более глубокие проблемы. Наши знания теперь шире и глубже, чем знания физика девятнадцатого столетия, но таковы же и наши сомнения и трудности.

Мы суммируем:

В старой теории электрических жидкостей, в корпускулярной и волновой теориях света мы видим дальнейшие попытки применить механистическое воззрение. Но в области электрических и оптических явлений это применение встречает большие трудности.

Движущийся заряд действует на магнитную иглу, причём сила зависит не только от расстояния, но и от скорости заряда. Сила эта не отталкивает, и не при-

тягивает, а действует перпендикулярно к линии, соединяющей иглу и заряд.

В оптике мы должны отдать предпочтение волновой теории света перед корпускулярной. Волны, распространяющиеся в среде, состоящей из частиц, между которыми действуют механические силы, — это, конечно, механическое понятие. Но что это за среда, в которой распространяется свет, и каковы её механические свойства? Нет никаких надежд свести оптические явления к механическим, пока этот вопрос остаётся без ответа. Но трудности в разрешении этой проблемы так велики, что мы должны от неё отказаться, а стало быть, должны также отказаться и от механистических воззрений.

III. ПОЛЕ И ОТНОСИТЕЛЬНОСТЬ

Поле как представление. — Две основы теории поля. — Реальность поля. — Поле и эфир. — Механические леса. — Эфир и движение. — Время, пространство, относительность. — Относительность и механика. — Пространственно-временной континуум. — Общая относительность. — Вне и внутри лифта. — Геометрия и опыт. — Общая относительность и её экспериментальная проверка. — Поле и вещество.

Поле как представление

Во второй половине девятнадцатого столетия в физику были введены новые и революционные идеи; они открыли путь к новому философскому взгляду, отличающемуся от механистического. Результаты работ Фарадея, Максвелла и Герца привели к развитию современной физики, к созданию новых понятий, образующих новую картину действительности.

Наша задача сейчас — описать переворот, произведённый в науке этими новыми понятиями, и показать, как они постепенно приобрели ясность и силу. Мы постараемся построить линию развития логически, не очень заботясь о хронологическом порядке.

Новые понятия возникли в связи с изучением электрических явлений, но проще ввести их впервые через механику. Мы знаем, что две частицы притягивают друг друга и что сила их притяжения уменьшается с квадратом расстояния. Мы можем изобразить этот факт иным образом, что мы и сделаем, хотя и трудно понять преимущества нового метода. Маленький круг на рисунке 42 представляет притягивающее тело, скажем, Солнце. В действительности нашу картину следовало бы представить как модель в пространстве, а не как рисунок на плоскости. Тогда небольшой круг стал бы в пространстве сферою,

представляющей Солнце. Тело, которое мы будем называть *пробным телом*, помещённое куда-либо по соседству с Солнцем, будет притягиваться к Солнцу, причём сила притяжения будет направлена по линии, соединяющей центры обоих тел. Таким образом, линии на нашем рисунке

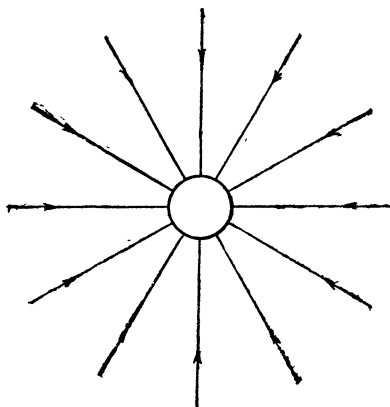


Рис. 42.

указывают направление силы притяжения Солнца для различных положений пробного тела. Стрелки на каждой линии показывают, что сила направлена к Солнцу; это означает, что данная сила есть сила притяжения. Это — *силовые линии поля тяготения*. Пока это только название, и нет основания останавливаться на нём подробнее. Наша фигура имеет характерный вид, на котором впоследствии мы остановим своё внимание. Силовые линии по-

строены в пространстве, где нет никакого вещества. Пока все силовые линии, короче говоря, *поле*, показывают только, как будет вести себя пробное тело, помещённое вблизи сферического тела, для которого построено поле.

Линии в нашей пространственной модели всегда перпендикулярны к поверхности сферы. Поскольку они расходятся из одной точки, они более плотно расположены вблизи сферы и всё более и более расходятся друг от друга по мере удаления от неё. Если мы увеличиваем расстояние от сферы в два или три раза, то плотность линий в нашей пространственной модели (но не на рисунке!) будет в четыре или в девять раз меньше. Таким образом, линии служат двум целям. С одной стороны, они показывают направление сил, действующих на тело, помещённое по соседству со сферой — Солнцем, с другой стороны, плотность расположения силовых линий показывает, как сила изменяется с расстоянием. Изображение поля на

рисунке, правильно истолкованное, характеризует направление силы тяготения и её зависимость от расстояния. Из такого рисунка закон тяготения можно прочесть так же хорошо, как и из описания его действия словами, или же точным и скупым языком математики. Это *представление о поле*, как мы назовём его, может казаться ясным и интересным, но нет основания думать, что введение его означает какой-либо реальный прогресс. Было бы трудно доказать его полезность в случае тяготения. Может быть, кто-либо найдёт полезным считать эти линии не просто рисунком, а чем-то большим, и представить себе реальные действия сил проходящими вдоль линий. Это можно сделать, но тогда скорость действия вдоль силовых линий нужно считать бесконечно большой. Сила, действующая между двумя телами, согласно закону Ньютона зависит только от расстояния; время не входит в рассмотрение. На передачу силы от одного тела к другому не требуется времени. Но, поскольку движение с бесконечной скоростью ничего не говорит всякому разумному человеку, постольку попытка сделать наш рисунок чем-либо большим, чем модель, ни к чему не приводит.

Но мы не намерены обсуждать сейчас проблему тяготения. Она послужила нам лишь введением, упрощающим объяснение аналогичных методов рассуждения в теории электричества.

Мы начнём с обсуждения эксперимента, который привёл к серьёзным трудностям в механистическом воззрении. Пусть мы имеем ток, текущий по проводнику, имеющему форму окружности. В центре этого витка находится магнитная игла. В момент возникновения тока появляется новая сила, действующая на магнитный полюс и перпендикулярная к линии, соединяющей проволоку и полюс. Эта сила, вызванная кругообращающимся зарядом, зависит, как показал опыт Роуланда, от скорости заряда. Эти экспериментальные факты противоречат философскому взгляду, согласно которому все силы должны действовать по линии, соединяющей частицы, и могут зависеть только от расстояния.

Точное выражение для силы, с которой ток действует на магнитный полюс, очень сложно; в самом деле, оно

гораздо сложнее выражения сил тяготения. Но мы можем постараться представить её действия так же отчётливо, как это мы сделали в случае силы тяготения. Наш вопрос таков: с какой силой действует ток на магнитный полюс, помещённый где-либо поблизости от проводника, по которому идёт ток? Было бы довольно трудно описать эту силу словами. Даже математическая формула была бы сложной и неудобной. Гораздо лучше представить всё, что мы знаем о действии сил, с помощью рисунка, или, вернее, с помощью пространственной модели с силовыми линиями. Некоторые трудности вызваны тем, что магнитный полюс существует только в связи с другим магнитным полюсом, образуя диполь. Однако, мы всегда можем вообразить себе магнитный диполь такой длины, что можно будет учитывать силу, действующую только на тот полюс, который помещён вблизи тока. Другой же полюс можно считать настолько удалённым, что силу, действующую на него, можно не принимать во внимание. Чтобы избежать неопределённости, будем считать, что магнитный полюс, помещённый вблизи проволоки, является *положительным*.

Характер силы, действующей на положительный магнитный полюс, можно увидеть из рисунка 43.

Стрелки вблизи проволоки показывают направление тока. Все другие линии — силовые линии поля этого тока, лежащие в определённой плоскости. Если рисунок сделан должным образом, то эти линии дают нам представление как о направлении силового вектора, характеризующего действие тока на данный магнитный полюс, так и о длине этого вектора. Сила, как мы знаем, является вектором, и, чтобы определить её, мы должны знать направление вектора и его длину. Нас интересует, главным образом, вопрос о направлении силы, действующей на полюс. Наш вопрос таков: как можем мы найти, исходя из рисунка, направление силы в любой точке пространства?

Правило определения направления силы для такой модели не так просто, как в предыдущем примере, где линии сил были прямыми. Чтобы облегчить рассуждения, на следующей диаграмме (рис. 44) нарисована только одна силовая линия. Силовой вектор имеет направление, указанное

на силовой линии стрелкой. Следовательно, направление стрелок — это направление, в котором сила действует на магнитный полюс в данной точке. Хороший рисунок или, вернее, хорошая модель, говорит нам кое-что также и о длине силового вектора в любой точке. Этот вектор должен быть длиннее там, где линии расположены более плотно,

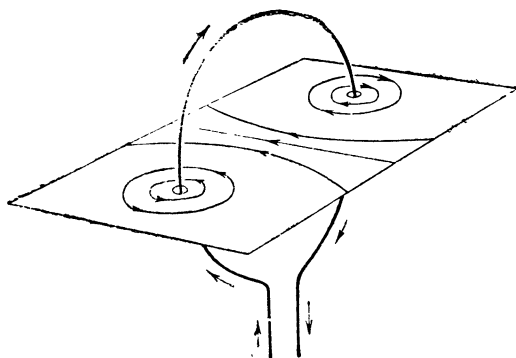


Рис. 43.

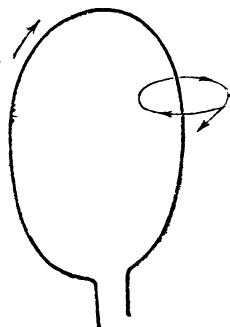


Рис. 44.

то-есть вблизи проводника, и короче там, где линии расположены менее плотно, то-есть вдали от проводника.

Этим методом силовые линии или, другими словами, поле позволяют нам определить силы, действующие на магнитный полюс в любой точке пространства. Пока это — единственное оправдание для тщательного построения поля. Зная, что выражает поле, мы рассмотрим с более глубоким интересом силовые линии, соответствующие току. Эти линии суть окружности; они окружают проводник и лежат в плоскости, перпендикулярной к плоскости, в которой расположен проводник. Рассматривая характер силы по рисунку, мы ещё раз приходим к заключению, что сила действует в направлении, перпендикулярном к любой линии, соединяющей проводник и полюс, ибо касательная к окружности всегда перпендикулярна к её радиусу. Всё наше знание о действии сил мы можем суммарно выразить в построении поля. Мы вводим понятие поля наряду с понятиями о токе и о магнитном полюсе для того, чтобы более просто представить действующие силы.

Всякий ток связан с магнитным полем, иначе говоря, на магнитный полюс, помещённый вблизи проводника, по которому течёт ток, всегда действует некоторая сила. Заметим мимоходом, что это свойство тока позволяет нам

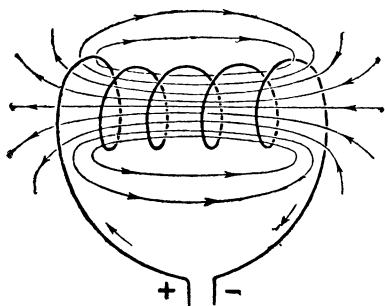


Рис. 45.

построить чувствительный прибор для обнаружения тока. Научившись однажды распознавать характер магнитных сил из модели поля, связанного с током, мы всегда будем рисовать поле, окружающее проводник, по которому течёт ток, чтобы представить действие магнитных сил в любой точке пространства. В качестве первого примера мы рассмотрим так называемый соленоид. Он представляет собой спираль из проволоки, как это показано на рисунке 45. Наша задача изучить с помощью опыта всё, что можно знать о магнитном поле, связанном с током, текущим по соленоиду, и объединить эти знания в построении поля. Рисунок представляет нам результат. Искривлённые линии сил замкнуты; они окружают соленоид, характеризуя магнитное поле тока.

Поле, образуемое магнитным стержнем, может быть представлено таким же путём, как и поле тока. Следующий

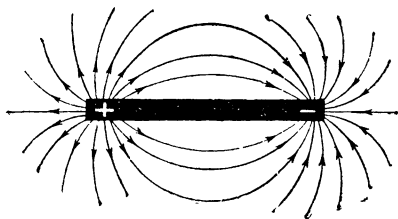


Рис. 46.

рисунок показывает это. Силовые линии направлены от положительного полюса к отрицательному. Силовой вектор всегда лежит на касательной к силовой линии и является наибольшим вблизи полюса, потому что силовые линии расположены наиболее густо именно в этих местах. Силовой вектор выражает действие магнита на положи-

тельный магнитный полюс. В этом случае магнит, а не ток, является «источником» поля.

Следует внимательно сравнить два последних рисунка. В первом случае мы имеем магнитное поле тока, текущего по соленоиду; во втором — поле магнитного стержня. Не будем обращать внимания на области, занятые соленоидом и стержнем, а рассмотрим только внешние поля, ими создаваемые. Мы сразу же замечаем, что они имеют совершенно одинаковый характер; в обоих случаях силовые линии идут от одного конца — соленоида или стержня — к другому.

Представление о поле приносит свой первый плод. Весьма трудно было бы усмотреть какое-либо ярко выраженное сходство между током, текущим по соленоиду, и магнитным стержнем, если бы это не обнаруживалось строением поля.

Понятие поля теперь может быть применено к более серьезной задаче. Скоро мы увидим, есть ли оно нечто большее, чем новое представление действующих сил. Мы могли бы сказать: предположим временно, что поле и только оно характеризует все действия, определяемые его источником. Это только предположение. Оно означало бы, что если соленоид и магнит имеют одинаковое поле, то и все их действия должны быть также одинаковыми. Оно означало бы, что два соленоида, по которым течёт электрический ток, ведут себя подобно двум магнитным стержням; что они притягивают или отталкивают друг друга, в зависимости от их взаимного положения, совершенно так же, как это имеет место и в случае магнитных стержней. Оно означало бы также, что соленоид и стержень притягивают и отталкивают друг друга таким же образом, как и два стержня. Короче говоря, оно означало бы, что все действия соленоида, по которому течёт ток, и действия соответствующего магнитного стержня являются одинаковыми, так как существенно одно лишь поле, а поле в обоих случаях имеет одинаковый характер. Эксперимент полностью подтверждает наше предположение!

Как трудно было бы предвидеть эти факты без понятия поля! Выражение для силы, действующей между проводником, по которому течёт ток, и магнитным полюсом очень

сложно. В случае двух соленоидов мы должны были бы исследовать силы, с которыми оба тока действуют друг на друга. Но если мы делаем это с помощью поля, мы сразу же определяем характер всех этих действий, как только обнаруживается сходство между полем соленоида и полем магнитного стержня.

Мы имеем право считать, что поле есть нечто гораздо большее, чем думали сначала. Свойства самого поля оказываются существенными для описания явления. Разли-

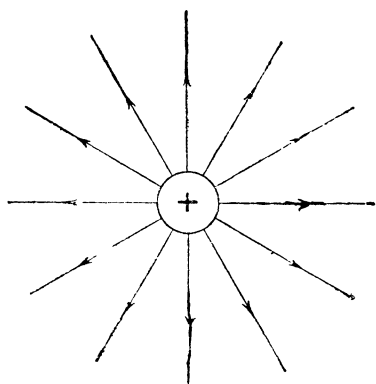


Рис. 47.

чие же источников поля несущественно. Значение понятия поля обнаруживается в том, что оно ведёт к новым экспериментальным фактам.

Поле оказывается очень полезным понятием. Оно возникло как нечто, помещённое между источником и магнитной иглой, для того чтобы описать действующую силу. О нём думали, как об «агенте» тока, через который выполнялись все действия

тока. Но теперь агент действует и как переводчик, переводящий законы на простой, ясный, легко понимаемый язык.

Первый успех описания с помощью поля показал, что оно может быть удобным для косвенного рассмотрения всех действий токов, магнитов и зарядов, то-есть рассмотрения не непосредственного, а с помощью поля как переводчика. Поле можно рассматривать как нечто, всегда связанное с током. Оно существует, даже если отсутствует магнитный полюс, с помощью которого можно обнаружить его наличие. Постараемся последовательно идти за этой новой руководящей нитью.

Поле заряженного проводника может быть введено почти таким же образом, как и поле тяготения или поле тока или магнита. Возьмём снова наипростейший пример.

Чтобы нарисовать поле положительно заряженной сферы, мы должны задать вопрос: какого рода силы действуют на маленькое заряженное пробное тело, помещённое вблизи источника поля, то-есть вблизи заряженной сферы? Тот факт, что мы берём положительный, а не отрицательный заряд пробного тела, является простым соглашением, которое определяет, в каком направлении должны быть нарисованы стрелки силовых линий. Модель вполне аналогична модели поля тяготения (стр. 124) в силу подобия законов Кулона и Ньютона. Единственное различие между обеими моделями состоит в том, что стрелки расположены в противоположных направлениях. В самом деле, два положительных заряда отталкиваются, а две массы притягиваются.

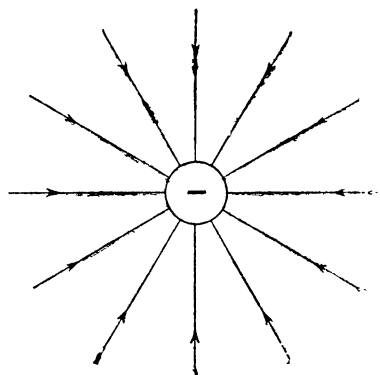


Рис. 48.

Однако, поле сферы с отрицательным зарядом будет идентично полю тяготения, так как маленький положительный пробный заряд будет притягиваться источником поля.

Если и электрический заряд и магнитный полюс находятся в покое, то между ними нет никакого взаимного действия, ни притяжения, ни отталкивания. Выражая подобный факт на языке поля, мы можем сказать: электростатическое поле не влияет на магнитное и наоборот. Слова «статическое поле» означают, что речь идёт о поле, которое не изменяется со временем. Магниты и заряды могли бы вечно оставаться друг подле друга, если бы никакая внешняя сила не нарушила их состояния. Электростатические, магнитные и гравитационные поля все различны по своему характеру. Они не смешиваются; каждое поле сохраняет свою индивидуальность независимо от других.

Вернёмся к электрической сфере, которая до сих пор была в покое, и предположим, что она пришла в движение благодаря действию внешней силы. Заряженная сфера

движется. На языке поля это положение означает: поле электрического заряда изменяется со временем. Но движение этой заряженной сферы эквивалентно току, как мы уже знаем это из опыта Роуланда. Далее, каждый ток сопровождается магнитным полем. Таким образом, цепь наших выводов такова:

движение заряда \rightarrow изменение электрического поля
 \downarrow
 ток \rightarrow магнитное поле, связанное с током.

Поэтому мы заключаем: *изменение электрического поля, произведённое движением заряда, всегда сопровождается магнитным полем.*

Наше заключение основано на опыте Эрстеда, но оно содержит в себе нечто большее. Оно содержит признание того, что связь электрического поля, изменяющегося со временем, с магнитным полем весьма существенна для наших дальнейших выводов.

Поскольку заряд остаётся в покое, существует только электростатическое поле. Но как только заряд приходит в движение, возникает магнитное поле. Мы можем сказать больше. Магнитное поле, вызванное движением заряда, будет тем сильнее, чем больше заряд и чем быстрее он движется. Это тоже есть вывод из опыта Роуланда. Используя вновь язык поля, мы можем сказать: чем быстрее изменяется электрическое поле, тем сильнее сопровождающее его магнитное поле.

Мы постараемся здесь перевести известные уже нам факты с языка теории жидкостей, развитого соответственно старым механистическим взглядам, на новый язык поля. Позднее мы увидим, как ясен, поучителен и всеобъемлющ наш новый язык.

Две основы теории поля

«Изменение электрического поля сопровождается магнитным полем». Если переменить слова «магнитное» и «электрическое», то предложение будет выглядеть так: «изменение магнитного поля сопровождается электрическим полем». Справедливо это положение или нет, может решить только эксперимент. Но сама идея сформулировать это положение внушена применением языка поля.

Немного более сотни лет назад Фарадей выполнил эксперимент, приведший к великому открытию индукционных токов.

Демонстрация этого явления очень проста (рис. 49). Необходимо только соленоид или несколько витков проволоки и магнитный стержень, а также какой-либо один из многотипных приборов для обнаружения электрического тока. Начнём с того, что магнитный стержень оставим в покое около соленоида, образующего замкнутую цепь. Никакого тока по проводнику не течёт, потому что нет никакого источника. Существует только магнитостатическое поле магнитного стержня, не изменяющееся со временем. Теперь мы быстро изменяем положение магнита, либо удаляя его, либо приближая

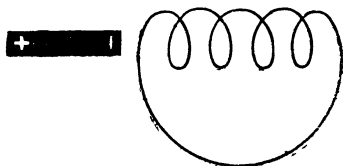


Рис. 49.

к соленоиду, по своему усмотрению. В этот момент в проводнике на короткое время появится ток, а затем исчезнет. Всякий раз, как изменяется положение магнита, вновь появляется ток; его можно обнаружить достаточно чувствительным прибором. Но с точки зрения теории поля ток означает наличие электрического поля, вызывающего поток электрических жидкостей в проводнике. Ток, а стало быть, и электрическое поле исчезают, когда магнит вновь приходит в состояние покоя.

Представим себе, что язык поля нам незнаком и результаты этого опыта должны быть описаны количественно и качественно на языке механических понятий. Тогда наш опыт показывает следующее: благодаря движению магнитного диполя возбуждена новая сила,двигающая электрические жидкости в проводнике. Возникает вопрос: от чего зависит эта сила? Ответить было бы очень трудно. Мы должны были бы исследовать зависимость силы от скорости магнита, от его формы и от формы витков. Больше того, будучи истолкован на старом языке, этот эксперимент вообще не дал бы нам никакого указания на то, может ли появиться индукционный ток благодаря движению другого соленоида, по ко-

торому течёт ток и которым мы заменим движущийся магнитный стержень.

Совершенно иным оказывается дело, если мы применяем язык поля и вновь полагаемся на тот принцип, что

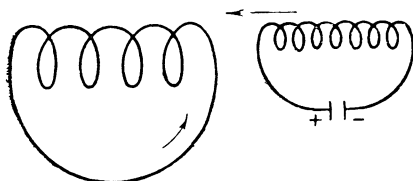


Рис. 50.

действие определяется полем. Мы сразу видим, что соленоид, по которому течёт ток, будет действовать так же, как и магнитный стержень. Рисунок 50 изображает два соленоида: один небольшой, по которому течёт ток, а другой по-

больше, в котором обнаруживается индукционный ток. Мы могли бы двигать малый соленоид, как раньше двигали магнитный стержень, возбуждая в большем соленоиде индукционный ток. Больше того, вместо движения малого соленоида, мы могли бы возбуждать и нарушать магнитное поле возбуждением и разрывом тока, то-есть замыканием и размыканием цепи. Ещё раз новые предсказания теории поля подтверждаются опытом!

Возьмём более простой пример. Пусть мы имеем замкнутую электрическую цепь без всякого источника тока. Пусть где-либо поблизости имеется магнитное

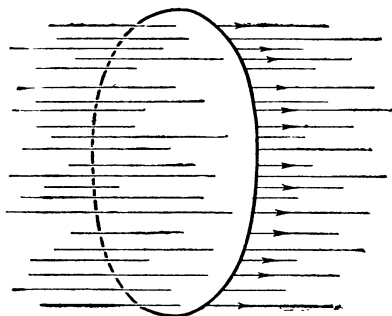


Рис. 51.

поле. Для нас безразлично, является ли источником этого магнитного поля другой виток, по которому течёт ток, или же магнитный стержень. Рисунок 51 изображает замкнутый виток и магнитные силовые линии. Качественное и количественное описание индукционных явлений является очень простым в терминологии поля. Как видно

из рисунка, некоторые силовые линии проходят через круг, ограниченный витком. Мы должны рассмотреть силовые линии, проходящие через часть плоскости, ограниченную витком. До тех пор, пока поле остаётся неизменным, никакого тока нет, как бы ни была велика сила поля. Но как только изменяется число силовых линий, проходящих через круг, окружённый замкнутой электрической цепью, так в ней возникает ток. Ток определяется изменением числа силовых линий, проходящих через поверхность, независимо от того, чем вызывается это изменение. Это изменение числа силовых линий является единственным существенным понятием как для качественного, так и для количественного описания индукционного тока. «Число линий изменяется» — это означает, что изменяется плотность расположения линий, а это, как мы помним, означает, что изменяется сила поля.

Это является существенным моментом в цепи наших рассуждений: изменение магнитного поля → индукционный ток → движение зарядов → наличие электрического поля.

Отсюда следует: *изменяющееся магнитное поле сопровождается электрическим полем.*

Таким образом, мы нашли две наиболее важные основы для теории электрического и магнитного поля. Первая — это связь между изменяющимся электрическим полем и магнитным полем. Она основана на опыте Эрстеда, обнаружившем отклонение магнитной иглы под действием поля тока, и приводит к заключению: *изменяющееся электрическое поле сопровождается магнитным полем.*

Вторая связывает изменяющееся магнитное поле с индукционным током и основана на опыте Фарадея. Обе они составляют основу количественного описания.

И снова электрическое поле, сопровождающее изменяющееся магнитное поле, выступает как нечто реальное. Мы уже раньше должны были предположить, что магнитное поле тока существует и в отсутствии пробного полюса. Подобным же образом мы должны считать, что и электрическое поле существует в отсутствии замкнутого проводника; устанавливающего наличие индукционного тока.

Фактически две основы, на которых строится поле, можно свести к одной единственной, а именно к результатам

опыта Эрстеда. Из них при помощи закона сохранения энергии можно вывести и результаты опыта Фарадея. Мы прибегали к двум основам при построении поля только ради ясности и экономии.

Подчеркнём ещё раз значение описания с помощью поля. Пусть имеется виток, по которому течёт ток, возникающий, например, от батареи Вольта. Внезапно связь проводника с источником тока разрывается. Теперь, конечно, никакого тока нет. Но в момент этого короткого разрыва имеет место сложный процесс, который опять-таки может быть предсказан теорией поля. Перед разрывом тока вокруг проводника существовало магнитное поле. Оно перестало существовать в момент, когда ток был прерван. Следовательно, из-за разрыва тока магнитное поле исчезло. Число силовых линий, проходящих через поверхность, окружённую цепью, очень быстро изменилось. Но такое быстрое изменение, как бы оно ни осуществлялось, должно вызвать индукционный ток. Чтó действительно имеет значение, — так это изменение магнитного поля, возбуждающее индукционный ток, тем более сильный, чем значительнее изменение поля. Этот вывод является другой проверкой теории. Разрыв тока должен сопровождаться возникновением сильного кратковременного индукционного тока. Эксперимент снова подтверждает предсказание теории. Тот, кто когда-либо разрывал ток, должен был заметить, что при этом появляется искра. Эта искра указывает на огромную разность потенциалов, вызванную быстрым изменением магнитного поля.

Тот же самый процесс можно рассмотреть с другой точки зрения, с точки зрения энергии. Магнитное поле исчезло, но появилась искра. Искра обладает некоторой энергией, поэтому и магнитное поле должно обладать энергией. Чтобы последовательно применять понятие поля и его язык, мы должны считать, что магнитное поле обладает запасом энергии. Только встав на этот путь, мы будем в состоянии описать магнитные и электрические явления в согласии с законом сохранения энергии.

Будучи вначале лишь вспомогательной моделью, поле становится все более и более реальным. Приписывание

полю энергии является дальнейшим шагом в развитии, в котором понятие поля оказывается всё более существенным, а субстанциональные концепции, свойственные механистической точке зрения, всё более отходят на задний план.

Реальность поля

Количественная, математическая формулировка законов поля дана в так называемых уравнениях Максвелла. Указанные выше факты привели к формулировке этих уравнений, но содержание их значительно богаче, чем мы могли показать. Их простая форма скрывает глубину, обнаруживаемую только при тщательном изучении.

Формулировка этих уравнений является самым важным событием со времени Ньютона не только вследствие ценности их содержания, но и потому, что они дают образец нового типа законов.

Характерную особенность уравнений Максвелла, которая проявляется и во всех других уравнениях современной физики, можно выразить в одном предложении: Уравнения Максвелла суть законы, выражающие структуру поля.

Почему уравнения Максвелла отличаются по своей форме и характеру от уравнений классической механики? Что означает утверждение, что эти уравнения описывают структуру поля? Как это возможно, что в результате опытов Эрстеда и Фарадея мы можем образовать новый тип закона, который оказывается столь важным для дальнейшего развития физики?

Мы уже видели из опыта Эрстеда, как силовые линии магнитного поля замыкаются вокруг изменяющегося электрического поля. Из опыта Фарадея мы видели, как силовые линии электрического поля замыкаются вокруг изменяющегося магнитного поля. Чтобы обрисовать некоторые характерные особенности теории Максвелла, сосредоточим всё внимание на одном из этих опытов, скажем, на опыте Фарадея. Повторим рисунок, показывающий, как электрический ток индуцируется под влиянием изменяющегося магнитного поля. Мы уже знаем, что индукционный ток возникает при изменении числа силовых линий, проходя-

щих сквозь поверхность, ограниченную проводником. Ток возникнет тогда, когда изменится магнитное поле, или деформируется виток, или когда он будет двигаться, словом, когда изменится число магнитных линий, проходящих через поверхность, независимо от того, чем вызвано это изменение.

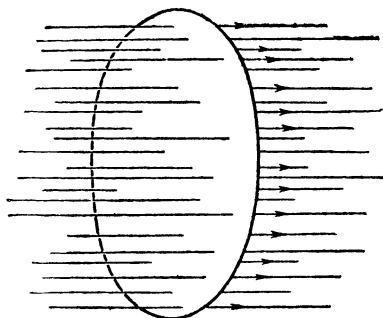


Рис. 52.

Если бы нужно было учитывать все эти различные возможности, обсуждать частные влияния каждой из них, то это привело бы к очень сложной теории. Но не можем ли мы упростить нашу задачу? Постараемся исключить из нашего рассмотрения всё, что относится к форме витка, к его длине, к поверхности, ограниченной проводни-

ком. Представим себе, что виток, изображённый на последней фигуре, становится всё меньше и меньше, постепенно стягиваясь к очень малому витку, заключающему в себе лишь некоторую точку пространства. В этом предельном случае, когда замкнутая кривая стягивается к точке, величина и форма ее автоматически исчезают из нашего рассмотрения, и мы получаем законы, связывающие изменения магнитного и электрического полей в любой момент, в любой точке пространства.

Это один из принципиальных шагов, ведущий к уравнениям Максвелла. Он опять-таки является идеализированным опытом, выполненным в воображении путём повторения опыта Фарадея с витком, стягивающимся к точке.

Фактически его следовало бы скорее назвать полушагом, чем целым шагом. До сих пор наше внимание было сосредоточено на опыте Фарадея. Но так же внимательно и подобным же образом нужно рассмотреть и другую основу теории поля, опирающуюся на опыт Эрстеда. В этом опыте магнитные силовые линии замыкаются вокруг тока. Стягивая витки магнитных силовых линий к точке, мы выполняем вторую половину шага, а весь шаг даёт связь

между изменениями магнитных и электрических полей в любой точке пространства и в любой момент.

Но необходим ещё другой существенный шаг. Согласно опыту Фарадея необходим проводник, с помощью которого обнаруживается наличие электрического поля, так же как в опыте Эрстеда необходим магнитный полюс или игла, обнаруживающая наличие магнитного поля. Новые теоретические идеи Максвелла идут дальше этих экспериментальных фактов. Электрическое и магнитное поля или, короче, электромагнитное поле является, согласно теории Максвелла, чем-то реальным. Электрическое поле создаётся изменяющимся магнитным полем совершенно независимо от того, имеется ли проводник для обнаружения его существования. Магнитное поле создаётся изменяющимся электрическим полем независимо от того, имеется ли магнитный полюс для обнаружения его существования.

Таким образом, к уравнениям Максвелла приводят два существенных шага. Первый шаг: в рассмотренных опытах Эрстеда и Роуланда круговые линии магнитного поля, замыкающиеся вокруг тока и изменяющегося электрического поля, должны быть стянуты к точке; в рассмотренном опыте Фарадея круговые линии электрического поля, замыкающиеся вокруг изменяющегося магнитного поля, тоже должны быть стянуты к точке. Второй шаг состоит в трактовке поля как чего-то реального. Созданное однажды электромагнитное поле существует, действует и изменяется согласно законам Максвелла.

Уравнения Максвелла описывают структуру электромагнитного поля. Ареной этих законов является всё пространство, а не одни только точки, в которых находятся вещество или заряды, как это имеет место для механических законов.

Вспомним, каким было положение дел в механике. Зная положение и скорость частиц в первоначальный момент времени, зная действующие силы, можно предвидеть всю траекторию, которую частица опишет в будущем. В теории Максвелла, если только мы знаем поле в какой-либо момент времени, мы можем вывести из уравнений, установленных этой теорией, как будет изменяться всё поле в пространстве и во времени. Уравнения Максвелла

позволяют нам следовать за историей поля так же, как уравнения механики позволяли следовать за историей материальных частиц.

Но имеется ещё одно существенное различие между механическими законами и законами Максвелла. Сравнение законов тяготения Ньютона и законов поля Максвелла подчёркивает некоторые характерные черты, выраженные этими уравнениями.

С помощью законов Ньютона мы можем вывести движение Земли, зная силу, действующую между Солнцем и Землёй. Эти законы связывают движение Земли с действием отдалённого Солнца. И Земля, и Солнце, хотя они и далеки друг от друга, оба принимают участие в игре сил.

В теории Максвелла нет вещественных участников действия. Математические уравнения этой теории выражают законы, управляющие электромагнитным полем. Они не связывают, как это имеет место в законе Ньютона, два широко разделённых события; они не связывают случившегося *здесь* с условиями *там*. Поле *здесь* и *теперь* зависит от поля *в непосредственном соседстве в момент, только что протекший*. Уравнения позволяют нам предвидеть, что случится немного дальше в пространстве и немного позднее во времени, если мы знаем, что происходит *здесь* и *теперь*. Они позволяют нам увеличивать наши знания поля малыми шагами. Мы можем вывести то, что происходит *здесь*, из того, что происходит *вдали*, путём суммирования этих очень малых шагов. В теории же Ньютона, наоборот, допустимы только большие шаги, связывающие отдалённые события. Опыты Эрстеда и Фарадея можно рассмотреть с точки зрения теории Максвелла, но только суммируя малые шаги, каждый из которых управляется уравнениями Максвелла.

Изучение уравнений Максвелла с математической стороны показывает, что из них можно сделать новые и действительно неожиданные заключения, а всю теорию можно испытать на гораздо более высоком уровне, потому что теоретические следствия теперь имеют количественный характер и обосновываются всей цепью логических аргументов.

Представим себе вновь идеальный опыт. Небольшая электрически заряжённая сфера под влиянием внешних сил вынуждена быстро и ритмично колебаться, подобно маятнику. Как, опираясь на знания об изменениях поля, которые уже есть у нас, будем мы описывать на языке поля всё, что при этом происходит?

Колебания заряда создают изменяющееся электрическое поле. Оно всегда сопровождается изменяющимся магнитным полем. Если поблизости расположен проводник, образующий замкнутую цепь, то изменяющееся магнитное поле будет сопровождаться электрическим током в цепи. Всё это является лишь повторением известных фактов, но изучение уравнений Максвелла даёт гораздо более глубокое проникновение в проблему колебания электрического заряда. С помощью математического вывода из уравнений Максвелла мы можем установить характер поля, окружающего колеблющийся заряд, его структуру вблизи и вдали от источника и его изменение со временем. Результатом такого вывода является представление об *электромагнитной волне*. От колеблющегося заряда излучается энергия, которая распространяется в пространстве с конечной скоростью; но передача энергии, движение состояния характерно для всех волновых явлений.

Мы уже рассматривали различные типы волн. Когда в среде распространялись изменения плотности, мы имели продольную волну, вызванную пульсацией сферы. В студнеобразной среде распространялись поперечные волны. В этом случае через среду передавалась деформация студнеобразной массы, вызванная вращением сферы. Но какого же рода изменения распространяются теперь, в случае электромагнитной волны? Это — изменения электромагнитного поля. Всякое изменение электрического поля вызывает магнитное поле; всякое изменение этого магнитного поля вызывает электрическое поле; всякое изменение электрического... и т. д. Так как поле несёт энергию, все эти изменения, распространяющиеся в пространстве с конечной скоростью, образуют волну. Электрические и магнитные силовые линии всегда лежат, как это выведено теоретически, в плоскости, перпендикулярной к направлению распространения. Образовавшаяся волна яв-

ляется, следовательно, поперечной. Первоначальные черты картины поля, которую мы нарисовали на основе опытов Эрстеда и Фарадея, ещё сохранены, но мы теперь устанавливаем, что поле имеет более глубокое значение.

Электромагнитная волна распространяется в пустом пространстве. Таков новый вывод этой теории. Если колеблющийся заряд перестаёт двигаться, то его поле становится электростатическим. Но серия волн, созданных колебанием заряда, продолжает распространяться. Волны ведут независимое существование, и история их изменений может быть прослежена так же, как и история любого другого материального объекта.

Мы приходим к заключению, что наша картина электромагнитной волны, распространяющейся с конечной скоростью в пространстве и изменяющейся со временем, вытекает из уравнений Максвелла только потому, что они описывают структуру электромагнитного поля в любой точке пространства и для любого момента времени.

Имеется другой очень важный вопрос. С какой скоростью распространяется электромагнитная волна в пространстве? Опираясь на некоторые данные, полученные из простых опытов, ничего общего не имеющих с действительным распространением волн, теория Максвелла даёт ясный ответ: *скорость электромагнитных волн равна скорости света.*

Опыты Эрстеда и Фарадея создали основу, на которой построены законы Максвелла. Все наши так далёко идущие выводы основывались на внимательном изучении этих законов, выраженных на языке поля. Теоретическое открытие электромагнитной волны, распространяющейся со скоростью света, является одним из величайших достижений в истории науки.

Эксперимент подтвердил предсказания теории. Пятьдесят лет назад Герц впервые доказал существование электромагнитных волн и экспериментально подтвердил, что их скорость равна скорости света. В наши дни миллионы людей знают, как электромагнитные волны посылаются и принимаются. Их приборы гораздо более сложны, чем те, которые употреблял Герц, и они обнаруживают наличие волн не только за несколько метров, а даже за тысячи километров от источника.

Поле и эфир

Электромагнитная волна поперечна и распространяется со скоростью света в пустом пространстве. Тот факт, что скорости их равны, внушает мысль о тесной связи оптических и электромагнитных явлений.

Когда мы должны были выбирать между корпускулярной и волновой теорией, мы склонились к выбору волновой. Самым сильным аргументом, определившим наше решение, была диффракция света. Но мы не будем противоречить ни одному объяснению оптических фактов, если наряду с этим предположим, что световая волна есть волна электромагнитная. Напротив, можно сформулировать ещё и другие заключения в пользу этого предположения. Если это действительно так, то должна существовать некоторая связь между оптическими и электрическими свойствами вещества, которую можно вывести из теории Максвелла. Тот факт, что такие заключения можно в действительности сделать и что они выдержали экспериментальную проверку, является существенным аргументом в пользу электромагнитной теории света.

Этот замечательный результат обязан теории поля. Две, казалось бы, не связанные ветви науки объединяются одной теорией. Одни и те же уравнения Максвелла описывают и электромагнитную индукцию, и оптическую рефракцию (преломление света). Если наша цель состоит в том, чтобы описать всё, что когда-либо случилось или может случиться, с помощью одной теории, то объединение оптики и электричества, несомненно, представляет собой очень большой шаг в этом направлении. С физической точки зрения единственное различие между обычной электромагнитной волной и световой волной заключается в длине волны: она очень мала для световых волн, обнаруживаемых человеческим глазом, и велика для обычных электромагнитных волн, обнаруживаемых радиоприёмником.

Старый механистический взгляд пытался свести все явления природы к силам, действующим между частицами вещества. На этом механистическом взгляде базировалась первая наивная теория электрических жидкостей. Для физика начала девятнадцатого столетия не существо-

вало поля. Для него были реальными только субстанция и её изменения. Он старался описать действие двух электрических зарядов только с помощью понятий, относящихся непосредственно к обоим зарядам.

Сначала понятие поля было не более, как приём, облегчающий понимание явлений с механической точки зрения. Наш новый язык — это описание поля между обоими зарядами, а не самих зарядов; описание поля и является существенным для понимания действия зарядов. Признание новых понятий постепенно росло, пока субстанция не была оттеснена на задний план полем. Стало ясно, что в физике произошло нечто, весьма важное. Было создано новое понятие, для которого не было места в механистическом описании. Постепенно понятие поля утвердило за собой руководящее место в физике и сохранилось в качестве одного из основных физических понятий. Для современного физика электромагнитное поле столь же реально, как и стул, на котором он сидит.

Но было бы неверным считать, что новое воззрение — теория поля — освободило науку от заблуждений старой теории электрических жидкостей или что новая теория разрушает достижения старой. Новая теория выявляет как достоинство, так и ограниченность старой теории и позволяет нам оценить старые понятия с более глубокой точки зрения. Это справедливо не только по отношению к теориям электрических жидкостей и поля, но и по отношению ко всем изменениям в физических теориях, как бы революционны они ни казались. В теории Максвелла, например, мы ещё находим понятие электрического заряда, хотя заряд понимается только как источник электрического поля. Так же справедлив и закон Кулона; он содержится в уравнениях Максвелла, из которых его можно вывести в качестве одного из многих следствий. Мы можем применять старую теорию всякий раз, когда исследуются факты в той области, где она справедлива.

Но с таким же успехом мы можем применять и новую теорию, так как все известные факты заключены в тех пределах, в которых она справедлива.

Для сравнения мы могли бы сказать, что создание новой теории непохоже на разрушение старого амбара и

возведение на его месте небоскрёба. Оно скорее похоже на восхождение на гору, которое открывает новые и широкие виды, показывающие неожиданные связи между нашей отправной точкой и её богатым окружением. Но точка, от которой мы отправлялись, ещё существует и может быть видна, хотя она кажется меньше и составляет крохотную часть открывшегося нашему взору обширного ландшафта.

Этого положения, с которого открываются такие широкие перспективы, мы достигли в результате отважного преодоления препятствий на нашем пути вверх.

В самом деле, прошло много времени, прежде чем было признано богатое содержание теории Максвелла. Сперва поле рассматривали как нечто, что впоследствии можно будет истолковать механистически с помощью эфира. Со временем стало ясно, что эту программу нельзя осуществить, что достижения теории поля стали уже слишком поразительными и важными, чтобы их можно было заменить механистическими догмами. С другой стороны, задача придумывания механической модели эфира представлялась всё менее и менее интересной и результат в силу вынужденного и искусственного характера допущений всё более и более обескураживающим.

Единственный выход — это допустить, что пространство обладает физическим свойством передавать электромагнитные волны, и не слишком много заботиться о смысле этого утверждения. Можно ещё употреблять слово эфир, но только для того, чтобы выразить упомянутое физическое свойство пространства. Слово эфир изменяло свой смысл много раз в процессе развития науки. В данный момент оно уже не употребляется для обозначения среды, построенной из частиц. Его история, никоим образом не законченная, продолжается теорией относительности.

Механические леса

Достигнув этой стадии истории, мы должны вернуться к началу — к закону инерции Галилея. Мы процитируем его ещё раз:

«Всякое тело сохраняет состояние покоя или равномерного прямолинейного движения, если только оно не вынуждено изменить его под влиянием действующих сил,

Раз идея инерции понята, кажется удивительным, что же ещё можно сказать о ней. Однако, хотя эта проблема уже обсуждалась, она ещё никоим образом не исчерпана.

Представим себе серьёзного учёного, полагающего, что закон инерции можно подтвердить или опровергнуть прямыми экспериментами. Он толкает небольшие шарики вдоль горизонтального стола, стараясь по возможности исключить трение. Он замечает, что движение становится всё более равномерным по мере того, как стол и шарики становятся всё более гладкими. И вот в момент, когда он готов провозгласить принцип инерции, кто-то вдруг разыгрывает над ним шутку. Наш физик работает в комнате без окон и не имеет никакой связи с внешним миром. Шутник строит какой-то механизм, позволяющий ему быстро вращать всю комнату вокруг оси, проходящей через её центр. Коль скоро вращение началось, наш физик наблюдает новые и неожиданные факты. Шар, только что двигавшийся равномерно, стремится теперь удалиться от центра и возможно ближе приблизиться к стенам комнаты. Он сам ощущает странную силу, толкающую его к стене. Он испытывает такое же чувство, как человек, находящийся в поезде или автомобиле, который едет по сильно закруглённому пути или даже больше, как человек на вращающейся карусели. Все его предыдущие результаты разбиваются вдребезги.

Наш физик должен был бы вместе с законом инерции отбросить и все механические законы. Закон инерции был его исходной точкой; если она меняется, то меняются и все его последующие выводы. Наблюдатель, решивший всю свою жизнь провести во вращающейся комнате и выполнить там все свои опыты, имел бы законы механики, отличные от наших. С другой стороны, если бы он вошёл в комнату с глубокими знаниями и твёрдой уверенностью в принципах физики, то он объяснил бы кажущееся нарушение законов механики, предположив, что комната вращается. Механическими опытами он мог бы установить, как именно она вращается.

Почему мы проявляем так много интереса к наблюдателю во вращающейся комнате? Просто потому, что мы на

земле находимся в известной степени в таком же положении. Со времени Коперника нам известно, что Земля вращается вокруг своей оси и движется вокруг Солнца. Даже эта простая идея, столь ясная для каждого, не осталась незатронутой прогрессом науки. Но оставим на время этот вопрос и примем точку зрения Коперника. Если бы наш вращающийся наблюдатель не мог подтвердить законы механики, то и мы на Земле не были бы в состоянии этого сделать. Но вращение Земли происходит сравнительно медленно, так что этот эффект не очень заметен. Тем не менее существует много опытов, показывающих небольшое отклонение от механических законов, и их взаимная согласованность может рассматриваться как доказательство вращения Земли.

К несчастью, мы не можем поместиться где-то между Солнцем и Землёй, чтобы доказать там строгую справедливость закона инерции и взглянуть на вращающуюся Землю. Это можно сделать лишь в воображении. Все наши опыты должны быть проделаны на Земле, на которой мы вынуждены жить. Этот факт часто выражается на научном языке так: *нашей координатной системой является Земля.*

Чтобы яснее показать смысл этих слов, возьмём простой пример. Мы можем заранее сказать, где будет находиться брошенный с башни камень в любой момент времени, и мы можем проверить это предсказание наблюдением. Если рядом с башней помещён масштаб, мы можем предсказать, с какой отметкой на этом масштабе будет совпадать падающее тело в любой заданный момент времени. Разумеется, башня и масштаб не должны быть сделаны из резины или какого-либо другого материала, который бы подвергался изменению в процессе опыта. В самом деле, неизменность масштаба, жёстко связанного с Землёй, и хорошие часы — это всё, что нам принципиально нужно для опыта. Если мы их имеем, то мы можем не обращать внимания не только на архитектуру башни, но даже и на присутствие самой башни. Предыдущие предположения весьма тривиальны, и нет необходимости подробно описывать такие опыты. Но этот анализ показывает, как много скрытых допущений имеется в любом из наших заявле-

10*

ний. В данном случае мы допустили существование твёрдого масштаба и идеальных часов, без которых невозможно было бы проконтролировать закон Галилея о падении тел. С помощью этих простых, но основных физических приборов — масштаба и часов — мы можем подтвердить указанный механический закон с определённой степенью точности. Если эксперимент выполнен тщательно, он обнаруживает несоответствие с теорией, обязанное вращению Земли или, иными словами, тому факту, что законы механики, как они здесь формулированы, не строго справедливы в системе координат, жёстко связанной с Землёй.

Во всех механических экспериментах, независимо от их типа, мы должны определить положения материальных точек в некоторый определённый момент времени, так же как и в вышеуказанном опыте с падающим телом. Но положение всегда должно определяться по отношению к чему-то, подобно тому, как в предыдущем случае оно определялось по отношению к башне и масштабу. Чтобы определить положения тел, мы должны иметь то, что мы называем некоторым телом отсчёта, или *системой отсчёта*. Так, при определении положений предметов и людей в городе такую систему отсчёта представляют улицы и проспекты. До сих пор мы не беспокоились о том, что надо определить систему отсчёта, когда приводили законы механики, потому что мы живём на Земле и перед нами в любом частном случае не возникают трудности, когда мы выбираем систему отсчёта, жёстко связанную с Землёй. Эта система отсчёта, к которой мы относим все наши наблюдения, построенная из твёрдых неизменяемых тел, — своеобразные механические леса, — называется *системой координат*.

Все наши физические утверждения имели некоторый недостаток. Мы не обращали внимания на тот факт, что все наблюдения должны производиться в определённой системе координат. Вместо описания структуры этой системы координат мы игнорировали её существование. Например, когда мы писали «тело движется равномерно...», мы должны были бы писать: «тело движется равномерно по отношению к выбранной системе координат...». Приве-

дённый опыт с вращающейся комнатой научил нас, что результаты эксперимента могут зависеть от выбранной системы координат.

Если две системы координат вращаются относительно друг друга, то законы механики не могут быть справедливыми в обеих системах. Если поверхность воды в бассейне, образующаяся в одной из этих систем координат, горизонтальна, то во вращающейся системе поверхность воды такого же бассейна примет искривлённую форму, подобную той, которую имеет поверхность кофе в стакане, когда его помешивают ложечкой.

Когда мы формулировали принципиальные законы механики, мы опустили один важный момент. Мы не установили, в какой системе координат они справедливы. Благодаря этому вся классическая механика висит в воздухе, так как мы не знаем, к какой системе отсчёта она отнесена. Однако, пройдём временно мимо этой трудности. Мы сделаем несколько неточное предположение, что законы классической механики справедливы в каждой системе координат, жёстко связанной с Землёй. Это делается для того, чтобы фиксировать систему координат и сделать наши утверждения определёнными. Хотя наше утверждение о том, что Земля является подходящей системой отсчёта и не вполне верно, мы всё же пока примем его.

Мы предполагаем, следовательно, что существует одна система координат, для которой справедливы законы механики. Является ли она единственной? Предположим, что мы имеем такую систему координат, как поезд, пароход или аэроплан, движущийся относительно земли. Будут ли законы механики справедливыми и для этих новых систем координат? Мы определённо знаем, что они не всегда справедливы, например, в отношении поезда, идущего на повороте, или парохода, который качается во время бури, или самолёта во время шторма. Начнём с простого примера. Пусть некоторая система координат движется прямолинейно и равномерно относительно нашей «хорошей» системы координат, то-есть, относительно системы, в которой законы механики справедливы. Например, пусть это будет идеальный поезд или пароход, плывущий с изумительной плавностью и с неизменной

скоростью вдоль прямой. Мы знаем из повседневного опыта, что если обе системы будут «хорошими», то физические опыты, произведённые в прямолинейно и равномерно движущемся поезде или пароходе, дадут те же результаты, что и на Земле. Но если поезд останавливается или резко ускоряется, или если море бурно, то происходят странные вещи. В поезде чемоданы выпадают из багажных сеток, на пароходе столы и стулья опрокидываются, а пассажиры страдают морской болезнью. С физической точки зрения — это просто означает, что законы механики не могут быть применимы к этим системам координат, что они являются «плохими» системами.

Этот результат может быть выражен с помощью так называемого *принципа относительности Галилея*:

Если законы механики справедливы в одной системе координат, то они справедливы и в любой другой системе, движущейся прямолинейно и равномерно относительно первой.

Если две системы координат движутся друг относительно друга неравномерно, то законы механики не могут быть справедливыми в обеих системах одновременно. «Хорошие» системы координат, то-есть те, в которых законы механики справедливы, мы называем *инерциальными системами*. Вопрос о том, существует ли вообще инерциальная система, ещё не решён. Но если есть одна такая система, то их имеется бесконечное множество. Каждая система, движущаяся прямолинейно и равномерно относительно первоначальной, является тоже инерциальной системой.

Рассмотрим случай двух систем, отправляющихся из некоторого пункта и движущихся прямолинейно и равномерно друг относительно друга с известной скоростью. Тот, кто предпочитает конкретные представления, может думать о корабле или поезде, движущемся относительно Земли. Законы механики могут быть подтверждены экспериментально с одинаковой степенью точности как на Земле, так и на поезде или корабле, движущемся прямолинейно и равномерно. Некоторое затруднение возникает лишь тогда, когда наблюдатели в обеих системах начинают обсуждать результаты наблюдения одного и того же события с точки зрения своей собственной системы координат.

Каждому хочется перевести наблюдения другого на свой собственный язык. Опять простой пример: одно и то же движение частицы наблюдается из двух систем координат — с Земли и из поезда, движущегося прямолинейно и равномерно. Обе системы инерциальны. Достаточно ли знать, что наблюдается в одной системе, для того, чтобы найти, что наблюдается в другой, если известны относительные скорости и положения обеих систем в некоторый момент времени? Как перейти от одной системы координат к другой? Это весьма существенно знать, так как обе системы эквивалентны и для описания событий в природе обе одинаково пригодны. В действительности совершенно достаточно знать результаты, полученные наблюдателем в одной системе, чтобы предсказать результаты, полученные наблюдателем в другой.

Рассмотрим проблему более абстрактно, без парохода или поезда. Ради простоты будем исследовать только движение по прямым линиям. У нас имеются твёрдый стержень со шкалой и хорошие часы. Твёрдый стержень для простого случая прямолинейного движения представляет собой систему координат, совершенно так же, как масштаб у башни в опыте Галилея. Всегда проще и лучше не обращать внимания на башни, стены, улицы и тому подобное, а мыслить систему координат в виде твёрдого стержня, в случае прямолинейного движения, и твёрдого угольника из трёх перпендикулярных стержней, в случае произвольного движения в пространстве. Допустим, что мы имеем в простейшем случае две системы координат, т. е. два твёрдых стержня; положим один стержень на другой и назовём их соответственно «верхней» и «нижней» системой координат. Предположим, что обе системы координат движутся с определённой скоростью друг относительно друга, так что один стержень скользит вдоль другого. Будет осторожнее предположить, что оба стержня бесконечны по длине и имеют начальные точки, но не имеют конечных. Для обеих систем достаточно иметь одни часы, так как течение времени в них одинаково. В начальный момент времени наблюдения начальные точки обоих стержней совпадают. Положение материальной точки в этот момент характеризуется в обеих системах одним и тем же

числом. Положение материальной точки совпадает с некоторой точкой на шкале стержня; таким образом мы получаем число, определяющее положение этой материальной точки. Но, если стержни движутся равномерно относительно друг друга, то числа, определяющие положение точки на обоих стержнях, будут через некоторое время, скажем, через секунду, различны. Рассмотрим материальную точку, покоящуюся на верхнем стержне (рис. 53). Число, определяющее её положение в верхней системе координат, не изменяется со временем. Но соответствующее число на

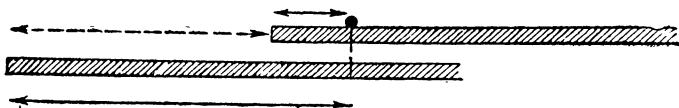


Рис. 53.

нижнем стержне будет изменяться. Вместо слов: «число, определяющее положение точки» мы часто будем говорить: «*координата точки*». Хотя следующее предложение звучит запутанно, тем не менее из рисунка мы видим, что оно правильно и выражает нечто очень простое. Координата точки в нижней системе координат равна её координате в верхней системе плюс координата начала верхней системы относительно нижней. Весьма важно, что мы всегда можем подсчитать положение частицы в одной системе координат, если знаем её положение в другой системе. Для этого мы должны знать относительное положение рассматриваемых координатных систем в любой момент времени. Хотя всё это звучит по-учёному, на самом деле всё это очень просто и вполне заслуживает такого детального обсуждения, не говоря уже о том, что это будет полезно впоследствии.

Необходимо отметить различие между определением положения точки и определением времени события. Каждый наблюдатель имеет свой собственный стержень, который образует его систему координат, но часы у всех одни и те же. Время есть нечто «абсолютное» и течёт одинаково для всех наблюдателей во всех системах.

Теперь другой пример. Человек прогуливается вдоль палубы большого корабля со скоростью трёх километров

в час. Это его скорость относительно корабля или, другими словами, скорость относительно системы координат, жёстко связанной с кораблём. Если скорость корабля относительно берега тридцать километров в час и если прямолинейные и равномерные движения корабля и человека имеют одно и то же направление, то скорость прогуливающегося человека по отношению к наблюдателю на берегу будет равна тридцати трём километрам в час, а по отношению к кораблю — трём километрам в час. Мы мо-

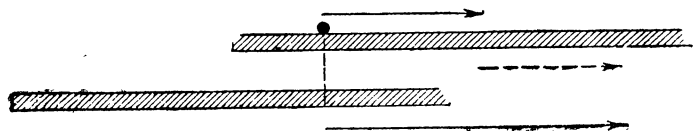


Рис. 54.

жем формулировать этот факт в более общем виде: скорость движущейся материальной точки относительно нижней системы координат равна скорости относительно верхней системы плюс или минус скорость верхней системы относительно нижней в зависимости от того, имеют ли скорости одинаковые направления или противоположные (рис. 54). Мы всегда, следовательно, можем перевести от одной системы координат к другой не только координаты, но и скорости, если нам известны относительные скорости обеих систем. Положения, или координаты, и скорости являются примерами величин, которые различаются в различных системах координат и которые связаны друг с другом определёнными, в данном случае простыми, *законами преобразования*.

Но существуют величины, которые одинаковы в обеих системах и которые не нуждаются ни в каких законах преобразований. Возьмём не одну, а две определённые точки на верхнем стержне и рассмотрим расстояние между ними. Это расстояние является разностью координат обеих точек. Чтобы найти положения двух точек относительно различных систем координат, мы должны использовать законы преобразований. Но при образовании разности двух координат то, что привносит другая система координат,

нат, покрывается и исчезает, как это ясно из рисунка 55. Мы должны прибавить, а затем вычесть расстояние между началами обеих систем. Поэтому расстояние между двумя точками *инвариантно*, то-есть не зависит от выбора систем координат.

Следующим примером величины, не зависящей от системы координат, является изменение скорости — понятие, хорошо известное нам из механики. Пусть опять материальная точка, движущаяся вдоль прямой, наблю-

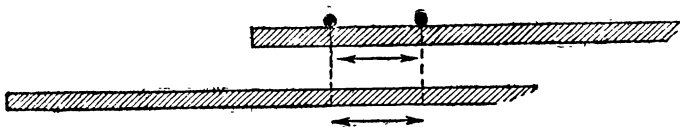


Рис. 55.

дается в двух системах координат. Изменение её скорости для наблюдателя в каждой системе представляет собой разность между двумя скоростями, а то, что привносится равномерным относительным движением обеих систем координат, уничтожается, когда подсчитывается разность. Следовательно, изменение скорости инвариантно, хотя, разумеется, лишь при условии что относительное движение обеих систем координат равномерно. В противном случае изменение скорости было бы различно для каждой из обеих систем координат; это различие обуславливается изменением скорости относительного движения обеих стержней, представляющих наши координатные системы.

Наконец, последний пример! Пусть мы имеем две материальные точки, между которыми действует сила, зависящая только от расстояния. В случае прямолинейного движения расстояние, а следовательно, так же и сила, инвариантны. Поэтому закон Ньютона, связывающий силу с изменением скорости, будет справедлив в обеих системах координат. Ещё раз мы получаем вывод, который подтверждается повседневным опытом: если законы механики справедливы в одной системе координат, то они справедливы и во всех системах, движущихся равномерно и прямолинейно относительно первой. Конечно, наш

пример был очень простым, рассматривалось прямолинейное движение, для которого система координат могла быть представлена твёрдым стержнем. Но наши выводы справедливы вообще и они могут быть подытожены следующим образом.

1. Мы не знаем никакого правила для отыскания инерциальной системы. Однако, если задана одна инерциальная система, то мы можем найти бесконечное число их, так как все системы координат, движущихся прямолинейно и равномерно относительно друг друга, являются инерциальными, если инерциальна одна из них.

2. Время, соответствующее одному и тому же событию, одинаково во всех системах координат. Но координаты и скорости различны и изменяются согласно закону преобразования.

3. Хотя координаты и скорости изменяются при переходе от одной системы координат к другой, сила и изменение скорости, а стало быть, и законы механики инвариантны по отношению к преобразованиям.

Законы преобразования, сформулированные нами выше для координат и скоростей, мы будем называть *законами преобразования классической механики*, или, короче, *классическими преобразованиями*.

Эфир и движение

Принцип относительности Галилея справедлив для механических явлений. Во всех инерциальных системах, движущихся относительно друг друга, применимы одни и те же законы механики. Справедлив ли этот принцип и для немеханических явлений, особенно тех, для которых понятия поля оказались столь важными? Все проблемы, которые сконцентрированы вокруг этого вопроса, сразу же приводят нас к исходной точке теории относительности.

Мы помним, что скорость света в вакууме или, другими словами, в эфире равна 300 000 километрам в секунду и что свет это — электромагнитные волны, распространяющиеся в эфире. Электромагнитное поле несёт энергию, которая, будучи излучена однажды из своего источника,

имеет независимое существование. Пока мы будем попрежнему считать, что эфир есть среда, в которой распространяются электромагнитные, а стало быть, и световые волны, хотя мы и знаем хорошо, как много трудностей связано с его механической структурой.

Представим себе, что мы сидим в закрытой комнате, настолько изолированной от внешнего мира, что воздух не может ни войти, ни удалиться из неё. Если мы разговариваем, то мы, с физической точки зрения, создаём звуковые волны, которые распространяются в воздухе от их покоящегося источника со скоростью звука. Если бы между ртом и ухом не было воздуха или другой вещественной среды, то мы не могли бы обнаружить звук. Опыт показал, что скорость звука в воздухе одинакова во всех направлениях, если нет ветра, и воздух находится в покое относительно выбранной системы координат.

Вообразим теперь, что наша комната движется прямолинейно и равномерно в пространстве. Человек снаружи видит сквозь стеклянные стены движущейся комнаты (или поезда, если вы предпочитаете) всё, что происходит внутри. Из измерений внутреннего наблюдателя он может найти скорость звука относительно его системы координат, связанной со средой, по отношению к которой движется комната. Здесь опять возникает старая, много раз обсуждавшаяся проблема определения скорости в одной системе координат, если она уже известна в другой системе.

Наблюдатель в комнате заявляет: скорость звука для меня одинакова во всех направлениях.

Внешний наблюдатель заявляет: скорость звука, распространяющегося в движущейся комнате, определённая в моей системе координат, не одинакова во всех направлениях. Она больше, чем установленная скорость звука, в направлении движения комнаты и меньше в противоположном направлении.

Эти заключения вытекают из классического преобразования и могут быть доказаны экспериментально. Комната увлекает находящуюся в ней материальную среду, воздух, в котором распространяются звуковые волны, и поэтому скорости звука будут различны для внешнего и внутреннего наблюдателя.

Из теории звука мы можем сделать несколько выводов о том, как распространяется волна в материальной среде. Если мы не желаем слышать говорящего, мы можем поступить следующим, хотя и не наипростейшим путём, а именно: бежать со скоростью, большей, чем скорость звука относительно воздуха, окружающего оратора. Тогда произведённые звуковые волны никогда не будут в состоянии достичь наших ушей. С другой стороны, если мы пропустили слово, которое никогда не будет повторено, мы должны бежать со скоростью, большей, чем скорость звука, чтобы настичь ушедшую волну и поймать давно произнесённое слово. Ни в одном и из этих примеров нет ничего нелогичного, за исключением того, что в обоих случаях мы должны будем бежать со скоростью около четырёхсот метров в секунду, но мы вполне можем представить себе, что дальнейшее развитие техники сделает такие скорости возможными. Пуля, выпущенная из ружья, действительно движется со скоростью, большей, чем скорость звука, и человек, помещённый внутри такой пули, никогда не услышал бы звук выстрела.

Все эти примеры — чисто механического характера, и мы можем теперь сформулировать важнейшие вопросы: можно ли всё только что сказанное о звуковой волне повторить применительно к световой волне. Можно ли принцип относительности Галилея и классические преобразования применить наряду с механическими также и к оптическим и электрическим явлениям? Было бы рискованно ответить на эти вопросы простым «да» или «нет», не вникая в их смысл более глубоко.

В случае звуковой волны в комнате, движущейся относительно внешнего наблюдателя прямолинейно и равномерно, очень существенны для наших выводов следующие обстоятельства:

Движущаяся комната увлекает воздух, в котором распространяются звуковые волны.

Скорости, наблюдаемые в обеих системах координат, движущихся друг относительно друга прямолинейно и равномерно, связаны классическим преобразованием.

Соответствующая проблема для света должна формулироваться несколько иначе. Наблюдатели в комнате больше

не разговаривают, а посылают во всех направлениях световые сигналы или световые волны. Предположим, далее, что источники, излучающие световые сигналы, всё время остаются в комнате. Световые волны распространяются в эфире подобно тому, как звуковые распространяются в воздухе.

Увлекается ли эфир комнатой, как увлекался ранее воздух? Так как механической модели эфира у нас нет, ответить на этот вопрос чрезвычайно трудно. Если комната закрыта, то воздух внутри неё вынужден двигаться вместе с ней. Очевидно, нет никакого смысла те же рассуждения относить к эфиру, так как в него погружена вся материя и он проникает повсюду. Для эфира нет закрытых дверей. «Движущаяся комната» теперь означает лишь движущуюся систему координат, с которой жёстко связан источник света. Однако, мы вполне можем представить себе, что движение комнаты, вместе со световым источником, увлекает с собой эфир подобно тому, как увлекались в закрытой комнате звуковой источник и воздух. Но точно так же мы можем представить себе и обратное: комната продвигается сквозь эфир, как корабль продвигается по абсолютно гладкому морю, не увлекая частицы среды, а продвигаясь между ними. В первой нашей картине движение комнаты вместе со световым источником увлекает эфир. В таком случае возможна аналогия со звуковой волной, и можно сделать совершенно такие же выводы. Во второй картине движение комнаты вместе со световым источником не увлекает эфира. В этом случае аналогия со звуковой волной невозможна, и выводы, сделанные для звуковой волны, для световой волны не годятся. Это — две крайние возможности. Мы могли бы ещё представить себе более сложную возможность, когда эфир лишь частично увлекается движением комнаты и источника света. Но нет никаких оснований обсуждать более сложные предположения, прежде чем не выяснено, какой из двух более простых крайних случаев подтверждает опыт.

Мы начнём с первой картины и соответственно этому временно предположим, что эфир увлекается движением комнаты и жёстко связанного с ней источника света. Если

мы уверены в справедливости принципа преобразования для скоростей звуковых волн, то теперь мы можем применить наши выводы так же и к световым волнам. Нет никаких оснований сомневаться в простом механическом законе преобразования, который устанавливает лишь, что скорости в известных случаях должны складываться, а в других вычитаться. Поэтому сейчас мы допустим и увлечение эфира движением комнаты и светового источника, и классическое преобразование.

Если я включаю свет, источник которого жёстко связан с моей комнатой, то скорость светового сигнала, как это экспериментально доказано, равна 300 000 километрам в секунду. Но внешний наблюдатель заметит движение комнаты, а следовательно, и движение источника света, и так как эфир увлекается, он должен будет сделать вывод: скорость света во внешней системе координат различна в различных направлениях. Она больше, чем установленная скорость света, в направлении движения комнаты и меньше в противоположном направлении. Наш вывод таков: если эфир увлекается движением комнаты и источника света и если механические законы справедливы, то скорость света должна зависеть от скорости источника света. Свет, попадающий нам в глаза от движущегося источника, имел бы большую скорость, если бы источник приближался к нам, и меньшую, если бы он удалялся от нас.

Если бы мы обладали скоростью, большей, чем скорость света, то мы могли бы убежать от светового сигнала. Настигая световые волны, посланные прежде, мы могли бы видеть события прошлого. Мы поймали бы их в порядке, обратном тому, в котором они были посланы, и цепь событий на Земле казалась бы нам подобной фильму, который смотрят в обратном порядке, начиная со счастливого конца. Все эти выводы следуют из предположения, что движение системы координат увлекает эфир и что справедливы механические законы преобразования. Если это так, то между светом и звуком имеется полная аналогия.

Но нет никаких оснований утверждать, что эти выводы верны. Наоборот, они противоречат всем наблюдениям, сделанным с целью их проверки. В истинности такого

приговора нет ни малейшего сомнения, хотя он получается с помощью довольно окольных экспериментов вследствие больших технических трудностей, вызванных огромной скоростью света. *Скорость света всегда одинакова во всех системах координат, независимо от того, движется ли излучающий источник или нет, и независимо от того, как он движется.*

Мы не будем обсуждать многих экспериментов, из которых может быть сделан этот важный вывод. Однако, мы можем привести очень простой аргумент, который если и не доказывает, что скорость света независима от движения источника, то тем не менее делает этот факт убедительным и понятным.

В нашей планетной системе Земля и другие планеты движутся вокруг Солнца. Мы не знаем о существовании других планетных систем, подобных нашей. Однако, существует очень много систем — так называемых двойных звёзд, — состоящих из двух звёзд, движущихся вокруг точки, называемой их центром тяжести. Наблюдение движения этих двойных звёзд обнаруживает, что и для них справедлив закон тяготения Ньютона. Предположим теперь, что скорость света зависит от скорости излучающего тела. Тогда луч света, вышедший от звезды, будет распространяться быстрее или медленнее, соответственно тому, какова была скорость звезды в момент излучения света. В этом случае всё движение казалось бы нам чрезвычайно запутанным, и было бы невозможно при отдалённости двойных звёзд подтвердить справедливость того же самого закона тяготения, который управляет движением нашей планетной системы.

Рассмотрим другой опыт, основанный на очень простой идее. Представим себе очень быстро вращающееся колесо. По нашему предположению, эфир увлекается движением и принимает в нём участие. Световая волна, проходя вблизи колеса, имела бы различные скорости, смотря по тому, находится ли колесо в покое или в движении. Скорость света в покоящемся эфире отличалась бы от скорости света в эфире, увлечённом движением колеса, так же как скорость звуковой волны изменяется в спокойные и ветреные дни. Но такое различие не наблюдается! Независимо

от того, под каким углом мы приближаемся к предмету, или от того, какой эксперимент мы придумываем, вывод всегда противоречит предположению, что эфир увлекается движением. Таким образом, результат наших исследований, поддержанный более детальными техническими аргументами, таков:

Скорость света не зависит от движения излучающего источника. Нельзя считать, что движущиеся тела увлекают окружающий эфир.

Поэтому мы должны отбросить аналогию между звуковыми и световыми волнами и вернуться ко второй возможности, а именно предположить, что материя движется сквозь эфир, который никакого участия в её движении не принимает. Это означает, что мы предполагаем наличие эфирного моря, относительно которого все системы координат либо покоятся, либо движутся. Оставим пока вопрос о том, доказал или ниспроверг эксперимент эту теорию. Лучше познакомимся поближе с значением этого нового предположения и с выводами, которые можно из него сделать.

Если мы примем это предположение, то мы должны признать, что существует система координат, покоящаяся относительно эфирного моря. В механике нельзя было выделить ни одну из многих систем координат, движущихся прямолинейно и равномерно друг относительно друга. Все такие системы координат были в равной степени «хороши» или «плохи». Если мы имеем две системы координат, движущиеся прямолинейно и равномерно друг относительно друга, то в механике бессмысленно спрашивать, какая из них движется, а какая покоится. Наблюдать можно только относительное прямолинейное и равномерное движение. Благодаря принципу относительности Галилея мы не можем говорить об абсолютном прямолинейном и равномерном движении. Что имеется в виду, когда утверждается, что существует *абсолютное*, а не *относительное* прямолинейное и равномерное движение? Просто то, что существует одна система координат, в которой законы природы отличаются от законов во всех других системах. Стало быть, это означает, что каждый наблюдатель может обнаружить, находится ли его система

в покое или в движении, путём сравнения законов, справедливых для его системы, с законами, справедливыми в одной единственной системе, которая обладает абсолютной монополией и служит в качестве образца. Здесь положение дел отличается от утверждения классической механики, в которой абсолютное прямолинейное и равномерное движение совершенно бессмысленно вследствие принципа относительности Галилея.

Какие выводы можно было бы сделать в отношении явлений поля, если предположить движение сквозь эфир? Это означало бы, что существует одна система координат, отличная от всех других, покоящаяся относительно эфирного моря. Совершенно ясно, что законы природы должны отличаться в этой системе координат, иначе фраза «движение сквозь эфир» была бы бессмысленной. Если принцип относительности Галилея справедлив, то движение сквозь эфир вообще не имеет смысла. Примирить эти две идеи невозможно. Если существует одна особая система координат, связанная с эфиром, то имеет определённый смысл говорить об «абсолютном движении» или «абсолютном покое».

Фактически мы не имеем выбора. Мы пытались спасти принцип относительности Галилея, предполагая, что системы увлекают эфир в своём движении, но это привело к противоречию с опытом. Остаётся единственный выход — отказаться от принципа относительности Галилея и испытать предположение о том, что все тела движутся сквозь спокойное эфирное море.

Следующий шаг состоит в рассмотрении некоторых выводов, противоречащих принципу относительности Галилея и говорящих в пользу движения сквозь эфир; затем эти выводы надо подвергнуть экспериментальной проверке. Такие эксперименты довольно легко вообразить, но очень трудно осуществить. Но так как мы интересуемся здесь только идеями, нам не придётся заботиться о технических трудностях.

Вернёмся опять к движущейся комнате с двумя наблюдателями: внутри и вне её. Внешний наблюдатель будет представлять себе основную систему координат, связанную с эфирным морем. Это — особая система координат,

в которой скорость света всегда одинакова по величине. Скорость распространения света, испускаемого любыми источниками, всегда одинакова, независимо от того, движутся ли они или находятся в покое. Комната и наблюдатель движутся сквозь эфир. Представим себе, что свет в центре комнаты то вспыхивает, то гаснет, и, кроме того, вообразим, что стены комнаты прозрачны, так что скорость света могут измерить оба наблюдателя, и внешний, и внутренний. Если мы спросим обоих наблюдателей, какие результаты они ожидают получить, то их ответы, примерно, были бы таковы:

Внешний наблюдатель: Моя система координат связана с эфирным морем. Скорость света в моей системе постоянна. Мне не нужно обращать внимание на то, движутся ли источники света или другие тела или нет, потому что они никогда не увлекают с собой эфирного моря. Моя система координат отличается от всех других, и скорость света в этой системе должна быть постоянной, независимо от направления светового луча или движения его источника.

Внутренний наблюдатель: Моя комната движется сквозь эфирное море. Передняя стена комнаты удаляется от света, а задняя приближается к нему. Если бы комната двигалась по отношению к эфирному морю со скоростью света, то излучённый из центра комнаты свет никогда не достиг бы стенки, убегающей от него. Если бы комната двигалась со скоростью, меньшей, чем скорость света, то волна, посланная из центра комнаты, достигла бы одной из стен раньше, чем другой. Стены, движущейся навстречу световой волне, последняя достигла бы раньше, чем стены, удаляющейся от неё. Потому, хотя источник света и жёстко связан с моей системой координат, скорость света неодинакова во всех направлениях. Она будет меньше в направлении движения относительно эфирного моря, так как стена убегает, и больше в противоположном направлении, так как стена движется навстречу световой волне, как бы стремясь скорее её встретить.

Таким образом, только в одной системе координат, связанной с эфирным морем, скорость света была бы одинаковой во всех направлениях. В другой системе, дви-

жущейся относительно эфирного моря, она будет зависеть от направления, в котором производится измерение.

Только что рассмотренный эксперимент позволяет нам проверить теорию, допускающую движение сквозь эфирное море. Природа, действительно, предоставила в наше распоряжение систему, движущуюся с достаточно большой скоростью — Землю, в её годовом движении вокруг Солнца.

Если наше предположение правильно, то скорость света в направлении движения Земли отличалась бы от скорости света в противоположном направлении. Можно подсчитать получающиеся разности скоростей и придумать соответствующую экспериментальную проверку. Так как из теории следует, что здесь имеют место лишь небольшие разности времён, то необходимо придумать очень остроумную установку. Это было сделано в знаменитом опыте Майкельсона-Морли. Результатом его был смертный приговор теории покоящегося эфирного моря, сквозь который движется вся материя. Никакой зависимости скорости света от направления обнаружено не было. Но если исходить из теории эфирного моря, то не только скорость света, но и другие явления поля показали бы зависимость от направления в движущейся системе координат. Все опыты дали такой же отрицательный результат, как и опыт Майкельсона-Морли; никакой зависимости от направления движения Земли не было обнаружено.

Положение становилось всё более серьёзным. Были проверены два предположения. Первое, — что движущиеся тела увлекают эфир. Тот факт, что скорость света не зависит от движения источника, противоречит этому предположению. Второе, — что существует одна особая система координат и что движущиеся тела не увлекают эфир, а проходят сквозь постоянно покоящееся эфирное море. Если это так, то принцип относительности Галилея несправедлив, и скорость света не может быть одинаковой в любой системе координат. И снова мы находимся в противоречии с опытом.

Были придуманы и более искусственные теории, предполагающие, что действительная правда лежит где-то между двумя предельными случаями, а именно, теории,

исходящие из того, что эфир увлекается движущимися телами только частично. Но все они оказались несостоятельными! Всякая попытка объяснить электромагнитные явления в движущихся системах координат с помощью движения эфира, движения сквозь эфир, или с помощью обоих этих движений, оказывалась неудачной.

Так возникло одно из наиболее драматических положений в истории науки. Все предположения относительно поведения эфира ни к чему не приводили. Приговор эксперимента всегда был отрицательным. Оглядываясь на развитие физики, мы видим, что вскоре после своего рождения эфир стал вырождением в семье физических субстанций. Во-первых, построение простой механической модели эфира оказалось невозможным и было отброшено. Этим в значительной степени был вызван крах механистической точки зрения. Во-вторых, мы должны были потерять надежду на то, что благодаря существованию эфирного моря будет выделена одна система координат, что позволило бы нам опознать не только относительное, но и абсолютное движение. Это было бы единственным, если не считать переноса волн, способом наблюдения и подтверждения существования эфира. Все наши попытки сделать эфир реальным провалились. Он не обнаружил ни своего механического строения, ни абсолютного движения. От всех свойств эфира не осталось ничего, кроме того свойства, из-за которого его и придумали, а именно, кроме способности передавать электромагнитные волны. Все попытки открыть свойства эфира привели к трудностям и противоречиям. После стольких неудач наступает момент, когда следует совершенно забыть об эфире и постараться никогда не упоминать о нём. Мы будем говорить: наше пространство обладает физическим свойством передавать волны и тем самым избежим употребления слова, от которого решили отказаться.

Однако, выбрасывание слова из нашего словаря не является, конечно, исцеляющим средством. Наши бедствия в самом деле слишком глубоки, чтобы их можно было разрешить таким путём.

Соберём теперь вместе те факты, которые достаточно проверены опытом, не заботясь больше о проблеме эфира.

1. Скорость света в пустом пространстве всегда постоянна, независимо от движения источника или приёмника света.

2. В двух системах координат, движущихся прямолинейно и равномерно друг относительно друга, все законы природы строго одинаковы, и нет никакого средства обнаружить абсолютное прямолинейное и равномерное движение.

Существует много экспериментов, подтверждающих оба эти положения, и нет ни одного, который бы противоречил какому-либо из них. Первое положение выражает постоянство скорости света, второе обобщает принцип относительности Галилея, сформулированный для механических явлений, на всё происходящее в природе.

В механике мы видели, что если скорость материальной точки относительно одной системы координат такая-то, то она будет иной в другой системе, движущейся прямолинейно и равномерно относительно первой. Это вытекает из простых принципов механического преобразования. Они непосредственно даны нашей интуицией (человек, движущийся относительно корабля и берега), и, очевидно, здесь нет никакой ошибки. Но этот закон преобразования находится в противоречии с постоянством скорости света. Другими словами, мы прибавляем третий принцип.

3. Координаты и скорости преобразовываются от одной инерциальной системы к другой согласно классическому преобразованию.

Противоречие очевидно. Мы не можем объединить три указанных выше принципа.

Классическое преобразование оказывается слишком простым, и необходимо попытаться изменить его. Мы уже пытались изменить первые два принципа и пришли к несогласию с экспериментом. Все теории движения эфира требуют изменения первых двух принципов. Но это не приносило никакой пользы. Ещё раз мы убеждаемся в серьёзности наших трудностей. Необходим новый путь. Это путь признания *первого и второго положений* исходными и, хотя это и кажется странным, —

отказа от третьего положения. Новый путь начинается с анализа наиболее фундаментальных и простых понятий. Мы покажем, как этот анализ вынуждает нас изменить наши старые взгляды и устраняет все наши трудности.

Время, пространство, относительность

Наши новые положения суть:

1. *Скорость света в вакууме одинакова во всех системах координат, движущихся прямолинейно и равномерно друг относительно друга.*

2. *Законы природы одинаковы во всех системах координат, движущихся прямолинейно и равномерно друг относительно друга.*

Теория относительности начинается с этих двух положений. С этого времени мы не будем применять классического преобразования, так как знаем, что оно противоречит исходным положениям.

В данном случае, как и всегда в науке, важно отказаться от глубоко укоренившихся, часто некритически повторяемых предрассудков. Так как мы видели, что изменения обоих положений приводят к противоречию с экспериментом, то мы должны иметь смелость твёрдо установить их справедливость и напасть на один возможно слабый пункт, а именно на способ, которым координаты и скорости преобразуются от одной системы координат к другой. Мы хотим сделать выводы из этих двух положений, посмотреть, где и как эти положения противоречат классическому преобразованию, и найти физический смысл полученных результатов.

Можно ещё раз использовать пример с движущейся комнатой и наблюдателями внутри и вне её. Пусть световой сигнал опять излучается из центра комнаты и вновь мы спрашиваем обоих людей, что они обнаружат, допустив только два вышеуказанных принципа и забыв то, что было предварительно сказано о среде, сквозь которую проходит свет. Приведём их ответ:

Внутренний наблюдатель: Световой сигнал, идущий от центра комнаты, достигнет стен одновременно, так

как все стены одинаково отстоят от источника света, а скорость света одинакова во всех направлениях.

Внешний наблюдатель: В моей системе координат скорость света совершенно такая же, как и в системе наблюдателя, движущегося вместе с комнатой. Мне нет дела до того, движется ли источник света в моей системе или нет, так как его движение не влияет на скорость света. То, что я вижу, это — световой сигнал, идущий с постоянной скоростью, одинаковой во всех направлениях. Одна из стен стремится убежать от светового сигнала, а другая — приблизиться к нему. Поэтому убегающая стена будет достигнута световым сигналом немного позднее, чем приближающаяся. Хотя эта разность времён прибытия светового сигнала будет очень незначительной, если скорость комнаты мала сравнительно со скоростью света, тем не менее световой сигнал не достигнет обеих противоположных стен, расположенных перпендикулярно к направлению движения, совершенно одновременно.

Сравнивая предсказания обоих наблюдателей, мы обнаруживаем крайне изумительный результат, который явно противоречит, несомненно хорошо обоснованным понятиям классической физики. Оба события — достижение стен двумя световыми лучами — одновременны для наблюдателя внутри и неодновременны для наблюдателя вне комнаты. В классической физике у нас были одни часы, одно течение времени для всех наблюдателей во всех системах. Время, а стало быть, и такие слова, как «одновременно», «ранее», «позднее», имели абсолютное значение, не зависящее от какой-либо системы. Два события, происходящие в одно и то же время в одной системе координат, необходимо происходили одновременно во всех системах координат.

Положения, указанные выше, то-есть теория относительности, вынуждают нас отказаться от этого взгляда. Мы описали два события, которые происходят одновременно в одной системе координат, но в разное время в другой системе. Наша задача понять это следствие, понять смысл предложения: «Два события, одновременные в одной системе координат, не могут быть одновременны в другой системе».

Что мы обозначаем словами: «два одновременных события в одной системе координат». Интуитивно каждый человек считает, что он понимает смысл этого предложения. Но будем осторожными и постараемся дать строгие определения, так как мы знаем, как опасно переоценивать интуицию. Ответим сначала на простой вопрос.

Что такое часы?

Примитивное субъективное чувство течения времени позволяет нам упорядочить наши впечатления, судить о том, что одно событие происходит раньше, другое позднее. Но чтобы показать, что промежуток времени между двумя событиями равен десяти секундам, нужны часы. Благодаря применению часов понятие времени становится объективным. В качестве часов может быть использовано любое физическое явление, если только оно может быть повторено столько раз, сколько необходимо. Если мы возьмём интервал между началом и концом такого события за единицу времени, то любые интервалы времени мы можем измерить повторением этого физического процесса. Все часы, от простых песочных до наиболее совершенных, основаны на этой идее. При пользовании песочными часами единицей времени будет являться интервал, в течение которого песок высыпается из верхнего стаканчика в нижний. Тот же физический процесс может быть повторён перевёртыванием стакана.

Пусть в двух отдалённых друг от друга точках пространства находится двое идеально идущих часов, точно показывающих одинаковое время. Это положение будет справедливым, несмотря на ту осторожность, с которой мы его проверяем. Но что это в действительности означает? Как можем мы удостовериться, что отдалённые друг от друга часы всегда показывают одинаковое время. Можно использовать один из возможных методов — телевидение. Легко понять, что телевидение берётся как пример, само по себе оно не существенно для наших доводов. Я мог бы стоять около одних часов и смотреть на изображение других часов на экране телевизора. Тогда я мог бы судить, показывают ли другие часы одновременно то же самое время или нет. Но это не было бы

хорошим доказательством. Изображение в телевизоре передаётся электромагнитными волнами, следовательно, распространяется со скоростью света. На экране телевизора я вижу изображение, посланное некоторое очень короткое время тому назад, в то время как на часах, стоящих возле меня, я вижу то, что имеет место в настоящий момент. Эту трудность можно легко преодолеть. Для этого нужно рассмотреть изображения обоих часов в точке, одинаково отстоящей от каждого из них, т. е. рассмотреть их в точке, лежащей на середине расстояния между часами. Тогда, если сигналы посланы одновременно, они достигнут меня в один и тот же момент. Если двое хороших часов, наблюдаемых в точке, находящейся посередине между ними, показывают одинаковое время, то они правильно расположены для указания времени событий в двух отдалённых точках.

В механике мы употребляли только одни часы. Но это было не очень удобно, потому что мы должны были производить все измерения вблизи этих часов. Смотря на удалённые от нас часы, например, с помощью телевизора, мы всегда должны помнить следующее: то, что мы видим теперь, в действительности произошло раньше, подобно тому, как, рассматривая заход Солнца, мы отмечаем это событие спустя восемь минут после того, как оно имело место. Во все показания часов мы должны вносить поправки, соответствующие нашему расстоянию от часов.

Поэтому неудобно иметь только одни часы. Однако, теперь, поскольку мы знаем, как проверить, показывают ли двое, или вообще несколько часов одновременно одно и то же время, и идя тем же самым путём, мы легко можем вообразить себе в данной системе координат столько часов, сколько нам хочется.

Каждые из них позволят нам определить время событий происходящих в непосредственном соседстве с ними. Все часы находятся в покое относительно системы координат. Они являются «хорошими» часами; они *синхронизированы*, что означает, что часы одновременно показывают одинаковое время.

В наших рассуждениях о часах нет ничего поразительного или странного. Вместо одних единственных

часов мы применяем теперь много синхронизированных часов и поэтому можем легко проверить, одновременны ли два отдалённых события в данной системе координат или нет. Они одновременны, если синхронизированные часы вблизи них показывают одинаковое время в момент, когда происходят события. Теперь утверждение, что одно отдалённое событие происходит раньше другого, имеет определённый смысл. Его можно проверить с помощью синхронизированных часов, покоящихся в нашей системе координат.

Всё это находится в согласии с классической физикой и не вызывает ещё противоречий с классическим преобразованием.

Для определения одновременности событий часы синхронизируются с помощью сигналов. В наших рассуждениях существенно то, что сигналы передаются со скоростью света, со скоростью, которая играет такую фундаментальную роль в теории относительности.

Так как мы хотим разрешить важную проблему преобразования для двух систем координат, движущихся прямолинейно и равномерно относительно друг друга, то мы должны рассмотреть два стержня, снабжённых часами. В каждой из обеих систем, движущихся друг относительно друга, наблюдатель имеет теперь свой собственный масштаб со своим собственным набором часов, жёстко связанным с масштабом.

При измерениях в классической механике мы употребляли одни часы во всех системах координат. Теперь мы имеем много часов в каждой системе координат. Это различие несущественно. Одни часы были достаточны, но никто не может возражать против употребления многих часов, пока они ведут себя как хорошо синхронизированные часы.

Теперь мы приближаемся к существенному пункту, показывающему, где классическое преобразование противоречит теории относительности. Что происходит, когда двое часов движутся прямолинейно и равномерно друг относительно друга? Физик, держащийся классических взглядов, ответил бы: ничего; их ритм остаётся одинаковым, и мы можем употреблять для показания

времени движущиеся часы так же, как и покоящиеся. Таким образом, согласно классической физике два события, одновременные в одной системе координат, будут одновременными в любой другой системе.

Но это не единственный возможный ответ. Мы можем

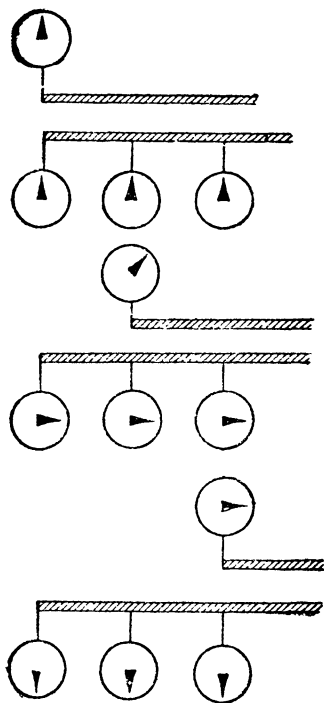


Рис. 56.

столь же легко представить движущиеся часы, имеющие ритм, отличный от ритма покоящихся часов. Обсудим теперь эту возможность, не решая пока вопроса о том, изменяют ли на самом деле часы свой ритм при движении или нет. Что означает утверждение, что движущиеся часы изменяют свой ритм? Предположим, ради простоты, что в верхней системе у нас только одни часы, а в нижней много. У всех часов одинаковый механизм и нижние часы синхронизированы, то-есть они показывают одновременно одинаковое время. Мы показали три последовательных положения обеих систем, движущихся друг относительно друга. На первом рисунке положения стрелок верхних и нижних часов ради удобства взяты одинаковыми; так мы их поставили сами. Все часы показывают одинаковое время. На втором рисунке мы видим относительные положения

обеих систем спустя некоторое время. Все часы в нижней системе показывают одинаковое время, но часы в верхней системе вышли из общего ритма. Их ритм изменился, и время отличается вследствие того, что часы движутся относительно нижней системы. На третьем рисунке мы видим, что различие в положении стрелок со временем увеличилось. Наблюдатель, покоящийся в ниж-

ней системе координат, нашёл бы, что движущиеся часы изменили свой ритм. Конечно, тот же результат получился бы, если бы часы двигались по отношению к наблюдателю, покоящемуся в верхней системе координат; в этом случае в верхней системе должно было бы быть много часов, а в нижней только одни. Закон природы должен быть одинаков в обеих системах, движущихся друг относительно друга.

В классической механике молчаливо предполагалось, что движущиеся часы не изменяют своего ритма. Это казалось столь очевидным, что едва ли было достойно упоминания. Но ничто не должно считаться слишком очевидным; если мы действительно желаем быть осторожными, мы должны анализировать все положения, принятые до сих пор в физике.

Нельзя считать какое-либо положение бессмысленным только потому, что оно отличается от положения классической физики. Мы можем легко представить себе, что движущиеся часы изменяют свой ритм, пока закон этого изменения одинаков для всех инерциальных систем.

Ещё один пример. Возьмём метровый стержень; это значит, что длина стержня — один метр, пока он находится в покоящейся системе координат. Пусть он движется прямолинейно и равномерно, скользя вдоль масштаба, представляющего систему координат. Будет ли его длина и в этом случае равна одному метру? Мы должны знать заранее, как определять его длину. Пока стержень был в покое, его концы совпадали с нанесёнными на масштабе, расстояние между которыми равнялось одному метру. Из этого мы заключили: длина покоящегося стержня равна одному метру. Как мы измеряем длину этого стержня во время движения? Это можно было бы сделать следующим образом. В данный момент два наблюдателя делают одновременно моментальные фотоснимки начала движущегося стержня и его конца. Поскольку снимки берутся одновременные, мы можем сравнить, с какими отметками масштаба совпадают начало и конец движущегося стержня. Таким путём мы определим его длину. Оба наблюдателя должны будут отметить одновременные события, происходящие в раз-

личных частях данной системы. Нет никаких оснований считать, что результат таких измерений будет таким же, как и в случае, когда отрезок покоится. Поскольку фотографии должны быть сделаны одновременно, а одновременность, как мы знаем, является относительным понятием, зависящим от системы координат, то оказывается вполне возможным, что результаты этих измерений будут различными в различных системах, движущихся друг относительно друга.

Мы легко можем представить себе, что не только движущиеся часы изменяют свой ритм, но и движущийся стержень изменяет свою длину, если законы изменений одинаковы для всех инерциальных систем координат.

Мы лишь обсуждали некоторые новые возможности, не приводя каких-либо оправданий в пользу их принятия.

Мы помним: скорость света одинакова во всех инерциальных системах координат. Этот факт несовместим с классическим преобразованием. Круг должен быть где-то разорван. Нельзя ли это сделать как раз здесь? Не можем ли мы предположить, что имеют место такие изменения в ритме движущихся часов и в длине движущегося стержня, что постоянство скорости света будет следовать непосредственно из этих предположений? В самом деле, можем! Здесь впервые теория относительности и классическая физика радикально расходятся. Наш довод может быть сформулирован иначе: если скорость света одинакова во всех системах, то движущиеся стержни должны изменять свою длину, движущиеся часы должны изменять свой ритм, а законы, управляющие этими изменениями, являются строго определёнными.

Во всём этом нет ничего таинственного или неразумного. В классической физике всегда предполагалось, что часы и в движении, и в покое имеют одинаковый ритм, что масштабы и в движении, и в покое имеют одинаковую длину. Если скорость света одинакова во всех системах координат, если теория относительности справедлива, то мы должны пожертвовать этим положением. Трудно отделаться от глубоко укоренившихся предрассудков, но другого пути нет: С точки зрения теории относительности

сти старые понятия кажутся произвольными. Почему надо верить, как это мы делали раньше, в абсолютное время, текущее одинаково для всех наблюдателей во всех системах? Почему надо верить в неизменяемое расстояние? Время определяется часами, пространственные координаты — масштабами, и результат этих определений может зависеть от поведения этих часов и масштабов, когда они находятся в движении. Нет оснований считать, что они будут вести себя так, как нам этого хотелось бы. Косвенное наблюдение, а именно, наблюдение явлений электромагнитного поля, показывает, что движущиеся часы изменяют свой ритм, а масштаб — длину, в то время как, основываясь на механических явлениях, мы не думали, чтобы это имело место. Мы должны принять понятие относительного времени в каждой системе координат, ибо это наилучший выход из трудностей. Дальнейший научный успех, достигнутый теорией относительности, показывает, что новый взгляд не должен рассматриваться как печальная необходимость, ибо успехи теории относительности оказались весьма значительными.

До сих пор мы старались показать, что привело к основным положениям теории относительности и как теория относительности вынуждала нас пересматривать и изменять классическое преобразование, по-новому трактуя понятия времени и пространства. Наша цель — указать идеи, образующие основу новых физических и философских взглядов. Эти идеи просты; но в той форме, в которой они здесь сформулированы, они недостаточны для того, чтобы получить выводы не только качественные, но и количественные. Мы опять должны применить наш старый метод объяснения только принципиальных идей и формулировки некоторых выводов без доказательства.

Чтобы сделать ясным различие между взглядом старого физика (назовём его *C*), верящего в классическое преобразование, и взглядом нового физика (назовём его *H*), признающего теорию относительности, вообразим между ними следующий диалог.

C. Я верю в принцип относительности Галилея в механике, ибо я знаю, что законы механики одинаковы в двух системах, движущихся прямолинейно и равно-

мерно друг относительно друга, или, другими словами, что эти законы инвариантны относительно классического преобразования.

Н. Но принцип относительности следует применять ко всем событиям внешнего мира. Не только законы механики, но и все законы природы должны быть одинаковы в системах, движущихся прямолинейно и равномерно друг относительно друга.

С. Но как все законы природы могут оказаться одинаковыми в системах, движущихся друг относительно друга? Ведь, уравнения поля, то-есть уравнения Максвелла, неинвариантны относительно классического преобразования. Это ясно обнаруживается на примере скорости света. Согласно классическому преобразованию эта скорость не была бы одинаковой в двух системах, движущихся друг относительно друга.

Н. Это только показывает, что классическое преобразование нельзя применять, что связь между двумя системами координат должна быть иной, и что мы не можем связывать координаты и скорости в разных системах координат так, как это сделано в этих законах преобразования. Мы должны заменить их новыми законами, выведя последние из основных положений теории относительности. Не будем заботиться о математическом выражении этих новых законов преобразования и удовлетворимся тем, что они отличны от классического. Мы назовём их *преобразованиями Лоренца*. Можно показать, что уравнения Максвелла, то-есть законы поля, инвариантны по отношению к преобразованиям Лоренца, подобно тому, как законы механики инвариантны по отношению к классическим преобразованиям. Вспомним, как обстояло дело в классической физике. Мы имели законы преобразования для координат, законы преобразования для скоростей, но законы механики были одинаковы для обеих систем координат, движущихся прямолинейно и равномерно относительно друг друга. У нас были законы преобразования для пространства, но не для времени, потому что время было одинаково во всех системах координат. Однако, здесь, в теории относительности, оно различно. Здесь мы имеем законы преобразо-

вания пространства, времени и скоростей, отличающиеся от классических законов. Но законы природы опять должны быть одинаковы во всех системах координат, движущихся прямолинейно и равномерно друг относительно друга. Законы природы должны быть инвариантны, но не по отношению к классическим преобразованиям, как прежде, а по отношению к новому типу преобразований — так называемым преобразованиям Лоренца. Во всех инерциальных системах справедливы те же самые законы, а переход от одной системы к другой даётся преобразованиями Лоренца.

Г. Я верю вам, но мне интересно было бы знать различие между преобразованиями классическими и преобразованиями Лоренца.

Н. Ответить на ваш вопрос лучше всего следующим образом. Сошлёмся на некоторые характерные черты классических преобразований, и я постараюсь объяснить, сохраняются ли они в преобразованиях Лоренца, и если нет, то как они изменяются.

Г. Если что-либо происходит в какой-то точке пространства в некоторый момент времени в моей системе координат, то наблюдатель, находящийся в другой системе координат, движущейся прямолинейно и равномерно относительно моей, отмечает другое число, определяющее положение места, где происходит событие, но, конечно, то же самое время. Мы употребляем одни и те же часы во всех системах, независимо от того, движутся ли они или нет. Это и с вашей точки зрения справедливо?

Н. О, нет. Каждая система координат должна быть снабжена собственными часами, покоящимися в ней, так как движение часов изменяет их ритм. Два наблюдателя, находящиеся в различных системах координат, отмечают не только различные числа, определяющие положение, но и различные числа, определяющие время, в которое происходит это событие.

Г. Это означает, что время не является больше инвариантом. В классических преобразованиях время всегда одно и то же во всех системах. В преобразованиях Лоренца оно изменяется и ведёт себя аналогично координате в старых преобразованиях. Интересно знать, как обстоит

дело с длиной. Согласно классической механике твёрдый стержень сохраняет свою длину как в движении, так и в покое. Верно ли это теперь?

Н. Неверно. В самом деле, из преобразований Лоренца следует, что движущийся стержень сокращается в направлении движения, и сокращение тем больше, чем больше скорость. Чем быстрее движется стержень, тем короче он оказывается. Но такое сокращение происходит только в направлении движения. На рисунке вы

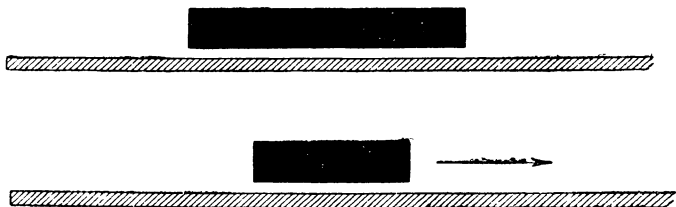


Рис. 57.

видите стержень, который сокращается до половины своей первоначальной длины, когда он движется со скоростью, приближающейся к 0,9 скорости света. Однако, в направлении, перпендикулярном к движению, сокращения нет, что я и постарался проиллюстрировать на рисунке.

С. Это означает, что ритм движущихся часов и длина движущихся стержней зависит от скорости. Но как?

Н. Изменение становится более заметным по мере возрастания скорости. Из преобразований Лоренца следует, что стержень сократится до нуля, если его скорость достигнет скорости света. Аналогично этому ритм движущихся часов замедляется сравнительно с часами, мимо которых они проходят вдоль стержня; часы совершенно остановились бы, если бы они могли двигаться со скоростью света.

С. Это кажется противоречащим всему нашему опыту. Мы знаем, что вагон не становится короче, когда он в движении, и мы знаем также, что машинист всегда может сравнить свои «хорошие» часы с часами, мимо которых

он проезжает, находя, что они хорошо согласованы друг с другом, вопреки вашему утверждению.

Н. Это, конечно, верно. Но все скорости в механике очень малы сравнительно со скоростью света, поэтому нелепо применять теорию относительности к этим явлениям. Каждый машинист может спокойно применять классическую физику, даже если он увеличит свою скорость в сотни тысяч раз. Мы могли бы ожидать несогласия между экспериментом и классическими преобразованиями только в случае скоростей, приближающихся к скорости света. Справедливость преобразований Лоренца может быть проверена лишь при очень больших скоростях.

С. Но имеется и другая трудность. Согласно механике я

могу вообразить тела, обладающие скоростями, даже большими, чем скорость света. Тело, движущееся со скоростью света относительно плывущего корабля, движется со скоростью, большей, чем скорость света, относительно берега. Что произойдет со стержнем, который сократился до нуля, когда его скорость сравнялась со скоростью света? Мы можем твердо ожидать отрицательной длины, если скорость больше скорости света.

Н. В действительности нет никакого основания для такой иронии! С точки зрения теории относительности материальные тела не могут иметь скорости, большей, чем скорость света. Скорость света образует верхний предел скоростей для всех материальных тел. Если скорость тела относительно корабля равна скорости света,

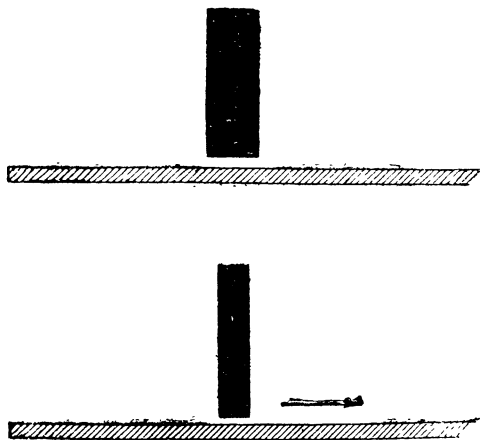


Рис. 58.

то и относительно берега она тоже будет равна скорости света. Простой механический закон сложения и вычитания скоростей больше несправедлив или, более точно, справедлив лишь приближённо для малых скоростей, но не для скоростей, близких к скорости света. Число, выражающее скорость света, явно входит в преобразования Лоренца и играет роль предельного случая, подобно бесконечной скорости в классической механике. Эта более общая теория не противоречит классическим преобразованиям и классической механике. Наоборот, к старым понятиям мы возвращаемся, как к предельному случаю, когда скорости малы. С точки зрения новой теории ясно, в каких случаях справедлива классическая физика и где лежат её пределы. Было бы нелепо применять теорию относительности к движению автомобилей, пароходов и поездов, как нелепо употреблять счётную машину там, где вполне достаточна таблица умножения.

Относительность и механика

Теория относительности необходимо возникает из серьёзных и глубоких противоречий в старой теории, из которых, казалось, не было выхода. Сила новой теории заключается в согласованности и простоте, с которой она разрешает все эти трудности, используя лишь немногие очень убедительные предположения.

Хотя теория возникла из проблемы поля, она должна охватить все физические законы. Трудность, повидимому, появляется здесь. Законы поля, с одной стороны, и законы механики, с другой, имеют совершенно различный характер. Уравнения электромагнитного поля инвариантны по отношению к преобразованиям Лоренца, а уравнения механики инвариантны по отношению к классическим преобразованиям. Но теория относительности требует, чтобы все законы природы были инвариантны по отношению к лоренцовым, а не классическим преобразованиям. Последние являются лишь специальным, предельным случаем преобразований Лоренца, когда относительные скорости обеих систем координат очень малы. Если это так,

то классическую механику следует изменить, чтобы согласовать её с требованием инвариантности по отношению к преобразованиям Лоренца. Или, другими словами, классическая механика не может быть справедливой, если скорости приближаются к скорости света. Переход от одной системы координат к другой может осуществляться только единственным путём — через преобразования Лоренца.

Классическую механику нетрудно было изменить так, чтобы она не противоречила ни теории относительности, ни избытку материала, полученного наблюдением и объяснённого классической механикой. Старая механика справедлива для малых скоростей и образует предельный случай новой механики.

Интересно рассмотреть какой-либо пример изменения в классической механике, которое вносит теория относительности. Возможно, это приведёт нас к некоторым выводам, которые могут быть подтверждены или опровергнуты экспериментом.

Предположим, что тело, имеющее определённую массу, движется вдоль прямой и подвергается воздействию внешней силы, действующей в направлении движения. Сила, как мы знаем, пропорциональна изменению скорости. Или, чтобы сказать яснее: не имеет значения, увеличивает ли данное тело свою скорость в одну секунду со 100 до 101 метра в секунду, или от 100 километров до 100 километров и одного метра в секунду, или от 300 000 километров в до 300 000 километров и одного метра в секунду. Сила, необходимая для сообщения данному телу какого-либо определённого изменения скорости, всегда одна и та же.

Верно ли это положение с точки зрения теории относительности? Никким образом! Этот закон справедлив только для малых скоростей. Каков же, по теории относительности, закон для больших скоростей, приближающихся к скорости света? Если скорость велика, то необходима чрезвычайно большая сила, чтобы изменить её. Вовсе не одно и то же — увеличить ли на один метр в секунду скорость, равную примерно 100 метрам в секунду, или же скорость, приближающуюся к световой.

Чем ближе скорость к скорости света, тем труднее её увеличить. Когда скорость равна скорости света, то уже невозможно увеличить её дальше. Таким образом то новое, что вносит теория относительности, не является удивительным. Скорость света есть верхний предел для всех скоростей. Никакая конечная сила, как бы велика она ни была, не может вызвать увеличения скорости сверх этого предела. На место старого закона механики, связывающего силу и изменение скорости, появляется более сложный закон. С нашей новой точки зрения классическая механика проста потому, что почти во всех наблюдениях мы имеем дело со скоростями, значительно меньшими, чем скорость света.

Покоящееся тело имеет определённую массу, так называемую *массу покоя*. Мы знаем из механики, что всякое тело сопротивляется изменению его движения; чем больше масса, тем сильнее сопротивление, и чем меньше масса, тем слабее сопротивление. Но в теории относительности мы имеем нечто большее. Тело сопротивляется изменению сильнее не только в случае, когда больше масса покоя, но и в случае, когда его скорость больше. Тела, скорости которых приближались бы к скорости света, оказывали бы очень сильное сопротивление внешним силам. В классической механике сопротивление данного тела есть всегда нечто неизменное, характеризующее только его массой. В теории относительности оно зависит и от массы покоя, и от скорости. Сопротивление становится бесконечно большим по мере того, как скорость приближается к скорости света.

Только что указанные выводы позволяют нам подвергнуть теорию экспериментальной проверке. Оказывают ли снаряды, движущиеся со скоростями, близкими к скорости света, сопротивление действию внешней силы так, как это предсказывает теория? Так как положения теории относительности имеют в этом отношении количественный характер, то мы могли бы подтвердить или опровергнуть теорию, если бы мы обладали снарядами, движущимися со скоростями, близкими к скорости света.

На самом деле мы находим в природе снаряды, движущиеся с такими скоростями. Атомы радиоактивного

вещества, например радия, действуют подобно батарее, которая стреляет снарядами, движущимися с огромными скоростями. Не входя в детали, мы можем указать только на один из самых важных взглядов современной физики и химии. Всё вещество в мире построено из элементарных частиц, число разновидностей которых невелико. Подобно этому в одном городе здания различны по величине, конструкции и архитектуре, но на постройку всех их, от хижины до небоскрёба, использованы кирпичи лишь очень немногих сортов, одинаковых во всех зданиях. Так, все известные химические элементы нашего материального мира — от легчайшего водорода до наиболее тяжёлого урана — построены из одинакового рода кирпичей, то-есть одинакового рода элементарных частиц. Наиболее тяжёлые элементы — наиболее сложные построения — неустойчивы, и они распадаются или, как мы говорим, они радиоактивны. Некоторые кирпичи, то-есть элементарные частицы, из которых состоят радиоактивные атомы, выбрасываются иногда с очень большими скоростями, близкими к скорости света. Атом элемента, скажем, радия, согласно нашим современным взглядам, подтверждаемым многочисленными экспериментами, обладает сложной структурой, и радиоактивный распад является одним из тех явлений, в которых выявляется, что атом построен из более простых кирпичей — элементарных частиц.

С помощью очень остроумных и сложных экспериментов мы можем обнаружить, как частицы сопротивляются действию внешней силы. Эксперименты показывают, что сопротивление, оказываемое этими частицами, зависит от скорости и как раз так, как это предсказывается теорией относительности. Во многих других случаях, где можно было обнаружить зависимость сопротивления от скорости, было установлено полное согласие между теорией относительности и экспериментом. Мы ещё раз видим существенные черты творческой работы в науке: предсказание определённых фактов теорией и подтверждение их экспериментом.

Этот результат приводит к дальнейшему важному общению. Покоящееся тело имеет массу, но не имеет

кинетической энергии, то-есть энергии движения. Движущееся тело имеет и массу, и кинетическую энергию. Оно сопротивляется изменению скорости сильнее, чем покоящееся тело. Кажется, что как будто кинетическая энергия движущегося тела увеличивает его сопротивление. Если два тела имеют одинаковую массу покоя, то тело с большей кинетической энергией сопротивляется действию внешней силы сильнее.

Представим себе ящик, наполненный шарами; пусть ящик и шары покоятся в нашей системе координат. Чтобы привести его в движение, чтобы увеличить его скорость, требуется некоторая сила. Но будет ли эта сила производить то же самое увеличение скорости за тот же промежуток времени, если шары в ящике будут быстро двигаться по всем направлениям, подобно молекулам в газе, со средними скоростями, близкими к скорости света? Теперь необходима будет большая сила, так как возросшая кинетическая энергия шаров усиливает сопротивление ящика. Энергия, во всяком случае кинетическая энергия, сопротивляется движению так же, как и весомая масса. Справедливо ли это и в отношении всех видов энергии?

Теория относительности, исходя из своих основных положений, даёт ясный и убедительный ответ на этот вопрос, ответ опять-таки количественного характера: всякая энергия сопротивляется изменению движения; всякая энергия ведёт себя подобно веществу; кусок железа весит больше, когда он нагрет, чем когда он холоден; излучение, испускаемое солнцем и проходящее через пространство, содержит энергию и поэтому имеет массу; Солнце и все излучающие звёзды теряют массу благодаря испусканию излучения. Это заключение, совершенно общее по своему характеру, является важным достижением теории относительности и соответствует всем фактам, которые привлекались для его проверки.

Классическая физика допускала две субстанции: вещество и энергию. Первое имело вес, а вторая была невесома. В классической физике мы имели два закона сохранения: один для вещества, другой для энергии. Мы

уже ставили вопрос о том, сохраняет ли ещё современная физика этот взгляд на две субстанции и два закона сохранения. Ответ таков: нет. Согласно теории относительности нет существенного различия между массой и энергией. Энергия имеет массу, а масса представляет собой энергию. Вместо двух законов сохранения мы имеем только один: закон сохранения массы-энергии. Этот новый взгляд оказался очень плодотворным в дальнейшем развитии физики.

Как это случилось, что тот факт, что энергия обладает массой, а масса представляет собой энергию, столь долго оставался неизвестным? Весит ли кусок нагретого железа больше, чем кусок холодного? Теперь мы отвечаем «да», а раньше (см. стр. 58) отвечали «нет». Страницы, лежащие между этими двумя ответами, разумеется, не могут скрыть этого противоречия.

Трудности, стоящие здесь перед нами, того же порядка, какие встречались нам и прежде. Изменение массы, предсказанное теорией относительности, неизмеримо мало, его нельзя обнаружить прямым взвешиванием даже с помощью очень чувствительных весов. Доказательство того, что энергия не невесома, можно получить многими очень убедительными, но косвенными путями.

Причина этого недостатка непосредственной очевидности состоит в очень малой величине взаимобмена между веществом и энергией. Энергия по отношению к массе подобна обесцененной валюте, взятой по отношению к валюте высокой ценности. Один пример сделает это ясным. Количество теплоты, способное превратить тридцать тысяч тонн воды в пар, весило бы около одного грамма. Энергия столь долго считалась невесомой просто потому, что масса, которую она представляет, слишком мала.

Старая энергия-субстанция есть вторая жертва теории относительности. Первой была среда, через которую распространялись световые волны.

Влияние теории относительности выходит далеко за пределы тех проблем, из которых она возникла. Она снимает трудности и противоречия теории поля; она формулирует более общие механические законы; она:

заменяет два закона сохранения одним; она изменяет наше классическое понятие абсолютного времени. Её ценность не ограничивается лишь сферой физики; она образует общий остов, охватывающий все явления природы.

Пространственно-временной континуум

«Французская революция началась в Париже 14-го июля 1789 года». В этом предложении установлены место и время события. Тому, кто слышит это утверждение впервые и кто не знает, что значит «Париж», можно было бы сказать: это — город на нашей земле, расположенный на 2° восточной долготы и 49° северной широты. Два числа характеризовали бы тогда место, а «14 июля 1789 года» — время, в которое произошло событие. В физике точная характеристика, когда и где произошло событие, чрезвычайно важна, гораздо важнее, чем в истории, так как эти числа образуют основу количественного описания.

Ради простоты мы рассматривали прежде только движение вдоль прямой. Нашей координатной системой был твёрдый стержень с началом, но без конца. Сохраним это ограничение. Возьмём на стержне различные точки; положение каждой из них может быть охарактеризовано только одним числом — координатой точки. Сказать, что координата точки равна 7,586 метра, означает, что её расстояние от начала стержня равно 7,586 метра. Наоборот, если кто-то задаёт мне любое число и единицу измерения, я всегда могу найти точку на стержне, соответствующую этому числу. Мы видим, что каждому числу соответствует определённая точка на стержне, а каждой точке соответствует определённое число. Этот факт выражается математиками в следующем предложении: *все точки стержня образуют одномерный континуум*. Тогда существует точка, сколь угодно близкая к данной точке стержня. Мы можем связать две отдалённые точки на стержне рядом отрезков, расположенных один за другим, каждый из которых сколь угодно мал. Таким образом, тот факт, что отрезки, связывающие отдалённые точки, могут быть произвольно малыми, является характеристикой континуума.

Возьмём другой пример. Пусть мы имеем плоскость или, если вы предпочитаете что-либо более конкретное, поверхность прямоугольного стола (рис. 59). Положение точки на этом столе можно охарактеризовать двумя числами, а не одним, как раньше. Два числа суть расстояния от двух перпендикулярных краёв стола. Не одно число, а пара чисел соответствует каждой точке плоскости: каждой паре чисел соответствует определённая точка. Другими словами: *плоскость есть двухмерный континуум*.

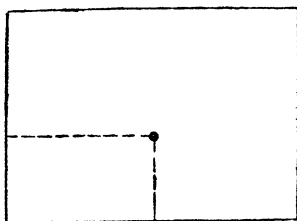


Рис. 59.

Тогда существуют точки, сколь угодно близкие к данной точке плоскости. Две отдалённые точки могут быть связаны кривой, разделённой на отрезки, сколь угодно малые. Таким образом, произвольная малость отрезков, последовательно укладываемых на кривой, связывающей две отдалённые точки, каждая из которых может быть определена двумя числами, является характеристикой двухмерного континуума.

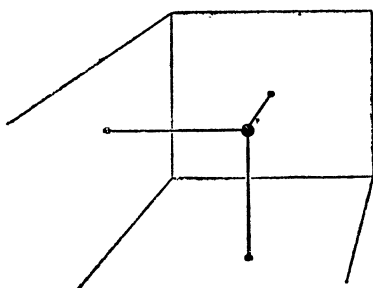


Рис. 60.

Ещё один пример. Представим себе, что вы хотите в качестве системы координат рассматривать свою комнату. Это означает, что вы хотите любое положение тела определить относительно стен комнаты. Положение кончика лампы, если она в покое, может быть описано

тремя числами: два из них определяют расстояние от двух перпендикулярных стен, а третье — расстояние от пола или потолка. Каждой точке пространства соответствуют три определённых числа; каждым трём числам соответствует определённая точка в пространстве. Это выражается предложением: *наше пространство есть трёхмерный кон-*

тинуум. Существуют точки, весьма близкие к каждой данной точке пространства. Произвольная малость отрезков линии, связывающей отдалённые точки, каждая из которых представлена тремя числами, есть характеристика трёхмерного континуума.

Но всё это едва ли физика. Чтобы вернуться к физике, нужно рассмотреть движение материальных частиц. Чтобы исследовать и предсказывать явления в природе, необходимо рассматривать не только место, но и время физических событий. Возьмём снова очень простой пример.

Маленький камешек, который примем за частицу, падает с башни. Допустим, что высота башни равна 80 метрам.

Время в секундах	Высота над землей в метрах
0	80
1	75
2	60
3	35
4	0

Со времени Галилея мы в состоянии предсказать координаты камня в произвольный момент времени после начала его падения. Здесь представлена «временная таблица», описывающая положение камня после 1, 2, 3 и 4 секунд.

В нашей «временной таблице» зарегистрированы пять событий, каждое из которых представлено двумя числами — временем и пространственной координатой каждого события. Первое событие есть начало движения камня с высоты 80 метров от земли в момент, равный нулю. Второе событие есть совпадение камня с нашим твёрдым стержнем (башней) на высоте 75 метров от земли. Это имеет место по истечении одной секунды. Последнее событие есть удар камня о землю.

Те сведения, которые записаны во «временной таблице», можно было бы представить иначе. Пять пар чисел её



Рис. 61.

можно было бы представить, как пять точек в пространстве. Установим сначала масштаб. Например: пусть один отрезок будет представлять метр, а другой секунду (рис. 61).

Затем нарисуем две перпендикулярные линии, одну из них, скажем, горизонтальную, назовём временной осью, вертикальную же — пространственной осью. Мы сразу же видим, что нашу «временную таблицу» можно представлять пятью точками в пространственно-временной плоскости (рис. 62).

Расстояния точек от пространственной оси представляют собой координаты времени, указанные в первой колонке «временной таблицы», а расстояния от оси времён — их пространственные координаты.

Совершенно одни и те же вещи выражены двумя способами: с помощью «временной таблицы» и точками на плоскости. Одно может быть построено из другого. Выбор между этими двумя представлениями является делом лишь вкуса, ибо в действительности они оба эквивалентны.

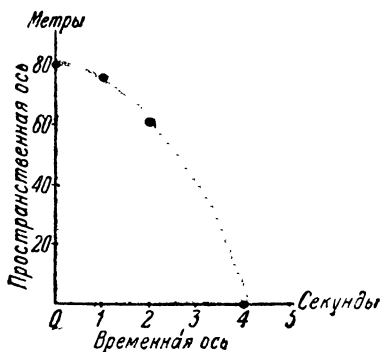


Рис. 62.

Сделаем теперь ещё один шаг. Представим себе улучшенную «временную таблицу», дающую положения не для каждой секунды, а, скажем, для каждой сотой или тысячной секунды. Тогда у нас будет много точек в нашей пространственно-временной плоскости. Наконец, если положение даётся для каждого мгновения или, как говорят математики, если пространственная координата даётся как функция времени, то совокупность точек становится непрерывной линией. Поэтому наш следующий рисунок даёт не отрывочные сведения, как прежде, а полное представление о движении камня.

Движение вдоль твёрдого стержня (башни), то-есть движение в одномерном пространстве, представлено здесь в виде кривой в двухмерном пространственно-временном континууме. Каждой точке в нашем пространственно-временном континууме соответствует пара чисел, одно из

которых отмечает временную, а другое — пространственную координату. Наоборот: определённая точка в нашем пространственно-временном континууме соответствует некоторой паре чисел, характеризующей событие. Две соседние точки представляют собой два события, происшедшие в местах, близких друг от друга, и в мо-

менты времени, непосредственно следующие друг за другом.

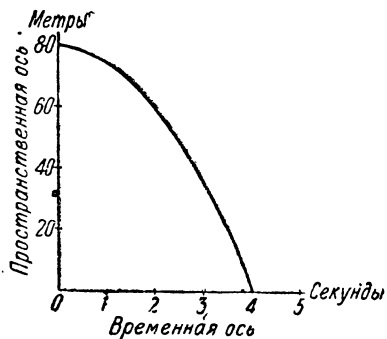


Рис. 63.

Вы могли бы возразить против нашего способа представления следующим образом: мало смысла в представлении единицы времени отрезком, в его механическом соединении с пространством, образующим двухмерный континуум из двух одномерных континуумов. Но тогда вы должны были бы столь

же серьёзно протестовать против всех графиков, представляющих, например, изменение температуры в Нью-Йорке в течение последнего лета, или против графиков, изображающих изменение стоимости жизни за последние несколько лет, так как в каждом из этих случаев употребляется тот же самый метод. В температурных графиках одномерный температурный континуум соединяется с одномерным временным континуумом в двухмерный температурно-временной континуум.

Вернёмся к частице, падающей с 80-метровой башни. Наша графическая картина движения есть полезное соглашение, так как она позволяет нам характеризовать положение частицы в любой произвольный момент времени. Зная, как движется частица, мы хотели бы изобразить её движение ещё раз. Сделать это можно двумя путями.

Вспомним изображение частиц, изменяющих своё положение со временем в одномерном пространстве. Мы изображаем движение как ряд событий в одномерном

пространственном континууме. Мы не смешиваем время и пространство, применяя *динамическую* картину, в которой положения *изменяются* со временем.

Но можно изобразить то же самое движение другим путём. Мы можем образовать *статическую* картину, рассматривая кривую в двухмерном пространственно-временном континууме. Теперь движение рассматривается как нечто, что *есть*, что существует в двухмерном пространственно-временном континууме, а не как нечто, изменяющееся в одномерном пространственном континууме.

Обе эти картины совершенно равноценны, и предпочтение одной из них перед другой есть дело лишь условности и вкуса.

Здесь ничего не сказано о том, как относятся обе эти картины движения к теории относительности. Оба представления могут быть использованы с одинаковым правом, хотя классическая теория скорее предпочитала динамическую картину описания движения, как того, что происходит в пространстве, статической, описывающей его в пространстве-времени. Но теория относительности изменила этот взгляд. Она явно предпочла статическую картину и нашла в этом представлении движения, как того, что существует в пространстве-времени, более удобную и более объективную картину реальности. Мы должны ещё ответить на вопрос, почему эти две картины эквивалентны с точки зрения классической физики и не эквивалентны с точки зрения теории относительности.

Ответ будет понятным, если снова рассмотреть две системы координат, движущиеся прямолинейно и равномерно друг относительно друга.

Согласно классической физике наблюдатели в обеих системах, движущихся прямолинейно и равномерно друг относительно друга, найдут для одного и того же события различные пространственные координаты, но одну и ту же временную координату. Таким образом, в нашем примере удар камня о землю характеризуется при нашем выборе системы координат временной координатой «4» и пространственной координатой «0». Согласно классической механике наблюдатели, движущиеся прямолинейно

и равномерно относительно выбранной системы координат, обнаружат, что камень достигнет земли спустя четыре секунды после начала падения. Но каждый из наблюдателей относит расстояние к своей системе координат, и они будут, вообще говоря, связывать различные пространственные координаты с событием соударения, хотя временная координата будет одной и той же для всех других наблюдателей, движущихся прямолинейно и равномерно друг относительно друга. Классическая физика знает только «абсолютное» время, текущее одинаково для всех наблюдателей. Для каждой системы координат двухмерный континуум может быть разбит на два одномерных континуума: время и пространство. Благодаря «абсолютному» характеру времени переход от «статики» к «динамической» картине движения имеет в классической физике объективный смысл.

Но мы уже убедились в том, что классические преобразования не могут применяться в физике в общем случае. С практической точки зрения они ещё пригодны для малых скоростей, но не годятся для обоснования фундаментальных физических вопросов.

Согласно теории относительности момент соударения камня с землёй не будет одним и тем же для всех наблюдателей. И временная координата, и пространственная координата будут различными в двух различных системах координат, и изменение временной координаты будет весьма заметным, если относительная скорость систем приближается к скорости света. Двухмерный континуум не может быть разбит на два одномерных континуума, как в классической физике. Мы не можем рассматривать пространство и время раздельно при определении пространственно-временных координат в другой системе координат. Разделение двухмерного континуума на два одномерных оказывается, с точки зрения теории относительности, произвольным процессом, не имеющим объективного смысла.

Всё, что мы только что сказали, нетрудно обобщить для случая непрямолинейного движения. В самом деле, для описания событий в природе нужно применить не два, а четыре числа. Физическое пространство, будучи

порождено объектами и их движением, имеет три измерения, и положения объектов характеризуются тремя числами. Момент события есть четвёртое число. Каждому событию соответствует четыре определённых числа; каким-либо четырём числам соответствует определённое событие. Поэтому: мир событий образует *четырёхмерный континуум*. В этом нет ничего мистического, и последнее предложение одинаково справедливо и для классической физики, и для теории относительности. И опять различие обнаруживается лишь тогда, когда рассматриваются две системы координат, движущиеся друг относительно друга. Пусть движется комната, а наблюдатели внутри и вне её определяют пространственно-временные координаты одних и тех же событий. Сторонник классической физики разобьёт четырёхмерный континуум на трёхмерное пространство и одномерный временной континуум. Старый физик заботится только о преобразовании пространства, так как время для него абсолютно. Он находит разбиение четырёхмерного мирового континуума на пространство и время естественным и удобным. Но с точки зрения теории относительности время, так же как и пространство, изменяется при переходе от одной системы координат к другой, и преобразования Лоренца рассматривают трансформационные свойства четырёхмерного пространственно-временного континуума — нашего четырёхмерного мира событий.

Мир событий может быть описан динамически с помощью картины, изменяющейся во времени и набросанной на фоне трёхмерного пространства. Но он может быть также описан посредством статической картины, набросанной на фоне четырёхмерного пространственно-временного континуума. С точки зрения классической физики обе картины, динамическая и статическая, — равноценны. Но с точки зрения теории относительности статическая картина более удобна и более объективна.

Даже в теории относительности мы можем ещё употреблять динамическую картину, если мы её предпочитаем. Но мы должны помнить, что это деление на время и пространство не имеет объективного смысла, так как

время больше не является «абсолютным». В последующем мы ещё будем пользоваться «динамическим», а не «статическим» языком, но при этом всегда будем учитывать его ограниченность.

Общая относительность

Остаётся выяснить ещё один момент. Пока ещё не решён один из наиболее фундаментальных вопросов: существует ли инерциальная система? Мы узнали кое-что о законах природы, их инвариантности по отношению к преобразованиям Лоренца и их справедливости во всех инерциальных системах, движущихся прямолинейно и равномерно друг относительно друга. Мы имеем законы, но не знаем того «тела отсчёта», к которому следует их отнести.

Для того чтобы больше знать об этих трудностях, побеседуем с физиком, стоящим на позиции классической физики, и зададим ему несколько простых вопросов:

— «Что такое инерциальная система?»

— «Это система координат, в которой справедливы законы механики. Тело, на которое не действуют внешние силы, движется в такой системе прямолинейно и равномерно. Это свойство позволяет нам, следовательно, отличить инерциальную систему координат от всякой другой».

— «Но что значит, что на тело не действуют никакие внешние силы?»

— «Это просто значит, что тело движется прямолинейно и равномерно в инерциальной системе координат».

Здесь вы могли бы ещё раз поставить вопрос: «Что же такое инерциальная система координат?» Но, поскольку имеется ещё маленькая надежда получить ответ, отличный от вышеприведённого, постараемся добиться конкретной информации, изменив вопрос:

— «Является ли система, жёстко связанная с Землёй, инерциальной?»

— «Нет, потому что законы механики не являются строго справедливыми на Земле, благодаря её вращению. Систему координат, жёстко связанную с Солнцем, можно считать инерциальной при решении многих проблем; но,

когда мы говорим о вращении Солнца, мы снова заключаем, что жёстко связанную с ним систему координат нельзя считать строго инерциальной».

— «Тогда, что конкретно является вашей инерциальной системой координат и как следует выбрать состояние её движения?»

— «Это только полезная фикция, и у меня нет никакого представления о том, как её реализовать. Если бы только я мог изолироваться от всех материальных тел и освободиться от всех внешних влияний, то моя система координат была бы инерциальной».

— «Но что вы имеете в виду, говоря о системе координат, свободной от всех внешних влияний?»

— «Я имею в виду, что система координат инерциальна». — Мы вновь вернулись к нашему первоначальному вопросу.

Наша беседа обнаруживает серьёзную трудность в классической физике. Мы имеем законы, но не знаем, каково то тело отсчёта, к которому следует их отнести, и всё наше физическое построение оказывается возведённым на песке.

Мы можем подойти к той же трудности с другой точки зрения. Постараемся представить себе, что во всей Вселенной существует только одно тело, образующее нашу систему координат. Это тело начинает вращаться. Согласно классической механике физические законы для вращающегося тела отличны от законов для невращающегося тела. Если принцип инерции справедлив в одном случае, то он несправедлив в другом. Но всё это звучит очень сомнительно. Позвоительно ли рассматривать движение лишь одного тела во всей Вселенной? Под движением тела мы всегда разумеем изменение его положения относительно другого тела. Поэтому говорить о движении одного единственного тела, значит противоречить здравому смыслу. Классическая механика и здравый смысл сильно расходятся в этом пункте. Рецепт Ньютона таков: если принцип инерции имеет силу, то система координат либо покоится, либо движется прямолинейно и равномерно. Если принцип инерции не имеет силы, то тело не находится в прямолинейном и равно-

мерном движении. Таким образом, наш вывод о движении или покое зависит от того, применимы или нет все физические законы к данной системе координат.

Возьмём два тела, например Солнце и Землю. Движение, которое мы наблюдаем, также *относительное*. Его можно описать с помощью системы координат, связанной либо с Землёй, либо с Солнцем. С этой точки зрения великое достижение Коперника состоит в переносе системы координат с Земли на Солнце. Но поскольку движение относительно и можно применить любое тело отсчёта, то оказывается, что нет никаких оснований для того, чтобы предпочесть одну систему координат другой.

Снова вмешивается физика и изменяет нашу общепринятую точку зрения. Система координат, связанная с Солнцем, имеет с инерциальной системой большее сходство, чем система, связанная с Землёй. Физические законы предпочтительнее применять в системе Коперника, чем в системе Птолемея. Величие открытия Коперника может быть высоко оценено лишь с физической точки зрения. Физика показывает, что для описания движения планет система координат, жёстко связанная с Солнцем, имеет огромные преимущества.

В классической физике нет никакого абсолютного прямолинейного и равномерного движения. Если две системы координат движутся прямолинейно и равномерно друг относительно друга, то нет никаких оснований говорить: «Эта система покоится, а другая движется». Но если обе системы координат находятся в непрямолинейном и неравномерном движении друг относительно друга, то имеется полное основание сказать: «Это тело движется, а другое покоится (или движётся прямолинейно и равномерно)». Абсолютное движение имеет здесь вполне определённый смысл. В этом месте между здравым смыслом и классической физикой имеется широкая пропасть. Упомянутые трудности, касающиеся инерциальной системы, а также и трудности, касающиеся абсолютного движения, тесно связаны между собой. Абсолютное движение становится возможным только благодаря идее об инерциальной системе, для которой справедливы законы механики.

Может показаться, что будто бы нет выхода из этих трудностей, что будто бы никакая физическая теория не может избежать их. Источник их лежит в том, что законы природы справедливы только для особого класса систем координат, а именно, для инерциальных. Возможность разрешения этих трудностей зависит от ответа на следующий вопрос. Можем ли мы сформулировать физические законы таким образом, чтобы они были справедливыми для всех систем координат, не только для систем, движущихся прямолинейно и равномерно, но и для систем, движущихся совершенно произвольно по отношению друг к другу? Если это можно сделать, то наши трудности будут разрешены. Тогда мы будем в состоянии применять законы природы в любой системе координат. Борьба между воззрениями Птолемея и Коперника, столь жестокая в ранние дни науки, стала бы тогда совершенно бессмысленной. Любая система координат могла бы применяться с одинаковым основанием. Два предложения — «Солнце покоится, а Земля движется» и «Солнце движется, а Земля покоится» — означали бы просто два различных соглашения о двух различных системах координат.

Могли ли бы мы построить реальную релятивистскую физику, справедливую во всех системах координат, физику, в которой имело бы место не абсолютное, а лишь относительное движение? Это, в самом деле, оказывается возможным!

У нас есть по крайней мере одно, хотя и очень слабое, указание о том, как построить новую физику. Действительно, релятивистская физика должна применяться во всех системах координат, а стало быть и в специальном случае — в инерциальной системе. Мы уже знаем законы для этой инерциальной системы координат. Новые общие законы, справедливые для всех систем координат, должны в специальном случае инерциальной системы сводиться к старым, известным законам.

Проблема формулирования физических законов для всякой системы координат была разрешена так называемой *общей теорией относительности*; предыдущая теория, применяемая только к инерциальным системам, на-

зывается *специальной теорией относительности*. Эти две теории не могут, разумеется, противоречить друг другу, так как мы всегда должны включать старые законы специальной теории относительности в общие законы для неинерциальной системы. Но если раньше инерциальная система координат была единственной, для которой были сформулированы физические законы, то теперь она будет представлять особый предельный случай, поскольку допустимы любые системы координат, движущиеся произвольно по отношению друг к другу.

Такова программа общей теории относительности. Но, обрисовывая путь, каким она создавалась, мы должны быть ещё менее конкретными, чем это было до сих пор. Новые трудности, возникающие в процессе развития науки, вынуждают нашу теорию становиться всё более и более абстрактной. Нас ожидает ещё ряд неожиданностей. Но наша конечная цель — всё лучшее и лучшее понимание реальности. К логической цепи, связывающей теорию и наблюдение, прибавляются новые звенья. Чтобы очистить путь, ведущий от теории к эксперименту, от ненужных и искусственных допущений, чтобы охватить всё более обширную область фактов, мы должны делать цепь всё длиннее и длиннее. Чем проще и фундаментальнее становятся наши допущения, тем сложнее математическое орудие нашего рассуждения; путь от теории к наблюдению становится длиннее, тоньше и сложнее. Хотя это и звучит парадоксально, но мы можем сказать: современная физика проще, чем старая физика, и поэтому она кажется более трудной и запутанной. Чем проще наша картина внешнего мира и чем больше фактов она охватывает, тем резче отражает она в наших умах гармонию Вселенной.

Наша новая идея проста: построить физику, справедливую для всех систем координат. Осуществление этой идеи приносит формальное усложнение и вынуждает нас использовать математические методы, отличные от тех, которые до сих пор применялись в физике. Мы покажем здесь только связь между осуществлением этой программы и двумя принципиальными проблемами: тяготением и геометрией.

Вне и внутри лифта

Закон инерции является первым большим успехом в физике, фактически её действительным началом. Он был получен размышлением об идеализированном эксперименте, о теле, постоянно движущемся без трения и без воздействия каких-либо других внешних сил. Из этого примера, а позднее из многих других, мы узнали о важности идеализированного эксперимента, созданного мышлением. Здесь тоже будут обсуждаться идеализированные эксперименты. Хотя они могут выглядеть и весьма фантастично, тем не менее они помогут нам понять в относительности столько, сколько это возможно нашими простыми методами.

Раньше мы имели идеализированный эксперимент с прямолинейно и равномерно движущейся комнатой. Здесь мы будем иметь падающий лифт.

Представим себе огромный лифт на башне небоскрёба, гораздо более высокого, чем какой-либо из действительно построенных. Внезапно канат, поддерживающий лифт, обрывается, и лифт свободно падает по направлению к земле. Во время падения наблюдатели в лифте производят опыты. Описывая их, мы можем не заботиться о сопротивлении воздуха или трении, потому что в наших идеализированных условиях можно пренебречь их наличием. Один из наблюдателей вынимает платок и часы из своего кармана и выпускает их из рук. Что происходит с этими предметами? Для внешнего наблюдателя, который смотрит через окно лифта, и платок, и часы падают по направлению к земле с одинаковым ускорением. Мы помним, что ускорение падающих тел совершенно независимо от их масс, и это было тем фактом, который обнаружил равенство тяжёлой и инертной массы (стр. 52). Мы помним также, что равенство двух масс — тяжёлой и инертной — с точки зрения классической механики было совершенно случайным фактом и не играло никакой роли в её структуре. Однако здесь это равенство, отражённое в равенстве ускорения всех падающих тел, существенно и составляет основу всех наших рассуждений.

Вернёмся к падающему платку и часам; для внешнего наблюдателя оба предмета падают с одинаковым ускорением. Но таково же ускорение и лифта, его стен, пола и потолка. Поэтому расстояние между обоими телами и полом не изменится. Для внутреннего наблюдателя оба тела остаются точно там же, где они были в тот момент, когда наблюдатель выпустил их из рук. Внутренний наблюдатель может игнорировать поле тяготения, так как источник последнего лежит вне его системы координат. Он находит, что никакие силы внутри лифта не действуют на оба тела, и таким образом они остаются в покое, совершенно так же, как они оставались бы в покое и в инерциальной системе. Странные вещи происходят в лифте! Если наблюдатель толкает тело в каком-либо направлении, например вверх или вниз, то оно всегда движется прямолинейно и равномерно, пока не столкнётся с потолком или полом лифта. Короче говоря, законы классической механики справедливы для наблюдателя внутри лифта. Все тела ведут себя так, как следовало ожидать по закону инерции. Наша новая система координат, жёстко связанная со свободно падающим лифтом, отличается от инерциальной системы лишь в одном отношении. В инерциальной системе координат движущееся тело, на которое не действуют никакие силы, всегда продолжает двигаться прямолинейно и равномерно. Инерциальная система координат, рассматриваемая в классической физике, не ограничена ни в пространстве, ни во времени. Однако, рассматриваемый случай с наблюдателем, находящимся в лифте, иной. Инерциальный характер его системы координат ограничен в пространстве и времени. Рано или поздно прямолинейно и равномерно движущееся тело столкнётся со стенками лифта; при этом прямолинейное и равномерное движение нарушится. Рано или поздно весь лифт столкнётся с землёй, уничтожив наблюдателей и их опыты. Эта система координат является лишь «карманным изданием» инерциальной системы.

Этот местный характер системы координат наблюдателя, находящегося в лифте, весьма существенен. Если бы наш воображаемый лифт достигал размеров от север-

ного полюса до экватора и платок был бы помещён на северном полюсе, а часы на экваторе, то для внешнего наблюдателя оба тела не имели бы одинакового ускорения; они не были бы в покое друг относительно друга. Все наши рассуждения потерпели бы крушение! Размеры лифта должны быть ограничены так, чтобы можно было предположить равенство ускорений всех тел по отношению к внешнему наблюдателю.

С этим ограничением система координат, связанная с падающим лифтом, инерциальна для внутреннего наблюдателя. По крайней мере мы можем указать систему координат, в которой справедливы все физические законы, хотя она и ограничена во времени и пространстве. Если мы вообразим другую систему координат, другой лифт, движущийся прямолинейно и равномерно относительно свободно падающего, то обе эти системы координат будут локально инерциальными. Все законы совершенно одинаковы в обеих системах. Переход от одной системы к другой даётся преобразованием Лоренца.

Посмотрим, каким путём оба наблюдателя, внешний и внутренний, описывают то, что происходит в лифте.

Внешний наблюдатель замечает движение лифта и всех тел в нём, и находит его соответствующим закону тяготения Ньютона. Для него движение является не прямолинейным и равномерным, а ускоренным, вследствие действия поля тяготения земли.

Однако, поколение физиков, рождённое и воспитанное в лифте, рассуждало бы совершенно иначе. Оно было бы уверено в том, что оно обладает инерциальной системой, и относило бы все законы природы к своему лифту, заявляя с уверенностью, что законы принимают специально простую форму в их системе координат. Для них было бы естественным считать свой лифт покоящимся и свою систему координат инерциальной.

Невозможно установить принципиальное различие между внешним и внутренним наблюдателем. Каждый из них мог бы претендовать на право отнести все события к своей системе координат. Оба описания событий можно было бы сделать одинаково последовательными.

Из этого примера мы видим, что последовательное

описание физических явлений в двух различных системах координат возможно, даже если они не движутся прямолинейно и равномерно друг относительно друга. Но для такого описания мы должны принять во внимание тяготение, создающее, так сказать, «мост», позволяющий перейти от одной системы координат к другой. Поле тяготения существует для внешнего наблюдателя, для внутреннего наблюдателя оно не существует. Ускоренное движение лифта в поле тяготения существует для внешнего наблюдателя, для внутреннего же наблюдателя — покой и отсутствие поля тяготения.

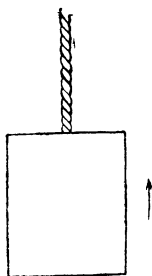


Рис. 64.

Но «мост», то-есть поле тяготения, делающее описание в обеих системах координат возможным, покоится на одной очень важной опоре: эквивалентности тяжёлой и инертной массы. Без этой руководящей идеи, оставшейся незамеченной в классической механике, наши теперешние расхождения полностью отпали бы.

Возьмём несколько иной идеализированный эксперимент. Пусть имеется инерциальная система координат, в которой справедлив закон инерции. Мы уже описывали то, что происходит в лифте, покоящемся в такой инерциальной системе. Но теперь мы изменим картину. Кто-то извне привязал к лифту канат и тянет его с постоянной силой в направлении, указанном на рисунке. Независимо, как это осуществлено. Так как законы механики справедливы в этой системе координат, то лифт в целом движется с постоянным ускорением в направлении движения. Будем опять слушать объяснения явлений, происходящих в лифте, даваемые внешним и внутренним наблюдателями.

Внешний наблюдатель: Моя система координат инерциальна. Лифт движется с постоянным ускорением, потому что подвергается воздействию постоянной силы. Наблюдатели внутри лифта находятся в абсолютном движении, для них законы механики несправедливы. Они не находят, что тела, на которые не действуют силы, покоятся. Если тело остаётся свободным, оно скоро стол-

кнётся с полом лифта, так как пол движется вверх по направлению к телу. Это происходит одинаково и с часами, и с платком. Мне кажется очень странным, что наблюдатель внутри лифта должен всегда быть на «полу», потому что, как только он прыгает, пол достигнет его вновь.

Внутренний наблюдатель: Я не вижу какого-либо основания считать, что мой лифт находится в абсолютном движении. Я согласен, что моя система координат, жёстко связанная с лифтом, фактически не инерциальна, но я не думаю, что нужно примириться с абсолютным движением. Мои часы, платок и все тела падают потому, что лифт в целом находится в поле тяготения. Я замечаю движение точно такого же рода, как и человек на Земле. Он объясняет его очень просто — действием поля тяготения. Такое же объяснение подходит и для меня.

Эти два описания — одно данное внешним, а другое — внутренним наблюдателем, — вполне последовательны, и нет возможности решить, какое из них правильно. Мы можем принять любое из них для описания явлений в лифте: либо вместе с внешним наблюдателем принять неравномерность движения и отсутствие поля тяготения, либо вместе с внутренним наблюдателем принять покой и наличие поля тяготения.

Внешний наблюдатель может предположить, что лифт находится в «абсолютном» неравномерном движении. Но движение, которое уничтожается предположением о действии поля тяготения, не может считаться абсолютным.

Возможно, что имеется выход из неопределённости, созданной наличием двух различных описаний, и, может быть, можно было бы вынести решение в пользу одного и против другого. Представим себе, что световой луч входит в лифт горизонтально через боковое окно и спустя очень короткое время достигает противоположной стены. Посмотрим, каковы будут предсказания обоих наблюдателей относительно пути луча.

Внешний наблюдатель, который считает, что лифт находится в ускоренном движении, утверждал бы: световой луч входит в окно и движется горизонтально вдоль прямой с постоянной скоростью по направлению к противоположной стене. Но лифт движется вверх, и за время, в течение

которого свет доходит к стене, лифт изменит своё положение. Поэтому свет упадёт в точку, расположенную не точно напротив точки его входа, а немного ниже (рис. 65). Смещение будет очень небольшим, но тем не менее оно существует, и световой луч проходит относительно лифта не вдоль прямой, а вдоль слабо искривлённой линии. Это вызвано тем, что за то время, когда луч пересекает внутренность лифта, сам лифт смещается на некоторое расстояние.

Внутренний наблюдатель, который считает, что на все объекты в лифте действует поле тяготения, сказал бы: ускоренного движения лифта нет, а есть лишь действие поля тяготения. Луч света невесом и потому не будет подвергаться действию поля тяготения. Если его направить горизонтально, он упадёт на стену в точке как раз напротив той, в которую он вошёл.

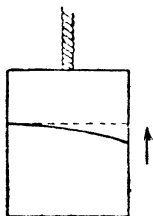


Рис. 65.

Из этого обсуждения следует, что имеется возможность выбора одной из двух противоположных точек зрения, так как явление различалось бы для обоих наблюдателей. Если ни в одном из только что указанных объяснений нет ничего нелогичного, то все наши предыдущие рассуждения нарушаются, и мы не можем последовательно описывать все явления двумя методами, либо принимая поле тяготения, либо отказываясь от него.

Но, к счастью, в рассуждениях внутреннего наблюдателя имеется серьёзная ошибка, спасающая наши предыдущие заключения. Он сказал: «Луч света невесом и потому не будет подвергаться действию поля тяготения». Но это неверно! Луч света несёт энергию, а энергия имеет массу. Но на всякую инертную массу поле тяготения оказывает воздействие, так как инертная и тяжёлая массы эквивалентны. Луч света будет искривляться в поле тяготения точно так же, как искривляется траектория тела, брошенного горизонтально со скоростью, равной скорости света. Если бы внутренний наблюдатель рассуждал точно и принял бы во внимание искривление световых лучей в поле тяготения, то его выводы были бы точно такими же, как и выводы внешнего наблюдателя.

Поле тяготения Земли, конечно, очень слабо для того, чтобы искривление светового луча в нём можно было обнаружить непосредственно экспериментом. Но известные опыты, сделанные во время солнечных затмений, убедительно, хотя и косвенно, показывают влияние поля тяготения на путь светового луча.

Из этих примеров следует, что имеется вполне обоснованная надежда сформулировать релятивистскую физику. Но для этого мы должны сначала разрешить проблему тяготения.

Мы видели на примере со светом последовательность двух описаний. Можно предположить наличие неравномерности движения, а можно этого не делать. Мы можем исключить из наших примеров «абсолютное» движение с помощью поля тяготения. Но тогда в неравномерном движении нет ничего абсолютного. Поле тяготения в состоянии полностью его уничтожить.

Призраки абсолютного движения и инерциальной системы координат могут быть исключены из физики и может быть построена новая релятивистская физика. Наши идеализированные опыты показывают, как тесно связана проблема общей теории относительности с проблемой тяготения и почему эквивалентность тяжёлой и инертной масс так существенна для этой связи. Ясно, что решение проблемы тяготения в общей теории относительности должно отличаться от ньютоновского. Законы тяготения, так же как и все законы природы, должны быть сформулированы для всех возможных систем координат, в то время как законы классической механики, сформулированные Ньютоном, справедливы лишь в инерциальной системе координат.

Геометрия и опыт

Наш следующий пример будет более фантастичным, чем пример с падающим лифтом. Мы должны подойти к новой проблеме, проблеме связи между общей теорией относительности и геометрией. Начнём с описания мира, в котором живут лишь двумерные, а не трёхмерные, как мы сами, существа. Кинематограф приучил нас к двумерным существам, действующим на двумерном экране.

Представим себе теперь, что эти призрачные фигуры, действующие на экране, действительно существуют, что они обладают способностью мышления, что они могут создавать свою собственную науку, что для них двухмерный экран олицетворяет геометрическое пространство. Эти существа не в состоянии представить себе наглядным образом трёхмерное пространство, так же, как мы не в состоянии представить мир четырёх измерений. Они могут изогнуть прямую линию; они знают, что такое круг, но они не в состоянии построить сферу, потому что это означало бы покинуть их двухмерный экран. Мы находимся в таком же положении. Мы в состоянии изогнуть и линии, и поверхности, но мы с трудом можем представить искривлённое пространство.

Живя, мысля и экспериментируя, наши призрачные фигуры могли бы, возможно, овладеть знанием двухмерной евклидовой геометрии. Таким образом, они могли бы доказать, что сумма углов в треугольнике равна 180 градусам. Они могли бы построить два круга с общим центром, один очень малый, а другой большой. Они нашли бы, что отношение длин окружностей двух таких кругов равно отношению их радиусов — результат, опять характерный для евклидовой геометрии. Если бы экран был бесконечно велик, то наши призрачные существа нашли бы, что, отправившись однажды в путешествие вперёд по прямой, они никогда не вернутся к своей отправной точке.

Представим себе теперь, что эти двухмерные существа живут в изменённых условиях. Предположим, что кто-то извне, из «третьего измерения» перенёс их с экрана на поверхность сферы с очень большим радиусом. Если эти призраки очень малы по отношению ко всей поверхности, если у них нет средств дальнего сообщения и они не могут двигаться очень далеко, то они не обнаружат какого-либо изменения. Сумма углов в малых треугольниках ещё составляет 180 градусов. Отношение радиусов двух малых кругов с общим центром ещё равно отношению длин их окружностей.

Но пусть эти призрачные существа с течением времени развивают свои теоретические и технические познания. Пусть ими найдены средства сообщения, позволяющие им

быстро покрывать огромные расстояния. Тогда они найдут, что, отправляясь в путешествие прямо вперёд, они, в конце концов, вернутся к своей исходной точке. «Прямо вперёд» означает вдоль большого круга сферы. Они найдут так же, что отношение длин двух концентрических окружностей не равно отношению радиусов, если один из радиусов мал, а другой велик.

Если наши двухмерные существа консервативны, если их поколения изучали евклидову геометрию в прошлом, когда они не могли далеко путешествовать и когда эта геометрия соответствовала наблюдаемым фактам, то они конечно, сделают всё возможное, чтобы сохранить её, несмотря на очевидность своих измерений. Они постараются заставить физику нести бремя этих противоречий. Они станут искать какие-либо физические основания, скажем, различие температур, деформирующее линии и вызывающее отклонение от евклидовой геометрии. Но раньше или позже они должны будут найти, что имеется гораздо более логический и последовательный путь описания этих явлений. Они окончательно поймут, что их мир конечен, что его геометрические принципы отличны от тех, которые они изучали. Несмотря на свою неспособность представить себе свой мир, они поймут, что он есть двухмерная поверхность сферы. Они скоро изучат новые принципы геометрии, которая, хотя и отличается от евклидовой, тем не менее может быть сформулирована так же последовательно и логично для их двухмерного мира. Новому поколению, воспитанному на знании сферической геометрии, старая евклидова геометрия будет казаться более сложной и искусственной, так как она не соответствует наблюдаемым фактам.

Вернёмся к трёхмерным существам нашего мира.

Что это значит, когда утверждают, что наше трёхмерное пространство имеет евклидов характер? Смысл этого в том, что все логически доказанные положения евклидовой геометрии могут быть также подтверждены действительным экспериментом. С помощью твёрдых тел или световых лучей мы можем построить объекты, соответствующие идеализированным объектам евклидовой геометрии. Ребро линейки или световой луч соответствуют прямой.

Сумма углов треугольника, построенного из тонких жёстких стержней, равна 180 градусам. Отношение радиусов двух концентрических окружностей, построенных из тонкой упругой проволоки, равно отношению длин окружностей. Истолкованная таким образом евклидова геометрия становится главой физики, хотя и очень простой её главой.

Но мы можем представить себе, что обнаружены противоречия: например, что сумма углов большого треугольника, построенного из стержней, которые по многим основаниям должны были считаться твёрдыми, не равна 180 градусам. Так как мы уже прибегали к идее конкретного представления объектов евклидовой геометрии с помощью твёрдых тел, то мы, вероятно, стали бы искать какие-либо физические силы, которые явились причиной такого неожиданного поведения наших стержней. Мы постарались бы найти физическую природу этих сил и их влияние на другие явления. Чтобы спасти евклидову геометрию, мы обвинили бы объекты в том, что они не твёрды, что они не точно соответствуют объектам евклидовой геометрии. Мы постарались бы найти лучшие тела, ведущие себя так, как это ожидается согласно евклидовой геометрии. Если бы, однако, нам не удалось объединить евклидову геометрию и физику в простую и последовательную картину, то мы должны были бы отказаться от идеи, что наше пространство евклидово, и искать более последовательную картину реальности на основе более общих предположений о геометрических свойствах нашего пространства.

Необходимость этого может быть проиллюстрирована с помощью идеализированного эксперимента, показывающего, что действительно релятивистская физика не может основываться на евклидовой геометрии. Наши рассуждения будут предполагать, что уже известны выводы, касающиеся инерциальной системы координат, а также специальная теория относительности.

Представим себе большой диск с двумя концентрическими окружностями, нарисованными на нём; одна из этих окружностей мала, другая очень велика. Диск быстро вращается. Он вращается относительно внешнего наблюдателя; пусть имеется ещё внутренний наблюдатель, по-

мещающийся на диске. Предположим далее, что система координат внешнего наблюдателя инерциальна. Внешний наблюдатель может нарисовать в своей инерциальной системе две такие же окружности — малую и большую, покоящиеся в его системе, но совпадающие с окружностями на вращающемся диске. Евклидова геометрия справедлива в его системе координат, так как его система инерциальна, — так что отношение длин окружностей равно отношению радиусов. А что же находит наблюдатель на диске?

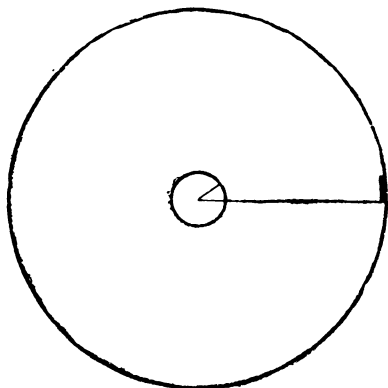


Рис. 66.

С точки зрения классической физики, а также специальной теории относительности его система координат недопустима. Но если мы стремимся найти новую форму физических законов, справедливую в любой системе координат, то мы должны рассматривать наблюдателя на диске и наблюдателя внешнего с одинаковой серьезностью. Теперь мы извне следим за попыткой внутреннего наблюдателя найти путём измерения длины окружностей и радиусов на вращающемся диске. Он использует такой же небольшой измерительный масштаб, какой был использован внешним наблюдателем. «Такой же» означает либо действительно тот же, просто переданный внешним наблюдателем внутреннему, либо один из двух масштабов, имеющих одинаковую длину в покоящейся системе координат.

Внутренний наблюдатель на диске начинает измерение радиуса и длины окружности малого круга. Его результат может оказаться таким же, как и результат внешнего наблюдателя. Ось, на которой вращается диск, проходит через центр. Те части диска, которые близки к центру, имеют очень небольшие скорости. Если окружность достаточно мала, мы можем спокойно применить классиче-

скую механику и не обращать внимания на специальную теорию относительности. Это означает, что отрезок имеет одинаковую длину как для внешнего, так и для внутреннего наблюдателя, и результат двух измерений будет одинаков для них обоих. Теперь наблюдатель на диске измеряет радиус большой окружности. Помещённый на радиусе отрезок движется относительно внешнего наблюдателя. Однако, такой отрезок не сокращается и будет иметь одинаковую длину для обоих наблюдателей, так как направление движения перпендикулярно к отрезку. Таким образом, три измерения одинаковы для обоих наблюдателей: два радиуса и малая окружность. Но не так обстоит дело с четвёртым измерением. Длина большой окружности будет различна для обоих наблюдателей. Отрезок, помещённый на окружности в направлении движения, окажется теперь сокращённым для внешнего наблюдателя, сравнительно с соответствующим ему покоящимся отрезком. Скорость на внешней окружности гораздо больше, чем скорость на внутренней окружности, и это сокращение должно быть учтено. Поэтому, если мы применим выводы специальной теории относительности, наше заключение будет таково: длина большой окружности должна быть различной, если она измеряется обоими наблюдателями. Так как только одна из четырёх длин, измеренных обоими наблюдателями, не будет одинаковой для обоих, то для внутреннего наблюдателя отношение обоих радиусов не может быть равным отношению окружностей, как это имеет место для внешнего наблюдателя. Это означает, что наблюдатель на диске не может подтвердить справедливость евклидовой геометрии в своей системе.

После получения этого результата наблюдатель на диске может сказать, что он не хочет рассматривать систему координат, в которой несправедлива евклидова геометрия. Нарушение евклидовой геометрии обязано абсолютному вращению, тому факту, что его система координат плоха и недопустима. Но, утверждая это, он отвергает важную идею общей теории относительности. С другой стороны, если мы хотим отвергнуть абсолютное движение и сохранить идею об общей относительности, то вся физика должна быть построена на основе более общей

геометрии, чем евклидова. Нет возможности избежать этих следствий, если допустимы все системы координат.

Изменения, произведённые общей теорией относительности, не могут ограничиваться одним пространством. В специальной теории относительности у нас были часы, покоящиеся в каждой системе координат, имеющие одинаковый ритм и синхронизированные, то-есть показывающие одинаковое время в один и тот же момент. Что происходит с часами в неинерциальной системе координат? Идеализированный эксперимент с диском снова будет нам полезен. Внешний наблюдатель имеет в своей специальной системе современные часы, которые все синхронизированы, все имеют одинаковый ритм. Внутренний наблюдатель берёт двое часов одинакового сорта и помещает одни из них на малую внутреннюю окружность, а другие на большую внешнюю. Часы на внутренней окружности имеют очень небольшую скорость по отношению к внешнему наблюдателю. Поэтому мы можем спокойно заключить, что их ритм будет одинаков с ритмом внешних часов. Но часы на большой окружности имеют значительную скорость, изменяющую их ритм сравнительно с часами внешнего наблюдателя, а стало быть, и сравнительно с часами, помещёнными на малой окружности. Таким образом, двое вращающихся часов будут иметь различный ритм, а применяя выводы специальной теории относительности, мы снова видим, что мы не можем во вращающейся системе создать какие-либо приборы, подобные приборам в инерциальной системе координат. Чтобы выяснить, какие выводы могут быть сделаны из этого и из описанных ранее идеализированных экспериментов, приведём ещё раз разговор между старым физиком *С*, который верит в классическую физику, и современным физиком *Н*, который признаёт общую теорию относительности. Пусть *С* будет внешним наблюдателем в инерциальной системе координат, а *Н* — наблюдателем на вращающемся диске.

С. В вашей системе евклидова геометрия несправедлива. Я следил за вашими измерениями и я согласен, что отношение двух окружностей в вашей системе не равно отношению их радиусов. Но это показывает, что ваша

система координат недопустима. А моя система — инерциального характера, и я свободно могу применять евклидову геометрию. Ваш диск находится в абсолютном движении и с точки зрения классической физики образует недопустимую систему, в которой законы механики несправедливы.

Н. Я не хочу ничего слышать об абсолютном движении. Моя система так же хороша, как и ваша. Что я заметил, так это ваше вращение по отношению к моему диску. Никто не может мне запретить отнести все движения к моему диску.

С. Но не чувствовали ли вы странной силы, стремящейся удалить вас от центра диска? Если бы ваш диск не был быстро вращающейся каруселью, то две вещи, которые вы наблюдали, конечно, не имели бы места. Вы не заметили бы силы, толкающей вас к границе диска, и не заметили бы, что евклидова геометрия неприменима в вашей системе. Не достаточны ли эти факты, чтобы убедить вас, что ваша система находится в абсолютном движении?

Н. Вовсе нет! Я, конечно, заметил оба факта, упомянутые вами, но я полагаю, что оба они вызываются сильным полем тяготения, действующим на мой диск. Поле тяготения, направленное от центра диска, деформирует мои твёрдые тела и изменяет ритм моих часов. Поле тяготения, неевклидова геометрия, часы с различным ритмом — всё это кажется мне тесно связанным. Принимая какую-либо систему координат, я должен одновременно предположить наличие соответствующего поля тяготения и его влияние на твёрдые тела и часы.

С. Но вы знаете о трудностях, вызванных вашей общей теорией относительности? Мне хотелось бы сделать свою точку зрения ясной, приведя простой не физический пример. Представим себе идеализированный американский город, состоящий из параллельных улиц с параллельными проспектами, расположенными перпендикулярно к ним. Расстояние между улицами, а также между проспектами всюду одно и то же. Поскольку это так, то и кварталы совершенно одинаковы по величине. Таким путём я могу легко характеризовать положение любого квартала. Но это построение было бы невозможно без

евклидовой геометрии. Таким образом, например, мы не можем покрыть всю нашу Землю одним большим идеальным американским городом. Один взгляд на глобус убедит вас в этом. Но мы не могли бы покрыть и ваш диск такой «американской городской конструкцией». Тот факт, что вы не могли доказать теорему Евклида о равенстве отношений радиусов и окружностей, ясно показывает, что если вы продолжите такое строительство улиц и проспектов достаточно далеко, то рано или поздно вы придёте к трудностям и найдёте, что оно невозможно на вашем диске. Ваша геометрия подобна геометрии на кривой поверхности, где, конечно, указанное построение улиц и проспектов на достаточно большой части поверхности невозможно. Для того чтобы пример был более физическим, возьмём пластинку, неравномерно нагретую, с различной температурой в разных частях поверхности. Можете ли вы с помощью небольших железных прутков, длина которых увеличивается от нагревания, выполнить «параллельно-перпендикулярное» построение, нарисованное мною ниже? Конечно, нет! Ваше поле тяготения разыгрывает над вашими стержнями ту же шутку, что и изменение температуры над небольшими железными прутками.

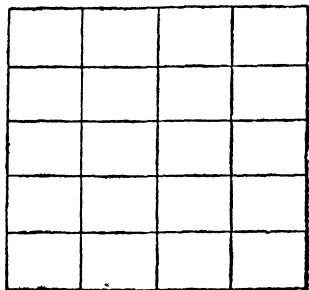


Рис. 67.

Н. Всё это не пугает меня. Построение улиц и проспектов необходимо для того, чтобы определить положения точек, часы — для того чтобы установить порядок событий. Вовсе не необходимо, чтобы город был американским; с таким же успехом он может быть и древнеевропейским. Представим себе идеализированный город, построенный из пластичного материала и затем деформированный. Я могу ещё подсчитать кварталы и узнать улицы и проспекты, хотя они уже больше не прямые и не равноудалены друг от друга. Подобно этому долготы и широты отмечают положения точек на нашей Земле,

хотя на ней и нельзя осуществить построения «американского города».

С. Но я вижу ещё трудность. Вы вынуждены использовать вашу «европейскую городскую структуру». Я согласен, что вы можете установить порядок точек или

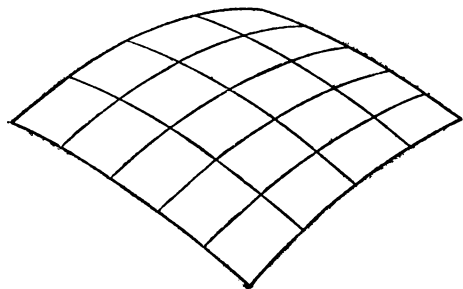


Рис. 68.

времени событий, но это построение спутает все измерения расстояний. Оно не даст вам *метрические свойства пространства*, как это даёт моё построение. Возьмём, пример. Я знаю, что, пройдя в моём американском городе десять кварталов, я дважды покрою рас-

стояние пяти кварталов. Так как я знаю, что все кварталы равны, я сразу же могу определить расстояния.

Н. Это верно. В моей «европейской городской структуре» я не могу сразу же определить расстояния числом деформированных кварталов. Я должен знать кое-что большее; я должен знать геометрические свойства моей поверхности. Совершенно так же всякий знает, что расстояние между 0 и 10° долготы на экваторе не равно расстоянию между теми же долготами вблизи северного полюса. Но всякий штурман знает, как оценить расстояние между двумя такими точками на нашей Земле, ибо он знает её геометрические свойства. Он может сделать это либо путем подсчёта, основываясь на знании сферической тригонометрии, либо экспериментальным путём, проводя свой корабль между двумя этими точками с одной и той же скоростью. В вашем случае вся проблема тривиальна, ибо все улицы и проспекты равно отстоят друг от друга. В случае нашей Земли это уже более сложно; два меридиана 0 и 10° встречаются на земных полюсах и наиболее удалены друг от друга на экваторе. Подобно этому, чтобы определять расстояния, я должен знать в своей «европейской городской структуре» нечто большее, чем вы в

своей «американской городской структуре». Я могу получить эти дополнительные знания изучением геометрических свойств моего континуума в каждом отдельном случае.

С. Всё это только показывает, к какому неудобству и сложности приводит потеря простой структуры евклидовой геометрии ради запутанных построений, которые вы обязаны употреблять. Действительно ли это необходимо?

Н. Боюсь, что да, если мы желаем применять нашу физику в любой системе координат, не прибегая к таинственной инерциальной системе. Я согласен, что мой математический аппарат сложнее вашего, но мои физические предположения проще и естественнее.

Дискуссия ограничивалась двухмерным континуумом. Предмет спора в общей теории относительности ещё более сложен, так как там — не двухмерный, а четырёхмерный пространственно-временной континуум. Но идеи те же, что и набросанные здесь для случая двухмерного пространства. В общей теории относительности мы не можем применять механических построений, с помощью сети параллельно-перпендикулярных стержней и синхронизированных часов, как в специальной теории относительности. В произвольной системе координат мы не можем определить точку и момент времени, в которые произошло событие, используя твёрдые стержни и ритмичные и синхронизированные часы, как в инерциальной системе координат специальной теории относительности. Мы попрежнему можем установить порядок событий с помощью наших неевклидовых стержней и часов, с различным ритмом. Но действительные измерения, требующие твёрдых стержней и совершенных ритмичных и синхронизированных часов, могут быть выполнены только в локальной инерциальной системе. Для такой системы справедлива вся специальная теория относительности. Но наша «хорошая» система координат только локальна, её инерциальный характер ограничен в пространстве и времени. Даже в нашей произвольной системе координат мы можем предвидеть результаты измерений, сделанные в локальной инерциальной системе. Но для этого мы должны знать геометрический характер нашего пространственно-временного континуума.

Наши идеализированные эксперименты показывают только общий характер новой релятивистской физики. Они показывают нам, что основной проблемой является проблема тяготения. Они показывают нам также, что общая теория относительности приводит к дальнейшему обобщению понятий времени и пространства.

Общая относительность и её экспериментальная проверка

Общая теория относительности пытается сформулировать физические законы для всех систем координат. Фундаментальная проблема теории относительности есть проблема тяготения. Теория относительности сделала первое со времени Ньютона серьёзное усилие заново сформулировать закон тяготения. Действительно ли это необходимо? Мы уже узнали о достижениях теории Ньютона, об огромном развитии астрономии, основанном на его законе тяготения. Ньютонов закон ещё остаётся основой всех астрономических расчётов. Но мы узнали также о некоторых возражениях против старой теории. Ньютонов закон справедлив только в инерциальной системе координат классической физики, в системе координат, определённой, как мы помним, условием, что в ней должны быть справедливы законы механики. Сила, действующая между двумя массами, зависит от расстояния между ними. Связь между силой и расстоянием, как мы помним, инвариантна относительно классических преобразований. Но этот закон не соответствует строению специальной теории относительности. Расстояние не инвариантно по отношению к преобразованиям Лоренца. Мы могли бы стараться, что мы и делали успешно в отношении законов движения, обобщить закон тяготения, сделать его соответствующим специальной теории относительности или, другими словами, формулировать его так, чтобы он был инвариантным по отношению к преобразованиям Лоренца, а не только по отношению к классическим преобразованиям. Но ньютонов закон тяготения упрямо сопротивляется всем нашим усилиям упростить и приспособить его к схеме специальной теории относительности. Даже если бы это и удалось нам, был бы необходим ещё дальнейший шаг,

шаг от инерциальной системы координат специальной теории относительности к произвольной системе общей теории относительности. С другой стороны, идеализированный эксперимент с падающим лифтом ясно показывает, что нет шансов сформулировать общую теорию относительности без разрешения проблемы тяготения. Из наших рассуждений мы видим, почему решение проблемы тяготения будет различно в классической физике и в общей теории относительности.

Мы ещё раз постарались показать путь, ведущий нас к общей теории относительности, и основания, вынуждающие нас изменить наши старые взгляды. Не входя в формальную структуру теории, мы охарактеризуем некоторые черты новой теории тяготения для сравнения со старой. Не слишком трудно будет понять природу различий обеих теорий после всего, что было ранее сказано.

1. Гравитационные уравнения общей теории относительности могут быть применены к любой системе координат. Выбрать какую-либо особую систему координат в специальном случае — дело лишь удобства. Теоретически допустимы все системы координат. Игнорируя тяготение, мы автоматически возвращаемся к инерциальной системе специальной теории относительности.

2. Ньютонов закон тяготения связывает движение тела здесь и теперь с действием другого тела и в то же самое время на далёком расстоянии. Этот закон стал образцом для всего механистического мировоззрения. Но механистическое мировоззрение потерпело крах. В уравнениях Максвелла мы создали новый образец для законов природы. Уравнения Максвелла суть структурные законы. Они связывают события, которые происходят теперь и здесь, с событиями, которые происходят немного позднее и в непосредственном соседстве. Они суть законы, описывающие электромагнитное поле. Наши новые гравитационные уравнения суть также структурные законы, описывающие изменение поля тяготения. Схематически мы можем сказать: переход от ньютонова закона тяготения к общей относительности до некоторой степени аналогичен переходу от теории электрических жидкостей и закона Кулона к теории Максвелла.

3. Наш мир неевклидов. Геометрическая природа его образована массами и их скоростями. Гравитационные уравнения общей теории относительности стремятся раскрыть геометрические свойства нашего мира.

Предположим на время, что нам удалось последовательно выполнить программу общей теории относительности. Но не грозит ли нам опасность увлечения спекуляциями, слишком далёкими от реальности? Мы знаем, как хорошо старая теория объясняет астрономические наблюдения. Можно ли построить мост между новой теорией и наблюдением? Каждое рассуждение должно проверяться экспериментом, и любые выводы, как бы они привлекательны ни были, должны отбрасываться, если не соответствуют фактам. Как выдержала новая теория тяготения экспериментальную проверку? Ответ на этот вопрос можно дать в следующем предложении: старая теория есть особый предельный случай новой. Если силы тяготения сравнительно слабы, старый ньютонов закон оказывается хорошим приближением к новым законам тяготения. Таким образом, все наблюдения, подтверждающие классическую теорию, подтверждают и общую теорию относительности. Мы вновь приходим к старой теории от более высокого уровня новой.

Даже если бы нельзя было указать дополнительных наблюдений в пользу новой теории, если бы её объяснения были лишь столь же хороши, как и объяснения старой теории, и если бы был предоставлен свободный выбор между обеими теориями, мы должны были бы решить в пользу новой. Уравнения новой теории с формальной точки зрения сложнее, но их предпосылки, с точки зрения основных принципов, гораздо проще. Исчезли два страшных привидения — абсолютное время и инерциальная система. Чрезвычайно важная идея эквивалентности тяжёлой и инертной массы не осталась без внимания. Не надо допущений, касающихся сил тяготения и их зависимости от расстояния. Уравнения тяготения имеют форму структурных законов, требуемую всеми физическими законами со времени великих достижений теории поля.

Из новых гравитационных законов могут быть сделаны и новые выводы, не содержащиеся в законах тяготения

Ньютона. Один вывод, а именно отклонение светового луча в поле тяготения, уже указывался. Приведём ещё два других следствия.

Если старые законы вытекают из новых, когда силы тяготения слабы, то отклонения от ньютонова закона тяготения можно ожидать только для сравнительно больших сил тяготения. Возьмём нашу солнечную систему. Планеты, и среди них наша Земля, движутся по эллиптическим орбитам вокруг Солнца. Меркурий — планета, наиболее близкая к Солнцу. Притяжение между Солнцем и Меркурием сильнее, чем между Солнцем и любой другой планетой, так как расстояние его от Солнца

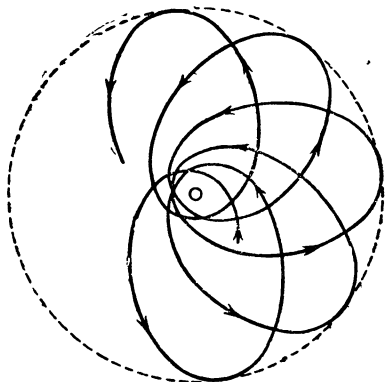


Рис. 63.

меньше. Если имеется какая-либо надежда найти отклонение от закона Ньютона, то наибольший шанс — движение Меркурия. Из классической теории следует, что путь, описываемый Меркурием, того же вида, как и путь любой другой планеты, и отличается лишь тем, что он ближе к Солнцу. Согласно общей теории относительности движение должно немного отличаться. Не только Меркурий должен вращаться вокруг Солнца, но и эллипс, который он описывает, должен очень медленно вращаться относительно системы координат, связанной с Солнцем. Это вращение эллипса выражает новый эффект общей теории относительности. Новая теория предсказывает величину этого эффекта. Эллипс Меркурия осуществлял бы полное вращение в три миллиона лет! Мы видим, как незначителен этот эффект и как безнадежно было бы искать его в отношении планет, обращающихся на более далёком расстоянии от Солнца.

Отклонение орбиты планеты Меркурия от эллиптической было известно прежде, чем была сформулирована

общая теория относительности, но никакого объяснения этому нельзя было найти. С другой стороны, общая теория относительности развивалась без всякого внимания к этим специальным проблемам. Заключение о вращении эллипса при движении планеты вокруг Солнца было сделано позднее из новых гравитационных уравнений. Теория успешно объяснила отклонение действительно происходящего движения Меркурия от движения, предписываемого законом Ньютона.

Но существует ещё одно заключение, которое было сделано из общей теории относительности и сравнено с опытом. Мы уже видим, что ритм часов, помещённых на большой окружности вращающегося диска, отличен от ритма часов, помещённых на меньшем круге. Аналогично, из теории относительности следует, что ритм часов, помещённых на Солнце, отличался бы от ритма часов, помещённых на Земле, так как влияние поля тяготения гораздо сильнее на Солнце, чем на Земле.

Мы заметили на стр. 104, что натрий, когда он раскалён, испускает однородный жёлтый свет определённой длины волны. В этом излучении атом обнаруживает один из своих ритмов; атом представляет собой, так сказать часы, а излучённая длина волны — один из его ритмов. Согласно общей теории относительности длина волны света, излучённого атомом натрия, скажем, помещённого на Солнце, должна быть несколько больше, чем длина волны света, излучённого атомом натрия на нашей Земле.

Проблема проверки следствий общей теории относительности путём наблюдений сложна и точно никоим образом не решена. Поскольку мы интересуемся принципиальными идеями, мы не хотим входить в этот предмет глубже, а только устанавливаем, что пока приговор эксперимента, повидимому, таков: подтвердить выводы, сделанные из общей теории относительности.

Поле и вещество

Мы видели, как и почему механистическая точка зрения потерпела крах. Невозможно было объяснить все явления, предполагая, что между неизменными частицами действуют простые силы. Первые попытки отойти от меха-

нистического взгляда и ввести понятия поля оказались наиболее успешными в области электромагнитных явлений. Были сформулированы структурные законы для электромагнитного поля, связывающие события, смежные в пространстве и во времени. Эти законы соответствуют характеру специальной теории относительности, так как они инвариантны по отношению к преобразованиям Лоренца. Позднее общая теория относительности формулировала законы тяготения. Они опять-таки являются структурными законами, описывающими поле тяготения между материальными частицами. Точно так же легко было обобщить уравнения Максвелла так, чтобы их можно было применить в любой системе координат, аналогично законам тяготения общей теории относительности.

Мы имеем две реальности: *вещество и поле*. Несомненно, что в настоящее время мы не можем представить себе всю физику построенной на понятии вещества, как это делали физики в начале девятнадцатого столетия. В настоящее время мы принимаем оба понятия. Можем ли мы считать вещество и поле двумя различными реальностями? Пусть дана маленькая частица вещества; мы могли бы наивно представить себе, что имеется определённая поверхность частицы, где она перестаёт существовать и появляется её поле тяготения. В нашей картине область, в которой справедливы законы поля, резко отделена от области, в которой находится вещество. Но что является физическим критерием, отличающим вещество и поле? Перед тем, как мы изучили теорию относительности, мы стремились бы ответить на этот вопрос следующим образом: вещество имеет массу, в то время как поле её не имеет. Поле представляет энергию, вещество представляет массу. Но мы уже знаем, что такой ответ недостаточен. Из теории относительности мы знаем, что вещество представляет собою обширные запасы энергии и что энергия представляет вещество. Мы не можем таким путём провести качественное различие между веществом и полем, так как различие между массой и энергией не качественное. Гораздо большая часть энергии сосредоточена в веществе, но поле, окружающее частицу, также представляет собой

энергию, хотя и в несравненно меньшем количестве. Поэтому мы могли бы сказать: вещество — там, где концентрация энергии велика, поле — там, где концентрация энергии мала. Но если это так, то различие между веществом и полем скорее количественное, чем качественное. Нет смысла рассматривать вещество и поле как два качества, совершенно отличных друг от друга. Мы не можем представить себе определённую поверхность, ясно отделяющую поле и вещество.

Те же трудности вырастают для заряда и его поля. Кажется невозможным дать ясный качественный критерий для различения между веществом и полем или зарядом и полем.

Структурные законы, то-есть законы Максвелла, и гравитационные законы нарушаются для очень большой концентрации энергии или, как мы можем сказать, они нарушаются там, где присутствуют источники поля, то-есть электрические заряды или вещество. Но не можем ли мы слегка модифицировать наши уравнения так, чтобы они были справедливы всюду, даже в областях, где энергия колоссально сконцентрирована?

Мы не можем построить физику на основе только одного понятия — вещества. Но деление на вещество и поле, после признания эквивалентности массы и энергии, есть нечто искусственное и неясно определённое. Не можем ли мы отказаться от понятия вещества и построить чистую физику поля? То, что действует на наши чувства в виде вещества, есть на деле огромная концентрация энергии в сравнительно малом пространстве. Мы могли бы рассматривать вещество как такие области в пространстве, где поля чрезвычайно сильны. Таким путём можно было бы создать основы новой философии. Её конечная цель состояла бы в объяснении всех событий в природе структурными законами, справедливыми всегда и всюду. С этой точки зрения брошенный камень есть изменяющееся поле, в котором состояние наибольшей интенсивности поля перемещается в пространстве со скоростью камня. В нашей новой физике не было бы места и для поля, и для вещества одновременно, поскольку единственной реальностью было бы поле. Этот новый взгляд внушён огромными достижениями физики поля, успехом в выражении

законов электричества, магнетизма, тяготения в форме структурных законов и, наконец, эквивалентностью массы и энергии. Нашей основной задачей было бы модифицировать законы поля таким образом, чтобы они не нарушались для областей, в которых энергия имеет колоссальную концентрацию.

Но до сих пор мы не имели успеха в последовательном и убедительном выполнении этой программы. Заключение о том, возможно ли её выполнить — принадлежит будущему. В настоящее время во всех наших существенных теоретических построениях мы должны допускать две реальности: поле и вещество.

Фундаментальные проблемы ещё стоят перед нами. Мы знаем, что всё вещество состоит лишь из частиц нескольких видов. Как различные формы вещества построены из этих элементарных частиц? Как эти элементарные частицы взаимодействуют с полем? Поиски ответа на эти вопросы привели к новым идеям в физике, идеям квантовой теории.

Мы суммируем:

В физике появилось новое понятие, самое важное достижение со времени Ньютона: поле. Потребовалось большое научное воображение, чтобы уяснить себе, что не заряды и не частицы, а поле в пространстве между зарядами и частицами существенно для описания физических явлений. Понятие поля оказывается весьма удачным и приводит к формулированию уравнений Максвелла, описывающих структуру электромагнитного поля, управляющих электрическими, равно как и оптическими явлениями.

Теория относительности возникает из проблемы поля. Противоречия и непоследовательность старых теорий вынуждают нас приписывать новые свойства пространственно-временному континууму, этой арене, на которой разыгрываются все события нашего физического мира.

Теория относительности развивается двумя этапами. Первый этап приводит к так называемой специальной теории относительности, применяемой только к инерциальным системам координат, то-есть к системам, в которых справедлив закон инерции, как он был сформулирован Ньютоном. Специальная теория относительности осно-

выводится на двух фундаментальных положениях: физические законы одинаковы во всех системах координат, движущихся прямолинейно и равномерно друг относительно друга; скорость света всегда имеет одно и то же значение. Из этих положений, полностью подтверждённых экспериментом, выведены свойства движущихся стержней и часов, изменения их длины и ритма, зависящие от скорости. Теория относительности изменяет законы механики. Старые законы несправедливы, если скорость движущейся частицы приближается к скорости света. Новые законы движения тела, сформулированные теорией относительности, блестяще подтверждаются экспериментом. Дальнейшее следствие теории относительности (специальной) есть связь между массой и энергией. Масса — это энергия, а энергия имеет массу. Оба закона сохранения — закон сохранения массы и закон сохранения энергии — объединяются теорией относительности в один закон, в закон сохранения массы-энергии.

Общая теория относительности даёт ещё более глубокий анализ пространственно-временного континуума. Справедливость теории относительности больше не ограничивается инерциальными системами координат. Теория берётся за проблему тяготения и формулирует новые структурные законы для поля тяготения. Она заставляет нас проанализировать роль, которую играет геометрия в описании физического мира. Эквивалентность тяжёлой и инертной массы она рассматривает как существенный, а не просто случайный факт, как им она была в классической механике. Экспериментальные следствия общей теории относительности лишь слегка отличаются от следствий классической механики. Они выдерживают экспериментальную проверку всюду, где возможно сравнение. Но сила теории заключается в её внутренней согласованности и простоте её основных положений.

Теория относительности подчёркивает важность понятия поля в физике. Но нам ещё не удалось сформулировать чистую физику поля. В настоящее время мы должны ещё предполагать существование и поля, и вещества.

IV. КВАНТЫ

Непрерывность, прерывность. — Элементарные кванты вещества и электричества. — Кванты света. — Световые спектры. — Волны вещества. — Волны вероятности. — Физика и реальность.

Непрерывность, прерывность

Перед нами раскрыта карта города Нью-Йорка и окружающей его местности. Мы спрашиваем: какие пункты на этой карте можно достигнуть поездом? Просмотрев эти пункты в железнодорожном расписании, мы отмечаем их на карте. Затем мы изменяем вопрос и спрашиваем: какие пункты можно достигнуть автомобилем? Если мы нарисуем на карте линии, представляющие все дороги, начинающиеся в Нью-Йорке, то каждый пункт, лежащий на этих дорогах, можно достигнуть автомобилем. В обоих случаях мы имеем ряд точек. В первом случае они отделены друг от друга и представляют собой различные железнодорожные станции, а во втором они суть точки вдоль шоссе-ных дорог. Следующий наш вопрос — о расстоянии до каждой из этих точек от Нью-Йорка или, для большей точности, от определённого места в этом городе. В первом случае точкам на карте соответствуют определённые числа. Эти числа изменяются нерегулярно, но всегда на конечную величину, скачком. Мы говорим: расстояния от Нью-Йорка до мест, которые можно достигнуть поездом, изменяются только *прерывно*. Однако, расстояния до мест, которые можно достигнуть автомобилем, могут изменяться как угодно мало, они могут меняться *непрерывно*. Изменение расстояний можно сделать произвольно малыми в случае путешествия автомобилем, а не поездом.

Производство каменноугольных копеек можно изменять непрерывным образом. Количество произведённого угля

можно увеличивать или уменьшать произвольно малыми порциями. Но число работающих углекопов можно изменять только прерывно. Было бы чистой бессмыслицей сказать: «Со вчерашнего дня число работающих увеличилось на 3,783».

Человек, которого спросили о количестве денег в его кармане, может назвать не любую, как угодно малую величину, а лишь величину, содержащую только два десятичных знака. Сумма денег может изменяться только скачками, прерывно. В Америке наименьшее возможное изменение или, как мы будем его называть, «элементарный квант» американских денег, есть один цент. Элементарный квант английских денег есть один фартинг, стоящий только половину американского элементарного кванта. Здесь мы имеем пример двух элементарных квант, величину которых можно сравнивать друг с другом. Отношение их величин имеет определённый смысл, так как стоимость одного из них в два раза превышает стоимость другого.

Мы можем сказать: некоторые количества могут изменяться непрерывно, другие же могут изменяться только прерывно, порциями, которые уже нельзя дальше уменьшать. Эти неделимые порции называются *элементарными квантами* этих величин.

Мы можем взвешивать огромные количества песка и считать его массу непрерывной, хотя его зернистая структура очевидна. Но если бы песок стал очень драгоценным, а употребляемые весы очень чувствительными, мы должны были бы признать факт, что масса песка всегда изменяется на величину, кратную массе одной наименьшей частицы. Масса этой наименьшей частицы была бы нашим элементарным квантом. Из этого примера мы видим, как прерывный характер величины, до тех пор считавшейся непрерывной, обнаруживается благодаря увеличению точности наших измерений.

Если бы мы должны были характеризовать основные идеи квантовой теории в одном предложении, мы могли бы сказать: *следует предположить, что некоторые физические величины, до тех пор считавшиеся непрерывными, состоят из элементарных квантов.*

Область фактов, охватываемых квантовой теорией, чрезвычайно велика. Эти факты открыты благодаря высокому развитию техники современного эксперимента. Так как мы не можем ни показать, ни описать даже основные эксперименты, мы часто должны будем приводить их результаты догматически. Наша цель — объяснить лишь принципиальные, основные идеи.

Элементарные кванты вещества и электричества

В картине строения вещества, нарисованной кинетической теорией, все элементы построены из молекул. Возьмём простейший пример наиболее лёгкого элемента — водорода. Мы видели (см. стр. 77), как изучение броуновского движения привело к определению массы молекулы водорода. Она равна 0,000 000 000 000 000 000 000 003 3 грамма.

Это означает, что масса прерывна. Масса взятой порции водорода может изменяться лишь на целое число наименьших порций, каждая из которых соответствует массе одной молекулы водорода. Но химические процессы показали, что молекула водорода может быть разбита на две части или, другими словами, что молекула водорода состоит из двух атомов. В химическом процессе роль элементарного кванта играет атом, а не молекула. Деля вышесказанное число на два, мы находим массу атома водорода; она равна приблизительно

0,000 000 000 000 000 000 000 0017 грамма.

Масса является величиной прерывной. Но, конечно, нам не следует беспокоиться об этом при обычном определении веса тела. Даже наиболее чувствительные весы далеки от достижения такой степени точности, которая позволяла бы обнаружить прерывное изменение массы тела.

Но вернёмся к хорошо известному факту. Проводник связан с источником тока. Ток течёт по проводнику от высшего потенциала к низшему. Мы помним, что многие экспериментальные факты были объяснены простой теорией электрических жидкостей, текущих по проводнику. Мы помним также (стр. 87), что вопрос о том, положительная ли жидкость течёт от высшего потенциала к низшему или же отрицательная жидкость течёт от низшего потен-

циала к высшему, был делом только соглашения. Пренебрежём временно всем последующим прогрессом, вытекающим из понятия поля. Даже если мы будем рассуждать в рамках простой терминологии теории электрических жидкостей, всё ещё остаётся ряд вопросов, требующих разрешения. Как указывает само название «жидкость», электричество в прежнее время рассматривалось как непрерывная величина. Согласно этим старым взглядам величина заряда могла изменяться произвольно малыми частями. Не было необходимости предполагать наличие элементарных электрических квантов. Достижения кинетической теории материи подготовили нас к новому вопросу: существуют ли элементарные кванты электрических жидкостей? Следующий вопрос, который следует поставить, это вопрос о том, состоит ли электрический ток из потока положительных или отрицательных жидкостей или же он представляет собой поток тех и других?

Идея всех экспериментов, которые должны дать ответ на эти вопросы, состоит в том, чтобы выделить электрическую жидкость из проводника, заставить её проходить через пустое пространство, лишить её какой-либо связи с веществом, а затем исследовать её свойства, которые при этих условиях должны обнаруживаться яснее.

Многие эксперименты этого рода были осуществлены в конце девятнадцатого столетия. Прежде, чем объяснить идею экспериментальной техники, по крайней мере в одном случае, мы приведём конечные результаты. Электрическая жидкость, текущая через проводник, отрицательна, и стало-быть, направление её движения—от низшего потенциала к высшему. Если бы это было известно с самого начала, когда впервые была создана теория электрических жидкостей, мы, конечно, переменили бы термины и назвали бы электричество каучуковой палочки положительным, а электричество стеклянной палочки отрицательным. В таком случае было бы удобнее жидкость, текущую по проводнику, считать положительной. Но так как наше первоначальное предположение было ошибочным, то теперь мы должны нести бремя неудобной терминологии.

Следующий важный вопрос: является ли структура этой отрицательной жидкости «зернистой» или иначе: не

состоит ли она из электрических квантов? И снова множество независимых друг от друга экспериментов показывают, что нет никакого сомнения в существовании элементарных квантов этого отрицательного электричества. Отрицательная электрическая жидкость состоит из зёрен, подобно тому как пляж состоит из отдельных песчинок или как дом построен из отдельных кирпичей. Этот результат наиболее ясно был сформулирован Дж. Дж. Томсоном около сорока лет назад. Элементарные кванты отрицательного электричества называются *электронами*. Каждый отрицательный электрический заряд состоит из множества элементарных зарядов—электронов. Отрицательный заряд, как и масса, может быть только прерывным. Однако, элементарный электрический заряд настолько мал, что во многих исследованиях одинаково возможно, а иногда даже и более удобно, считать электрический заряд вообще за непрерывную величину. Таким образом, атомная и электронная теории вводят в науку прерывные физические величины, которые могут изменяться только скачками.

Представим себе две металлические пластинки, вокруг которых весь воздух удалён. Одна пластинка заряжена положительно, другая — отрицательно. Пробный положительный заряд, помещённый между двумя пластинками, будет отталкиваться положительно заряженной пластинкой и притягиваться отрицательно заряженной. Таким образом, силовые линии будут направлены от положительно заряженной пластинки к отрицательно заряженной. Сила, действующая на отрицательно заряженное пробное тело, имела бы противоположное направление. Если пластинки достаточно велики, силовые линии между ними будут расположены повсюду одинаково плотно. Независимо от того, где помещается пробное тело, сила, а стало быть, и плотность силовых линий будут одинаковыми. Электроны помещённые где-либо между пластинками, вели бы себя подобно дождевым каплям в поле тя-

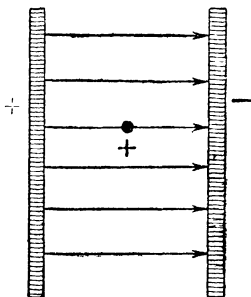


Рис. 70.

готения Земли, двигаясь параллельно друг другу от отрицательно заряженной пластинки к положительно заряженной. Существует много известных экспериментальных способов для создания ливня электронов в таком поле, которое всех их направляет в одну сторону. Один из наиболее простых способов это — поместить раскалённую проволоку между заряженными пластинками. Такая раскалённая проволока испускает электроны, которые затем направляются силовыми линиями внешнего поля. На этом принципе построены, например, всем известные катодные лампы.

С пучком электронов произведено много очень остроумных экспериментов. Исследовано изменение их траектории в различных электрических и магнитных внешних полях. Был даже изолирован отдельный электрон и определены его заряд и масса, то-есть его инерциальное сопротивление действию внешней силы. Здесь мы укажем только на величину массы электрона. Оказалось, что она примерно в две тысячи раз меньше, чем масса атома водорода. Таким образом, масса атома водорода, как она ни мала, оказывается большей в сравнении с массой электрона. С точки зрения последовательной теории поля вся масса электрона, то-есть вся его энергия, есть энергия его поля; большая часть энергии поля сосредоточена внутри очень небольшой сферы, а дальше от «центра» электрона поле весьма мало.

Мы говорили раньше, что атом какого-либо элемента является его наименьшим элементарным квантом. В этом были убеждены очень долгое время. Однако, теперь так уже не думают! Наука создала новый взгляд, показывающий пределы старого. Едва ли какое-либо утверждение в физике более твёрдо обосновано фактами, чем утверждение о сложной структуре атомов. Сначала пришло подтверждение, что электрон — элементарный квант отрицательной электрической жидкости — есть также один из составных элементов атома, один из элементарных кирпичей, из которых построено всё вещество. Указанный раньше пример с раскалённой проволокой, испускающей электроны, есть только один из бесчисленных примеров извлечения этих частиц из вещества. Этот результат,

тесно связывающий проблему структуры вещества с электричеством, вытекает, вне всякого сомнения, из очень многих независимых экспериментальных фактов.

Извлечь из атома электроны, которые в нём находятся, сравнительно легко. Это можно сделать нагреванием, как в нашем примере с раскалённой проволокой, или другим путём, например бомбардировкой данных атомов другими электронами.

Представим себе, что тонкая, докрасна раскалённая металлическая проволока помещена в разреженный водород. Проволока будет испускать электроны во всех направлениях. Действием внешнего электрического поля им будет сообщена определённая скорость. Электрон увеличивает свою скорость подобно камню, падающему в поле тяготения. Этим методом можно получить пучок электронов, движущихся в определённом направлении с определённой скоростью. Подвергая электроны действию очень сильных полей, мы можем в наше время достигнуть скоростей, сравнимых со скоростью света. Что же случится, если пучок электронов с определённой скоростью ударится о молекулы разреженного водорода? Удар достаточно быстрого электрона не только разобьёт молекулу водорода на два её атома, но и вырвет электрон из одного из этих атомов.

Примем как факт, что электроны суть составные части вещества. В таком случае атом, из которого выбит электрон, не может быть электрически нейтральным. Если он раньше был нейтральным, то он не может быть нейтральным теперь, так как он стал беднее одним элементарным зарядом. То, что осталось, должно иметь положительный заряд. Более того, так как масса электрона гораздо меньше массы легчайшего атома, мы с уверенностью можем заключить, что гораздо бóльшая часть массы атома представлена не электронами, а остающимися элементарными частицами, значительно более тяжёлыми, чем электроны. Мы называем эту тяжёлую часть атома его *ядром*.

Современная экспериментальная физика разработала методы разбиения атомных ядер, превращения атомов одного элемента в атомы другого и вырывания из ядер тяжёлых элементарных частиц, из которых они состоят. Этот

раздел физики, известный под названием «физики ядра», развитию которой много содействовал Резерфорд, с экспериментальной точки зрения является наиболее интересным. Но в настоящее время всё ещё нет простой по своим основным идеям теории, которая объединяла бы богатое разнообразие фактов в области ядерной физики. Так как в этой книге мы интересуемся только общими идеями физики, мы опустим этот раздел, несмотря на его огромную важность в современной физике.

Кванты света

Рассмотрим стену, построенную вдоль морского берега. Морские волны непрерывно ударяются о стену, каждый раз что-то смывая с её поверхности, и отступают, предоставляя свободный путь для приходящих волн. Масса стены уменьшается, и мы можем спросить, как велика часть, смытая, скажем, за год. А теперь нарисуем другой процесс. Мы хотим уменьшить массу стены на то же самое количество, как и раньше, но другим путём. Мы стреляем в стену, разбивая её в тех местах, куда попадают пули. Масса стены будет уменьшаться, и мы легко можем представить себе, что в обоих случаях достигается одно и то же уменьшение массы. Но по виду стены мы легко могли бы обнаружить, действсвали ли на стену непрерывные морские волны или прерывный ливень пуль. Для понимания явлений, которые мы здесь описываем, полезно учесть это различие между морскими волнами и ливнем пуль.

Мы указывали раньше, что раскалённая проволока испускает электроны. Здесь мы введём другой путь выбивания электронов из металла. Пусть на металлическую поверхность падает однородный свет, например фиолетовый, имеющий, как мы знаем, определённую длину волны. Свет выбивает из металла электроны. Электроны вырываются из металла и ливень их устремляется вперёд с определённой скоростью. Основываясь на законе сохранения энергии, мы можем сказать: энергия света частично превращается в кинетическую энергию вырванных электронов. Современная экспериментальная техника позволяет нам подсчитать число этих электронов-снарядов,

определить их скорость, а стало-быть, их энергию. Это вырывание электронов падающим на металл светом называется *фотоэлектрическим эффектом*.

Мы рассматриваем действие однородной световой волны с некоторой определённой интенсивностью. Как и в каждом эксперименте, мы должны теперь изменять условия эксперимента, чтобы посмотреть, будет ли это иметь какое-либо влияние на рассматриваемый эффект.

Начнём с изменения интенсивности однородного фиолетового света, падающего на металлическую пластинку, и заметим, в какой степени энергия испускаемых электронов зависит от интенсивности света. Попробуем найти ответ с помощью рассуждения, а не эксперимента. Мы могли бы рассуждать так: в фотоэлектрическом эффекте известная определённая порция энергии излучения превращается в энергию движения электронов. Если бы мы снова осветили металл светом той же длины волны, но более мощного источника, то энергия испускаемых электронов должна быть больше, так как излучение богаче энергией. Поэтому мы должны ожидать, что скорость испускаемых электронов возрастет, если возрастет интенсивность света. Но эксперимент противоречит нашему предсказанию. Мы ещё раз видим, что законы природы не таковы, какими мы хотели бы их видеть. Мы столкнулись с одним из экспериментов, который противоречит нашим предсказаниям и тем самым разбивает теорию, на которой они основывались. Действительно, с точки зрения волновой теории результат эксперимента удивителен. Все наблюдаемые электроны имеют одинаковую скорость, одинаковую энергию, которая не изменяется при возрастании интенсивности света.

Волновая теория не могла предсказать результат эксперимента. Здесь опять новая теория возникает из конфликта старой теории с экспериментом.

Будем намеренно несправедливы к волновой теории свега, забывая её великие достижения, её блестящее объяснение изгибания луча около весьма малых препятствий (диффракция света). Сосредоточив внимание на фотоэлектрическом эффекте, потребуем от волновой теории соответствующего объяснения его. Очевидно, что из волновой

теории мы не можем вывести независимость энергии электронов от интенсивности света, которым они извлекаются из металлической пластинки. Поэтому мы испробуем другую теорию. Вспомним, что корпускулярная теория Ньютона, объясняя многие наблюдаемые явления, обанкротилась при объяснении дифракции света — явления, которым мы сейчас намеренно пренебрегаем. Во времена Ньютона понятия энергии не существовало. По Ньютону световые корпускулы были невесомы. Каждый цвет сохранял свой собственный субстанциональный характер. Позднее, когда было создано понятие энергии и признано, что свет несёт энергию, никто не думал применять эти понятия к корпускулярной теории света. Теория Ньютона умерла и до нашего века о её возрождении никто серьёзно не помышлял.

Чтобы сохранить принципиальную идею теории Ньютона, мы должны предположить, что однородный свет состоит из зёрен энергии, и заменить старые световые корпускулы световыми квантами, то-есть небольшими порциями энергии, несущимися в пустом пространстве со скоростью света. Мы будем называть эти световые кванты *фотонами*. Возрождение теории Ньютона в этой новой форме приводит к *квантовой теории света*. Не только вещество и электрический заряд, но и энергия излучения имеет зернистую структуру, то-есть состоит из световых квантов. Наряду с квантами вещества и квантами электричества существуют так же и кванты энергии.

Идея световых квантов была впервые высказана Планком в начале этого столетия для того, чтобы объяснить некоторые эффекты гораздо более сложного характера, чем фотоэлектрический. Но фотоэффект яснее и проще показывает необходимость изменения наших старых понятий.

Сразу ясно, что квантовая теория света даёт объяснение фотоэлектрическому эффекту. Поток фотонов падает на металлическую пластинку. Взаимодействие между излучением и веществом состоит здесь из очень многих элементарных процессов, в которых фотон ударяется об атом и выбивает из него электрон. Эти элементарные про-

цессы подобны друг другу, и вырванный электрон будет в каждом случае иметь одинаковую энергию. Нам становится понятным, что увеличение интенсивности света на нашем новом языке означает увеличение числа падающих фотонов. В этом случае из металлической пластинки было бы вырвано большее число электронов, но энергия каждого отдельного электрона не изменилась бы. Итак, мы видим, что эта теория находится в полном согласии с результатами наблюдения.

Что произойдёт, если пучок однородного света другого цвета, скажем красного вместо фиолетового, упадёт на металлическую поверхность? Предоставим эксперименту ответить на этот вопрос. Энергию испускаемых электронов можно измерить и сравнить с энергией электронов, выбиваемых фиолетовым светом. Энергия электронов, выбиваемая красным светом, оказывается меньшей, чем энергия электронов, вырываемых фиолетовым светом. Это означает, что энергия световых квантов различна для лучей различных цветов. Энергия фотонов красного луча вдвое меньше энергии фотонов фиолетового луча. Или, более строго: энергия светового кванта однородного луча уменьшается пропорционально увеличению длины волны. Это — существенное различие между квантом энергии и квантом электричества. Световые кванты различны для каждой длины волны, между тем как кванты электричества одинаковы. Если бы мы захотели применить одну из наших прежних аналогий, мы сравнили бы световой квант с наименьшим квантом денег, который для каждой страны различен.

Продолжим критику волновой теории света и предположим, что структура света зерниста и образована световыми квантами, то-есть фотонами, проносящимися через пространство со скоростью света. Таким образом, в нашей новой картине свет есть ливень фотонов, а фотон есть элементарный квант световой энергии. Однако, если волновая теория отброшена, понятие длины волны исчезнет. Какое новое понятие занимает его место? Энергия световых квантов! Утверждения, выраженные в терминологии волновой теории, можно перевести в утверждения квантовой теории излучения. Например:

Терминология волновой теории

Однородный свет имеет определённую длину волны. Длина волны красного конца спектра вдвое больше длины волны фиолетового конца.

Терминология квантовой теории

Однородный свет состоит из фотонов определённой энергии. Энергия фотона для луча красного конца спектра вдвое меньше энергии фотона фиолетового луча.

Положение в физике можно подытожить следующим образом: существуют явления, которые можно объяснить только квантовой теорией, а не волновой. Примером такого явления служит фотоэффект. Существуют явления, которые можно объяснить только волновой теорией, а не квантовой. Типичным примером является дифракция света. Наконец, существуют явления, которые можно объяснить как квантовой, так и волновой теориями света, например, прямолинейность распространения света.

Но что такое свет в действительности? Волна или ливень фотонов? Мы уже задавали раньше аналогичный вопрос: что такое свет — волна или ливень световых корпускул? В то время было полное основание отбросить корпускулярную теорию и принять волновую, объяснявшую все явления. Однако, теперь проблема гораздо сложнее. Повидимому, нет никаких шансов последовательно описать световые явления, выбрав только какую-либо одну из двух возможных теорий. Положение таково, что мы должны применять иногда одну теорию, а иногда другую, а время от времени и ту и другую. Мы встретились с трудностью нового рода. Налицо две противоречивые картины реальности, но ни одна из них в отдельности не объясняет всех световых явлений, а совместно они их объясняют!

Как возможно соединить обе эти картины? Как понять обе эти совершенно различные стороны света? Не легко объяснить эту новую трудность. Опять мы встречаемся с фундаментальными проблемами.

Примем сейчас фотонную теорию света и постараемся с её помощью понять факты, до сих пор объяснявшиеся вол-

новой теорией. Этим самым мы подчеркнём трудности, которые на первый взгляд делают обе теории несовместимыми.

Как мы помним, луч однородного света, проходящий через маленькое отверстие, образует светлые и тёмные кольца (стр. 116). Как понять это явление с точки зрения квантовой теории света? Пусть фотон проходит через отверстие. Мы могли бы ожидать, что экран должен оказаться светлым, если фотон проходит сквозь отверстие, и тёмным, если он не проходит. Вместо этого мы обнаруживаем светлые и тёмные кольца. Мы могли бы попробовать рассуждать следующим образом: возможно, что между краем отверстия и фотоном существует некоторое взаимодействие, которое и служит причиной появления диффракционных колец. Конечно, это положение только с трудом можно признать за объяснение. В лучшем случае оно намечает программу объяснения, создавая по крайней мере некоторую надежду объяснения диффракции в будущем через взаимодействие вещества и фотонов.

Но даже эта слабая надежда разбивается другими экспериментальными фактами. Возьмём два маленьких отверстия. Однородный свет, проходя через оба отверстия, образует на экране светлые и тёмные полосы. Как следует понимать этот эффект с точки зрения квантовой теории света? Мы могли бы рассуждать так: фотон проходит сквозь какое-либо одно из отверстий. Если фотон однородного света представляет собой элементарную световую частицу, мы с трудом представляем себе, как он может разделиться и пройти сквозь оба отверстия. Но в таком случае эффект должен бы быть совершенно таким же, как и в первом случае; светлые и тёмные кольца, а не светлые и тёмные полосы. Почему же наличие второго отверстия совершенно изменяет эффект? Очевидно, отверстие, сквозь которое фотон не проходит, даже если оно находится на большом расстоянии от другого, изменяет кольца в полосы. Если фотон ведёт себя подобно корпускуле в классической физике, он может пройти только через одно из обоих отверстий. Но в этом случае явления диффракции кажутся совершенно непонятными.

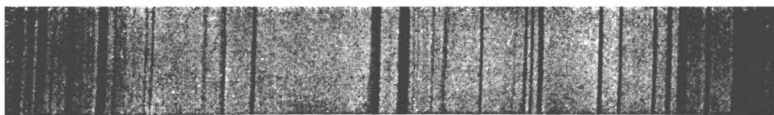
Наука вынуждает нас создавать новые понятия, новые теории. Их задача — разрушить стену противоречий,

которая часто преграждает дорогу научному прогрессу. Все существенные идеи в науке родились в драматическом конфликте между реальностью и нашими попытками её понять. Здесь мы снова имеем дело с проблемой, для решения которой нужны новые принципы. Прежде чем мы рассмотрим попытки современной физики объяснить противоречие между квантовым и волновым аспектом света, мы покажем, что те же самые трудности возникают и в том случае, когда мы имеем дело с квантами вещества, вместо квантов света.

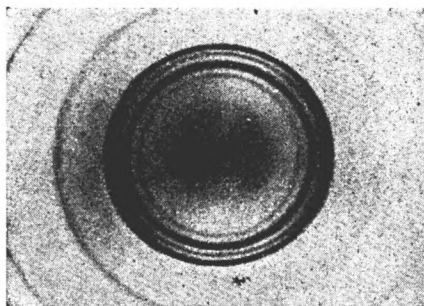
Световые спектры

Мы уже знаем, что всё вещество состоит из частиц, число разновидностей которых невелико. Электроны были теми элементарными частицами вещества, которые были открыты первыми. Но электроны являются так же и элементарными квантами отрицательного электричества. Кроме того, мы узнали, что некоторые явления вынуждают нас предположить, что и свет состоит из элементарных световых квантов, различных для лучей с различной длиной волны. Прежде чем идти дальше, мы должны рассмотреть некоторые физические явления, в которых наряду с излучением существенную роль играет вещество.

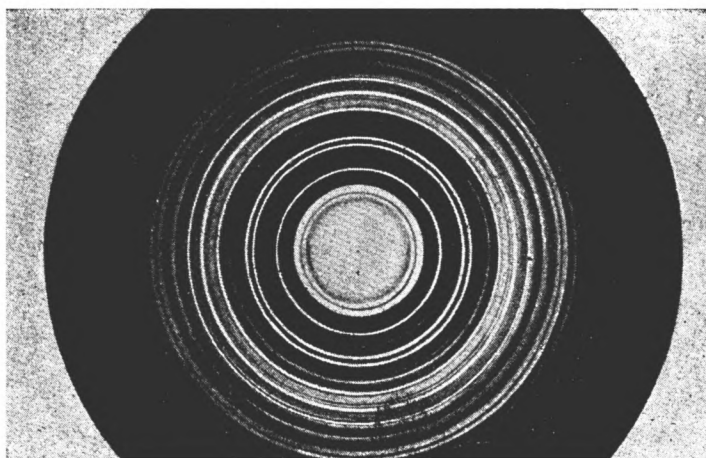
Солнце испускает излучение, которое можно с помощью призмы разложить на составные части. Таким образом, можно получить непрерывный спектр Солнца. Между обоими концами видимого спектра представлена любая из промежуточных длин волн. Возьмём другой пример. Раньше уже было упомянуто, что раскалённый натрий испускает однородный свет, свет одного цвета или одной длины волны. Если раскалённый натрий поместить перед призмой, то мы увидим только одну жёлтую линию. Вообще же, если излучающее тело поместить перед призмой, то свет, который оно испускает, разбивается на его составные части и даёт спектр, характерный лишь для данного излучающего тела. Разряд электричества в трубке, наполненной газом, создаёт источник света, подобный тому, какой мы видим в неоновых трубках, употребляемых для световых реклам. Представим себе, что такая трубка помещена перед спектроскопом.



а) Спектральные линии. (Сфотографировано А. Шенстоном.



б) Диффракция рентгеновских лучей. (Сфотографировано Ластовьевским и Грегор.)



с) Диффракция электронных волн. (Сфотографировано Лория и Клиндгер.)

Спектроскоп — это прибор, который действует аналогично призме, но с гораздо большей точностью и чувствительностью; он разбивает свет на его компоненты (составные лучи), то-есть он анализирует свет. Солнечный свет, видимый в спектроскопе, даёт непрерывный спектр; в нём представлены все длины волн. Однако, если источником света является газ, сквозь который проходит электрический ток, характер спектра будет другой. Вместо непрерывного, многоцветного изображения солнечного спектра на непрерывном тёмном фоне появляются отдельные широкие полосы. Каждая полоса, если она достаточно узка, соответствует определённому цвету или, говоря языком волновой теории, определённой длине волны. Например, если в спектре видны двадцать линий, то каждая из них будет обозначаться одним из двадцати чисел, выражающих соответствующие длины волн. Пары различных элементов обладают различными системами линий и, стало-быть, различными комбинациями чисел, обозначающих длины волн, из которых состоит излучаемый спектр. Не существует двух таких элементов, которые имели бы идентичные системы полос в характеризующих их спектрах, так же как не существует двух таких людей, у которых были бы совершенно идентичные отпечатки пальцев. По мере того, как физики составляли каталог этих линий, постепенно становилось очевидным наличие законов и стало возможным столбики на вид не связанных между собой чисел, выражающих длины волн, связать единой простой математической формулой.

Всё только что сказанное можно перевести на язык фотонов. Полосы соответствуют определённой длине волны или, другими словами, фотонам с определённой энергией. Следовательно, светящийся газ испускает фотоны, энергия которых является не какой угодно, а лишь характерной для данного вещества. Действительность опять ограничивает изобилие возможностей.

Атом данного элемента, скажем, водорода, может испускать только фотоны с определённой энергией. Возможно испускание лишь квантов с определённой энергией, испускание же всех других квантов запрещено. Представим себе, простоты ради, что некоторый элемент испускает

только одну линию, то-есть фотоны с совершенно определённой энергией. Атом богаче энергией перед излучением и беднее после. Из принципа сохранения энергии следует, что *уровень энергии* атома выше перед излучением и ниже после и что разность между обоими уровнями должна быть равной энергии излучённого фотона. Таким образом, тот факт, что атом определённого элемента испускает излучение лишь одной длины волны, то-есть фотоны лишь определённой энергии, можно выразить ещё иначе: в атоме этого элемента возможны лишь два уровня энергии, и излучение фотона соответствует переходу атома с высшего уровня энергии на низший.

Но, как правило, в спектрах элементов оказывается линий больше, чем одна. Излучённые фотоны соответствуют многим количествам энергии, а не только одной. Или, другими словами, мы должны предположить, что в атоме допустимы многие уровни энергии и что испускание фотона соответствует переходу атома с более высокого уровня энергии на более низкий. Но существенно то, что не каждый уровень энергии дозволен, так как в спектре элемента оказывается не любая длина волны, не любой фотон какой угодно энергии. Вместо того, чтобы сказать, что спектру каждого атома принадлежат некоторые определённые линии, некоторые определённые длины волн, мы можем сказать, что каждый атом имеет некоторые определённые энергетические уровни и что испускание светового кванта связано с переходом атома от одного энергетического уровня к другому. Как правило, энергетические уровни не непрерывны, а дискретны. Мы снова видим, что возможности ограничены действительностью.

Бор был первым, кто показал, почему именно эти, а не другие линии оказываются в спектрах. Его теория, формулированная двадцать пять лет назад, нарисовала картину строения атома, из которой, по крайней мере в простых случаях, можно рассчитать спектры элементов, и по виду несвязанные скучные числа внезапно в свете теории сделать связанными.

Теория Бора явилась промежуточной ступенью на пути к более глубокой и более общей теории, названной волновой или квантовой механикой. Мы хотим в послед-

них страницах охарактеризовать принципиальные идеи этой теории. Прежде чем это сделать, мы должны ещё напомнить теоретический и экспериментальный результат более специального характера.

Наш видимый спектр начинается с фиолетового цвета, соответствующего определённой длине волны, и кончается красным цветом, который также соответствует определённой длине волны. Или, другими словами, энергия фотонов видимого спектра всегда заключена внутри пределов, образованных энергиями фотонов фиолетового и красного света. Это ограничение есть, конечно, только свойство человеческих глаз. Если разность между какими-либо энергетическими уровнями достаточно велика, то испускаться будет фотон *ультрафиолетового света*, давая линию за видимым спектром. Её наличие нельзя обнаружить невооружённым глазом; необходимо применить фотографическую пластинку.

Рентгеновские лучи тоже состоят из фотонов гораздо большей энергии, чем фотоны видимого света, или, другими словами,

длина волны рентгеновских лучей гораздо меньше. Она в тысячи раз меньше, чем длина волны видимых лучей.

Но возможно ли определить экспериментально столь малую длину волны? Это довольно трудно было сделать даже для обычного света. Мы должны были иметь малые препятствия или малые отверстия. Два булавочных отверстия, дающие дифракцию обычного света, очень близко расположены друг к другу; они должны быть в тысячи раз меньше и в тысячи раз плотнее расположены друг к другу, чтобы дать дифракцию рентгеновских лучей.

Как в таком случае можем мы измерить длину волны этих лучей? Сама природа приходит нам на помощь.

Кристалл есть конгломерат атомов, расположенных

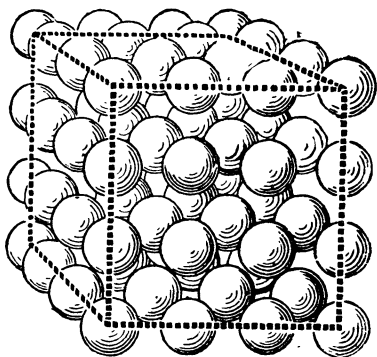


Рис. 71.

совершенно правильным образом на очень близких расстояниях друг от друга. Рисунок 71 показывает простую модель структуры кристалла. Вместо мелких отверстий здесь имеются крайне малые препятствия, образованные атомами элемента, расположенными очень тесно друг к другу и в абсолютно правильном порядке. Расстояния между атомами, как это найдено теорией структуры кристаллов, так малы, что можно было ожидать получения эффекта дифракции рентгеновских лучей. Эксперимент подтвердил, что и в самом деле возможно получить дифракцию рентгеновских лучей с помощью этих тесно упакованных препятствий, расположенных в правильной трёхмерной решётке, встречающейся в кристалле.

Предположим, что пучок рентгеновских лучей падает на кристалл, а затем, пройдя сквозь него, регистрируется на фотографической пластинке. На пластинке в таком случае обнаруживается дифракционная картина. Чтобы изучить спектры рентгеновских лучей, чтобы из дифракционной картины вывести определённые заключения о длине волны, применялись различные методы. То, что здесь мы рассказали в нескольких словах, заполнило бы целые тома, если бы были изложены все теоретические и экспериментальные подробности. На вклейке III в конце книги мы даём только одну дифракционную картину, полученную одним из разнообразных методов. Мы снова видим тёмные и светлые кольца, столь характерные для волновой теории. В центре видим след недиффрагированного луча. Если бы между источником рентгеновских лучей и фотографической пластинкой не был помещён кристалл, то кроме этого следа на пластинке ничего не было бы видно. Из такого рода фотографий можно подсчитать длины волн рентгеновских спектров, а с другой стороны, если длина волны известна, можно сделать заключение о структуре кристалла.

Волны вещества

Как истолковать тот факт, что в спектрах элементов оказываются лишь определённые характерные длины волн?

В физике часто случалось, что существенный успех был достигнут проведением последовательной аналогии

между несвязанными по виду явлениями. В этой книге мы часто видели, как идеи, созданные и развитые в одной ветви науки, были впоследствии успешно применены в другой.

Развитие механистических взглядов и теории поля даёт много примеров этого рода. Связывание разрешённых проблем с проблемами неразрешёнными, внушая новые



Рис. 72.

идеи, может пролить новый свет на наши трудности. Легко найти поверхностную аналогию, которая в действительности ничего не выражает. Но вскрыть некоторые общие существенные черты, скрытые под поверхностностью внешних различий, создать на этой базе новую преуспевающую теорию, это важная созидательная работа. Развитие так называемой волновой механики, которое началось с работ де-Бройля и Шредингера около пятнадцати лет тому назад, является типичным примером достижений прогрессирующей теории, полученной путём глубоких и удачных аналогий.

Наш исходный пункт — это классический пример, ничего общего не имеющий с современной физикой. Возьмём в руки конец очень длинной гибкой резиновой трубки или пружины и будем двигать его ритмично вверх и вниз так, чтобы конец колебался. Тогда, как мы видели из многих примеров, колебанием создаётся волна, распространяющаяся по трубке с определённой скоростью. Если мы представим себе бесконечно длинную трубку, то группы волн, однажды отправленные, будут следовать в своём бесконечном путешествии без интерференции.

Возьмём другой пример. Оба конца той же самой трубки закреплены. Если угодно, можно использовать скрипичную струну. Что происходит теперь, когда на одном конце резиновой трубки или струны создаётся волна? Волна, как и в предыдущем случае, начнёт своё путешествие, но она скоро отразится от другого конца трубки. Теперь мы имеем две волны: одну, созданную колебанием, и другую, создан-

ную отражением; они движутся в противоположных направлениях и интерферируют друг с другом. Нетрудно было бы проследить интерференцию обеих волн и определить характер волны, образующейся из их сложения; она

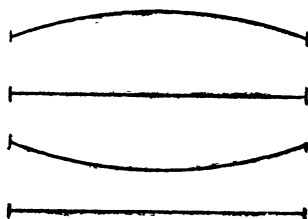


Рис. 73.

называется *стоячей волной*. Оба слова «стоячая» и «волна» кажутся противоречащими друг другу; тем не менее их комбинация оправдывается результатом наложения обеих волн.

Простейшим примером стоячей волны является движение струны с двумя закреплёнными концами,

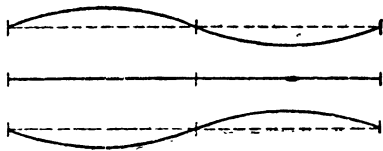


Рис. 74.

вверх и вниз, как показано на рисунке 73. Это движение есть результат того, что одна волна накладывается на другую, когда обе они проходят в различных на-

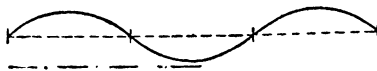


Рис. 75.

правлениях. Характерная черта этого движения состоит в том, что в покое остаются только две конечные точки. Они называются *узлами*. Волна, так сказать, устанавливается между двумя узлами, все точки струны одновре-

менно достигают максимума и минимума своих отклонений.

Но это только простейший вид стоячих волн. Существуют и другие. Например, стоячая волна может иметь и три узла, — по одному на каждом конце и один в середине. В этом случае в покое всегда остаются три точки. Из рисунка 74 сразу же видно, что здесь длина волны вдвое меньше длины волны в примере с двумя узлами. Короче, — стоячие волны могут иметь четыре, пять и более узлов. Это число может быть только целым и может изменяться только скачками. Предложение вроде «число узлов в стоячей волне равно 3,576» есть чистая бессмыслица. Таким образом, длина волны может изменяться только дискретно. Здесь, в этой классической проблеме, мы узнаём знакомые черты квантовой теории. Стоячая волна, созданная скрипачом, фактически ещё более сложна, будучи смесью очень многих волн с двумя, тремя, четырьмя, пятью и более узлами, а стало-быть, смесью различных длин волн. Физика может разложить такую смесь на простые стоячие волны, из которых она составлена. Или, употребляя нашу прежнюю терминологию, мы можем сказать, что колеблющаяся струна имеет свой спектр, так же как и элемент, испускающий излучение. И так же, как и в случае спектра элемента, здесь разрешены лишь известные длины волн, все же другие недопустимы.

Таким образом, мы открыли некоторое подобие между колебанием струны и атомом, испускающим излучение. Странно, как может иметь место эта аналогия, но сделаем дальнейшее заключение из неё и попробуем продолжить сравнение, раз уж мы начали его.

Атом каждого элемента состоит из элементарных частиц: из тяжёлых, составляющих ядро, и из лёгких — электронов. Такая система частиц ведёт себя подобно маленькому акустическому инструменту, в котором производятся стоячие волны.

Однако, стоячая волна является результатом интерференции двух или более движущихся волн. Если в нашей аналогии есть некоторая доля правды, то распространяющаяся волне должна соответствовать более про-

стая структура, чем структура атома. Что же имеет наиболее простую структуру? В нашем материальном мире ничто не может быть более простым, чем электрон, элементарная частица, на которую не действуют никакие силы, то-есть электрон, покоящийся или находящийся в прямолинейном и равномерном движении. Мы могли бы прибавить новое звено в цепи нашей аналогии: движущийся прямолинейно и равномерно электрон \rightarrow волны определённой длины. Это было новой и смелой идеей де-Бройля.

Раньше было показано, что имеются как явления, в которых свет обнаруживает свой волновой характер, так и явления, в которых свет обнаруживает свой корпускулярный характер. Уже привыкнув к мысли, что свет есть волна, мы к своему удивлению обнаружили, что в некоторых случаях, например в фотоэлектрическом эффекте, свет ведёт себя, как ливень фотонов. Для электронов мы имеем теперь как раз обратное положение. Мы приучили себя к мысли, что электроны — это частицы, элементарные кванты электричества и вещества. Были найдены их заряд и масса. Но если в идее де-Бройля есть какая-либо правда, то должны быть такие явления, в которых вещество обнаруживает свой волновой характер. Этот вывод, полученный благодаря тому, что мы следовали акустической аналогии, кажется вначале странным и непонятным. Как может движущаяся корпускула иметь что-то общее с волной? Но такого рода трудности мы встречали в физике не раз. Те же проблемы мы встречали и в области световых явлений.

В создании физической теории существенную роль играют фундаментальные идеи. Физические книги полны сложных математических формул. Но началом физической теории являются мысли и идеи, а не формулы. Идеи должны позднее принять математическую форму количественной теории, сделать возможным сравнение с экспериментом. Это можно объяснить на примере той проблемы, с которой мы теперь имеем дело. Главная догадка состоит в том, что равномерно движущийся электрон будет вести себя в некоторых явлениях аналогично

волне. Предположим, что электрон или ливень электронов — при условии, что все они имеют одинаковую скорость, — движется равномерно. Масса, заряд и скорость каждого индивидуального электрона известны. Если мы хотим каким-нибудь образом связать понятие волны с равномерно движущимся электроном или электронами, то мы должны поставить следующий вопрос: а что такое длина волны? Это вопрос количественный, и более или менее количественная теория должна быть построена так, чтобы на него ответить. На самом деле это простой вопрос. Математическая простота работы де-Бройля, дающей ответ на этот вопрос, наиболее удивительна. В то время, когда была написана его работа, математическая техника других физических теорий была, относительно говоря, очень утончённа и сложна. Математические действия в задаче, касающейся волн вещества, чрезвычайно просты и элементарны, но основные идеи глубоки и далеко идущи.

Раньше в случае световых волн и фотонов было показано, что каждое положение, сформулированное на волновом языке, можно перевести на язык фотонов или световых корпускул. То же самое справедливо и для электронных волн. Корпускулярный язык для равномерно движущихся электронов уже известен. Но каждое положение, выраженное корпускулярным языком, можно перевести на волновой язык, как это было и в случае фотонов. Два ключа сформулировали правило перевода. Один ключ — это аналогия между световыми волнами и электронными волнами или между фотонами и электронами. Мы применяем один и тот же метод перевода как для вещества, так и для света. Другой ключ даёт специальная теория относительности. Законы природы должны быть инвариантными относительно лоренцовых преобразований, но не относительно классических. Оба эти ключа определяют длину волны, соответствующую движущемуся электрону. Из теории следует, что электрон, движущийся, скажем, со скоростью 16 000 километров в секунду, имеет длину волны, которую легко можно подсчитать и которая, оказывается, лежит в той же области, что и длина волны рентгеновских лучей.

Отсюда мы заключаем далее, что если можно обнаружить волновой характер вещества, то это можно сделать экспериментально таким же путём, каким обнаруживаются волновые свойства рентгеновских лучей.

Вообразим пучок электронов, движущихся равномерно с заданной скоростью, или, если употреблять волновую терминологию, однородную электронную волну и предположим, что она падает на очень тонкий кристалл, играющий роль диффракционной решётки. Расстояния между диффрагирующими элементами в кристалле настолько малы, что они могут создать диффракцию рентгеновских лучей. Можно ожидать аналогичный эффект и для электронных волн, имеющих длину волны того же порядка. Фотографическая пластина должна зарегистрировать эту диффракцию электронных волн, проходящих через тонкий слой кристалла. Эксперимент и в самом деле обнаруживает явление диффракции электронных волн, что, несомненно, является большим достижением теории. Подобие между диффракцией электронных волн и диффракцией рентгеновских лучей особенно заметно из сравнения фотографий, приведённых на вклейке III.

Мы знаем, что такая картина позволяет нам определить длину волны рентгеновских лучей. Это остаётся в силе и для электронных волн. Диффракционная картина даёт длину волны вещества, а полное количественное согласие теории и эксперимента блестяще подтверждает правильность наших рассуждений.

Этими результатами расширены и углублены наши прежние трудности. Это можно уяснить с помощью примера, аналогичного примеру, использованному для световой волны. Электронный снаряд при очень малом отверстии будет отклоняться подобно световой волне. На фотографической пластинке обнаруживаются светлые и тёмные кольца. Есть некоторая надежда объяснить эти явления взаимодействием между электроном и краем отверстия, хотя такое объяснение не кажется очень многообещающим. Но что происходит в случае двух отверстий? Вместо колец появляются полосы. Почему же присутствие второго отверстия полностью изменяет эффект? Электрон неделим и может, казалось бы, пройти лишь через одно из двух

отверстий. Как мог электрон, проходя через отверстие, знать, что на некотором расстоянии находится другое отверстие?

Раньше мы спрашивали: что такое свет? Является ли он ливнем корпускул или волной? Теперь мы спрашиваем: что такое вещество, что такое электрон? Частица ли он или волна? Электрон ведёт себя подобно частице, когда он движется во внешнем электрическом или магнитном поле. Он ведёт себя подобно волне, когда диффрагирует, проходя сквозь кристалл. С элементарным квантом вещества мы прошли через те же трудности, которые мы встретили, изучая кванты света. Одним из наиболее фундаментальных вопросов, поставленных современными успехами науки, является вопрос о том, как согласовать два противоречивых взгляда на вещество и волну. Это одна из тех фундаментальных трудностей, которые, сформулированные однажды, должны привести, хотя и длинным путём, к прогрессу науки. Физика старалась разрешить эту проблему. Будущее должно показать, является ли решение, подсказанное современной физикой, окончательным или же временным.

Волны вероятности

Согласно классической механике, если мы знаем положение и скорость данной материальной точки, а также и внешние действующие силы, то мы можем предсказать на основе законов механики весь её будущий путь. В классической механике утверждение: «материальная точка имеет такие-то координаты и скорость в такой-то момент» имеет вполне определённый смысл. Если бы это утверждение потеряло свой смысл, то наши рассуждения (стр. 49) о предсказании будущего пути были бы ошибочны.

В начале девятнадцатого столетия учёные хотели свести всю физику к простым силам, действующим на материальные частицы, обладающие определёнными координатами и скоростями в некоторый момент времени. Вспомним, как мы описывали движение, когда рассматривали механику в начале нашего путешествия по цар-

ству физических проблем. Мы нарисовали точки вдоль определённого пути, показывающие точные положения тела в определённые моменты времени, а затем провели векторы, показывающие направления и величины скоростей. Это было и просто, и удобно. Но это нельзя повторить для элементарных квантов вещества — для электронов или для квантов энергии — фотонов. Мы не можем нарисовать путешествие фотона или электрона таким же образом, как мы изображали движение в классической механике. Пример с двумя отверстиями показывает это очень ясно. Кажется, что электрон и фотон должны пройти через оба отверстия. Следовательно, невозможно объяснить эффект, рисуя путь электрона или фотона в старом классическом смысле.

Мы должны, конечно, допустить наличие элементарных действий, таких, как прохождение электронов или фотонов через отверстия. Существование элементарных квантов вещества и энергии не может быть подвержено сомнению. Но законы, управляющие ими, не могут быть сформулированы путём определения координат и скоростей в любой момент в смысле классической механики.

Поэтому попробуем нечто другое. Будем непрерывно повторять одни и те же элементарные процессы. Пусть электроны посылаются один за другим через отверстия. Слово «электрон» употребляется здесь ради определённости; наши рассуждения справедливы также и для фотонов.

Один и тот же эксперимент повторяется много раз совершенно одинаковым образом; все электроны имеют одинаковую скорость и движутся в направлении к отверстиям. Необходимо твёрдо помнить, что это идеализированный эксперимент, который нельзя выполнить в действительности, но который легко можно себе представить. Мы не можем выбрасывать отдельные фотоны или электроны в заданные моменты времени, подобно пулям из ружья.

Результатом серии повторенных экспериментов снова должны быть тёмные и светлые кольца в случае одного отверстия и тёмные и светлые полосы в случае двух. Но имеется одно существенное отличие. В случае одного

индивидуального электрона результат эксперимента был непонятен. Когда эксперимент повторяется много раз, мы можем сказать, что светлые полосы появляются там, где падает много электронов. Полосы становятся темнее в тех местах, в которых падает меньше электронов. Совершенно тёмное пятно означает, что в это место не попал ни один из электронов. Мы, конечно, не можем считать, что все электроны проходят через одно из отверстий. Если бы это было так, то было бы безразлично, закрыто другое отверстие или нет. Но мы уже знаем, что в том случае, когда второе отверстие закрыто, мы получаем совершенно другой результат. Так как частица неделима, то мы не можем представить себе, что она проходит через оба отверстия. Тот факт, что эксперимент был повторен много раз, указывает на другой выход. Некоторые электроны могли пройти через первое отверстие, а другие через второе.

Мы не знаем, почему индивидуальные электроны выбирают то или иное отверстие, но конечный результат целой серии экспериментов должен показать, что оба отверстия пропускают электроны от источника к экрану. Если мы устанавливаем только то, что происходит с совокупностью электронов, когда эксперимент повторяется, не обращая внимания на поведение индивидуальных частиц, то различие между двумя картинками — диффракционные кольца и диффракционные полосы — становится понятным. Рассмотрение последовательности экспериментов породило новую идею о совокупности, состоящей из индивидуальностей, поведение которых нельзя предсказать.

Мы не можем предсказать поведение одного единственного электрона, но мы можем предсказать, что в конечном результате на экране будут появляться светлые и тёмные полосы.

Оставим на время квантовую физику.

В классической физике мы видели, что если мы знаем координаты и скорость материальной точки в известный момент времени и действующие на неё силы, мы можем предсказать её будущую траекторию. Мы видели также, как механистическая точка зрения применялась к ки-

нетической теории материи. Но в этой теории возникает и новая идея. Для понимания последующих рассуждений полезно эту идею освоить.

Пусть имеется сосуд, содержащий газ. При попытке проследить движение каждой частицы нужно было бы начать с нахождения начальных состояний, то-есть начальных координат и скоростей всех частиц. Даже если бы это было возможно, то человеческой жизни нехватило бы только для того, чтобы записать результат на бумаге, так как нужно было бы рассмотреть огромное количество частиц. Если бы мы затем попытались применить известные методы классической механики для подсчёта конечных положений частиц, трудности были бы непреодолимы. Принципиально возможно воспользоваться методом, применяемым для рассмотрения движения планет, но практически этот метод неприменим и должен уступить место *статистическому методу*. Этот метод не требует какого-либо точного знания начальных состояний. Мы меньше знаем о системе в любой данный момент и, следовательно, меньше имеем возможностей сказать что-либо о её прошлом или будущем. Нам безразлична судьба индивидуальных частиц газа. Наша задача другого характера. Мы, например, не спрашиваем: «Какова скорость каждой частицы в данный момент?». Но мы спрашиваем: «Сколько частиц имеют скорость между 1000 и 1100 метров в секунду?». Мы не заботимся об отдельных индивидуумах. То, что мы желаем определить, — суть средние значения, типичные для всей совокупности. Ясно, что статистический метод рассуждения можно провести лишь тогда, когда система состоит из очень большого числа индивидуумов.

Применяя статистический метод, мы не можем предсказать поведение отдельного индивидуума совокупности. Мы можем только предсказать вероятность, что он будет вести себя некоторым определённым образом. Если наши статистические законы говорят нам, что одна треть частиц имеет скорость между 1000 и 1100 метров в секунду, то это означает, что, повторяя наблюдения над многими частицами, мы действительно получим эту среднюю, или, иными словами, это означает, что вероятность на-

хождения частицы со скоростью внутри этого интервала равна одной трети.

Точно так же знание числа рождений в большом обществе ещё не означает знания любой отдельной семьи, осчастливленной ребёнком. Это означает лишь знание статистических результатов, в которых отдельные личности не играют роли.

Наблюдая за номерами большого числа вагонов, мы скоро заметим, что одна треть этих номеров делится на три. Но мы не можем предсказать, будет ли номер вагона, который пройдет в следующий момент, обладать этим свойством или нет. Статистические законы можно применять только к большим совокупностям, но не к отдельным индивидуумам, образующим эти совокупности.

Теперь мы можем вернуться к нашим квантовым проблемам.

Законы квантовой физики суть законы статистического характера. Это означает, что они относятся не к одной единственной системе, а к совокупности идентичных систем; они не могут быть подтверждены измерением, сделанным над отдельным индивидуумом, а подтверждаются лишь серией повторных измерений.

Радиоактивный распад является одним из многих явлений, для которых квантовая физика пытается сформулировать законы, управляющие самопроизвольным превращением одного элемента в другой. Мы знаем, например, что в течение 1600 лет половина грамма радия распадается, а половина остаётся. Мы можем предсказать, сколько приблизительно атомов распадается в следующие полчаса, но мы не можем сказать даже в нашем теоретическом описании, почему именно *эти* отдельные атомы обречены на гибель. Согласно нашим современным знаниям, мы не имеем средств, чтобы обозначить индивидуальный атом, осуждённый на распад. Судьба атома не зависит от его возраста. Нет ни малейшего следа законов, управляющих их индивидуальным поведением. Можно сформулировать только статистические законы, законы, управляющие большими совокупностями атомов.

Возьмём другой пример. Пусть спектр светящегося газа некоторого элемента, помещённого перед спектро-

скопом, состоит из линий определённых длин волн. Появление дискретной серии волн определённых длин является характеристикой атомных явлений, в которых обнаруживается наличие элементарных квантов.

Но имеется ещё и другая сторона этой проблемы. Некоторые из спектральных линий очень ярки, а другие слабы. Линия ярка, если испускается сравнительно большое число фотонов, относящихся к этой отдельной длине волны; линия слаба, если испускается сравнительно небольшое число фотонов, относящихся к этой длине волны. Теория вновь получает лишь статистический характер. Каждая линия соответствует переходу от более высокого уровня энергии к более низкому. Теория даёт нам лишь вероятности каждого из этих возможных переходов, но ничего не говорит о действительном переходе какого-либо отдельно взятого атома. Теория действует великолепно, потому что во всех этих явлениях участвуют большие совокупности, а не отдельные индивидуумы.

Кажется, что новая квантовая физика имеет некоторое сходство с кинетической теорией материи: обе они — статистического характера и обе относятся к большим совокупностям. Но это не так. В этой аналогии очень важно условие не только сходства, но и различия. Сходство между кинетической теорией материи и квантовой физикой лежит, главным образом, в их статистическом характере. Но каковы различия?

Если мы хотим знать, сколько мужчин и женщин в возрасте свыше двадцати лет живёт в городе, мы должны дать каждому гражданину заполнить анкету с вопросами: «мужчина», «женщина», «возраст». Предполагая, что каждый ответ правильный, мы можем, подсчитав и разделив ответы, получить результат статистического характера. При этом индивидуальные имена и адреса, указанные в ответе, не будут приняты во внимание. Наш статистический вывод получен на основе ознакомления с каждым отдельным индивидуумом. Подобно этому в кинетической теории материи мы имеем статистические законы, управляющие поведением совокупностей, полученные на основе индивидуальных законов.

Но в квантовой физике положение дел совершенно другое. Здесь статистические законы даны непосредственно. Индивидуальные законы исключены. В примере фотона или электрона, проходящих через два отверстия, мы видели, что мы не можем описать возможное движение элементарных частиц в пространстве и времени так, как мы это делали в классической физике.

Квантовая физика отказывается от индивидуальных законов элементарных частиц и устанавливает непосредственно статистические законы, управляющие совокупностями. На базе квантовой физики невозможно описать положения и скорости элементарной частицы или предсказать её будущий путь, как это было в классической физике. Квантовая физика имеет дело только с совокупностями, и её законы суть законы для совокупностей, а не для отдельных индивидуумов.

Жесткая необходимость, а не спекуляция или желание новинок вынуждает нас изменять старые классические взгляды. Трудности применения старых взглядов были очерчены лишь для одного примера, для диффракционных явлений. Но можно было бы указать и многие другие, одинаково подходящие примеры. Наша попытка понять реальность вынуждала нас к непрерывному изменению взглядов. Но всегда лишь будущему предстоит решить, избрали ли мы единственный возможный выход и было ли найдено наилучшее разрешение всех трудностей.

Мы должны были отказаться от описания индивидуальных случаев, как объективных явлений в пространстве и времени; мы должны были ввести законы статистического характера. Они являются основной характеристикой современной квантовой физики.

Раньше, когда мы указывали на новые физические реальности, на электромагнитное поле и поле тяготения, мы стремились в общих словах описать характерные черты уравнений, посредством которых математически формулировались идеи. То же самое мы сделаем теперь с квантовой физикой, касаясь только очень кратко работ Бора, де-Бройля, Шредингера, Гейзенберга, Дирака и Борна.

Рассмотрим случай одного электрона. Электрон может быть под влиянием произвольного внешнего элек-

ромагнитного поля или же свободным от всех внешних воздействий. Он может двигаться, например, в поле атомного ядра или может диффрагировать, проходя через кристалл. Квантовая физика учит нас, как формулировать математические уравнения для некоторых из этих проблем.

Мы уже указывали на аналогию между колеблющейся струной, мембраной, духовым инструментом или любым другим музыкальным инструментом, с одной стороны, и излучающим атомом, — с другой. Имеется некоторое сходство и между математическими уравнениями, управляющими акустическими проблемами, и уравнениями, управляющими проблемами квантовой физики. Но опять физическое толкование величин, используемых в этих случаях, совершенно различно. Физические величины, описывающие колеблющуюся струну и излучающий атом, имеют совершенно разное значение, несмотря на некоторое формальное сходство в уравнениях. В случае струны мы спрашиваем об отклонении произвольной точки от её нормального положения в произвольный момент времени. Зная форму колеблющейся струны в данный момент времени, мы знаем всё, что нам надо. Отклонение от нормального положения можно рассчитать для любого другого момента времени из математических уравнений для колеблющейся струны. Тот факт, что некоторое определённое отклонение от нормального положения соответствует каждой точке струны, выражается более строго следующим образом: в любой момент времени отклонение от нормального положения есть функция координат струны. Все точки струны образуют одномерный континуум, и отклонение есть функция, определяемая в этом одномерном континууме и подсчитываемая из уравнения колебаний струны.

Аналогично, в случае электрона некоторая функция определена в любой точке пространства в любой момент времени. Назовём эту функцию *волной вероятности*. В нашей аналогии волна вероятности соответствует отклонению от нормального положения в акустической задаче. Волна вероятности для данного момента есть функция трёхмерного континуума, в то время

как в случае струны отклонение для данного момента времени есть функция одномерного континуума. Волна вероятности образует каталог наших сведений о квантовой системе и позволяет нам ответить на все разумные вопросы, относящиеся к этой системе. Она не говорит нам о положении и скорости электрона в любой момент времени, ибо такой вопрос не имеет смысла в квантовой физике. Но она говорит нам о вероятности встретить электрон в том или ином месте или говорит нам о том, где мы имеем наибольший шанс встретить электрон. Результат относится не к одному, а ко многим повторяющимся измерениям.

Таким образом, уравнения квантовой физики определяют волну вероятности так же, как уравнения Максвелла определяют электромагнитное поле, а гравитационные уравнения определяют поле тяготения. Законы квантовой физики суть опять-таки структурные законы. Но смысл физических понятий, определяемых этими уравнениями квантовой физики, гораздо более абстрактен, чем в случае электромагнитного поля и поля тяготения; они предполагают только математический смысл, разрешающий вопросы статистического характера.

До сих пор мы рассматривали электрон в некотором внешнем поле. Если бы это был не электрон, наименьший из возможных зарядов, а некоторый заряд, содержащий биллион электронов, мы могли бы отбросить всю квантовую теорию и трактовать задачу согласно нашей старой доквантовой физики. Говоря о токах в проводниках, о заряженных проводниках, об электромагнитном поле, мы можем применять нашу старую простую физику, содержащуюся в уравнениях Максвелла. Но мы не можем этого делать, когда говорим о фотоэлектрическом эффекте, об интенсивности спектральных линий, радиоактивности, дифракции электронных волн и о многих других явлениях, в которых обнаруживается квантовый характер вещества и энергии. Тогда мы должны, так сказать, идти этажом выше. В то время как в классической физике мы говорили о координатах и скоростях одной частицы, теперь мы должны рассматривать

волны вероятности в трёхмерном континууме, соответствующие этой задаче об одной частице.

Если мы раньше научились истолковывать задачу с точки зрения классической физики, то квантовая механика даёт свой собственный рецепт толкования аналогичной задачи.

Для одной элементарной частицы, электрона или фотона, мы имеем волны вероятности в трёхмерном континууме, характеризующие статистическое поведение системы, если эксперименты часто повторяются. Но как дело обстоит в случае не одной, а двух взаимодействующих частиц, например двух электронов, электрона и фотона или электрона и ядра? Мы не можем рассматривать их отдельно и описывать каждый из них с помощью волн вероятности в трёх измерениях именно благодаря их взаимодействию. В самом деле, не очень трудно догадаться, как следует описывать в квантовой механике систему, состоящую из двух взаимодействующих частиц. Мы должны опуститься на один этаж, вернуться на время к классической физике. Положение двух материальных точек в пространстве в любой момент времени характеризуется шестью числами, тремя для каждой точки. Все возможные положения двух материальных точек образуют шестимерный континуум, а не трёхмерный, как это было в случае одной точки. Если мы теперь снова поднимемся на один этаж, к квантовой физике, мы будем иметь волны вероятности в шестимерном, а не в трёхмерном континууме, как это было в случае одной частицы. Аналогично этому для трёх, четырёх и более частиц волны вероятности будут функциями в континууме девяти, двенадцати и более измерений.

Это ясно показывает, что волны вероятности более абстрактны, чем электромагнитное и гравитационное поля, существующие и распространяющиеся в нашем трёхмерном пространстве. Континуум многих измерений образует основу для волн вероятности, и только для одной частицы число измерений становится равным числу измерений физического пространства. Только физическое значение волн вероятности есть то, что позволяет нам дать ответ на разумные вопросы статистического харак-

тера в случае многих частиц так же, как и в случае одной. Так, например, в случае одного электрона мы могли бы спросить о вероятности нахождения электрона в некотором определённом месте. Для двух частиц наш вопрос был бы таким: какова вероятность нахождения двух частиц в двух данных местах в данный момент времени?

Нашим первым шагом от классической физики был отказ от описания индивидуальных случаев, как объективных событий в пространстве и времени. Мы были вынуждены использовать статистический метод, предопределённый введением волн вероятности. Встав однажды на этот путь, мы вынуждены и дальше идти путём абстракций. Поэтому необходимо ввести и волны вероятности во многих измерениях, соответствующие задаче о многих частицах.

Ради краткости назовём всё, кроме квантовой физики, физикой классической. Классическая и квантовая физика радикально различаются. Классическая физика видит свою цель в описании объектов, существующих в пространстве, и в формулировке законов, управляющих их изменениями во времени. Но явления, обнаруживающие дискретную и волновую природу вещества и излучения, несомненный статистический характер таких элементарных явлений, как радиоактивный распад, диффракция, испускание спектральных линий и многие другие, вынуждают нас отказаться от этого взгляда. В квантовой физике нет места таким утверждениям, как: «этот объект таков-то, он имеет такое-то свойство». Вместо этого мы имеем утверждения такого рода: «Имеется такая-то вероятность того, что индивидуальный объект таков-то и что он имеет такое-то свойство». В квантовой физике нет места для законов, управляющих изменениями индивидуального объекта во времени. Вместо этого мы имеем законы, управляющие временными изменениями вероятности. Только это фундаментальное изменение, внесённое в физику квантовой теорией, сделало возможным адекватное объяснение событий, несомненно дискретного и статистического характера, в области явлений, в которой обнаруживают своё существование элементарные кванты вещества и излучения.

Однако, возникают новые ещё более трудные проблемы, пока ещё не установленные определённо. Мы напомним лишь некоторые из этих нерешённых проблем. Наука не является и никогда не будет являться закрытой книгой. Каждый важный успех приносит новые вопросы. Всякое развитие обнаруживает новые и глубокие трудности.

Мы уже знаем, что в простом случае одной или многих частиц мы можем перейти от классического к квантовому описанию, от объективного описания событий в пространстве и времени к волнам вероятности. Но мы помним весьма важное понятие поля в классической физике.

Как описать взаимодействие между элементарным квантом вещества и полем? Если для квантового описания десяти частиц необходима волна вероятности в тридцати измерениях, то для квантового описания поля необходима была бы волна вероятности с бесконечным числом измерений. Переход от классического понятия поля к соответствующей проблеме волн вероятности в квантовой физике — это очень трудный шаг. Поднятие на один этаж здесь — нелёгкая задача, и все сделанные до сих пор попытки разрешить эту проблему следует считать неудовлетворительными. Имеется и ещё одна фундаментальная проблема. Во всех наших рассуждениях о переходе от классической физики к квантовой мы употребляли старое дорелятивистское описание, в котором пространство и время трактуются отдельно.

Однако, если мы попробуем начать с классического описания, как оно предполагается теорией относительно-сти, то наша попытка подняться до квантовой задачи оказывается гораздо более тяжёлой. Эта вторая проблема, над которой бьётся современная физика, — задача, ещё далёкая от полного и удовлетворительного разрешения. Есть ещё другая трудность в создании последовательной физики тяжёлых частиц, составляющих ядро. Несмотря на множество экспериментальных данных и множество попыток бросить свет на проблему ядра, мы ещё находимся в неведении относительно некоторых наиболее фундаментальных вопросов в этой области.

Нет сомнения, что квантовая физика объяснила очень богатое разнообразие фактов, достигая во многих случаях блестящего согласия между теорией и наблюдением. Новая квантовая физика уводит нас ещё далее от старого механистического воззрения, и отступление к прежнему положению кажется теперь, более чем когда-либо, неправдоподобным. Но нет также никакого сомнения и в том, что квантовая физика всё ещё должна будет базироваться на двух понятиях — на понятиях вещества и поля. В этом смысле она — дуалистическая теория, которая не приближает ни на один шаг реализацию нашей старой проблемы — свести всё к понятию поля.

Пойдёт ли дальнейшее развитие по линии, избранной в квантовой физике, или же, что более правдоподобно, в физику будут введены новые революционные идеи? Не сделает ли дорога прогресса вновь крутой поворот, как она часто делала это в прошлом?

За последние несколько лет все трудности квантовой физики сконцентрировались вокруг нескольких принципиальных пунктов. Физика нетерпеливо ожидает их разрешения. Однако, невозможно предсказать, когда и где будет осуществлено выяснение этих трудностей.

Физика и реальность

Какие общие выводы можно сделать из развития физики, обрисованного здесь в общих чертах, представляющих лишь наиболее фундаментальные идеи?

Наука вовсе не является коллекцией законов, собранием несвязанных фактов. Она является созданием человеческого разума, с его свободно изобретёнными идеями и понятиями. Физические теории стремятся образовать картину реальности и установить её связь с обширным миром чувственных восприятий. Таким образом, единственное оправдание построений нашего ума состоит в том, образуют ли и каким путём такое звено наши теории.

Мы видели новые реальности, созданные прогрессом физики. Но эту цепь создания можно проследить и позади, далеко за отправной точкой физики. Одним из са-

мых первичных понятий является понятие объекта. Понятия дерева, лошади, любого материального тела — это творения, созданные на основе опыта, хотя восприятия, из которых они возникают, примитивны по сравнению с миром физических явлений. Кошка, дразнящая мышь, тоже творит в мышлении свою собственную примитивную реальность. Тот факт, что кошка всегда реагирует одинаковым образом по отношению к любой встречающейся ей мышь, показывает, что она создаёт понятия и теории, являющиеся её руководителем в её собственном мире чувственных восприятий.

Понятие «три дерева» есть нечто, отличное от понятия «два дерева». А понятие «два дерева» отлично от понятия «два камня». Понятия отвлечённых чисел 2, 3, 4, ..., свободные от объектов, из которых они возникают, суть создания мыслящего разума, который описывает реальности в нашем мире.

Психологическое субъективное чувство времени позволяет нам упорядочить наши впечатления, установить, что одно событие предшествует другому. Но связать каждый момент времени с числом, рассматривать с помощью часов время как одномерный континуум, это уже изобретение. Таковы же понятия евклидовой и неевклидовой геометрии и наше пространство, понятое как трёхмерный континуум.

Физика фактически начинает с создания понятий массы, силы и инерциальной системы. Все эти понятия суть свободные изобретения. Они приводят к формулировке механистической точки зрения. Для физика начала девятнадцатого столетия реальность нашего внешнего мира состояла из частиц, между которыми действуют простые силы, зависящие только от расстояния. Он старался сохранить, насколько возможно, свою веру в то, что ему удастся объяснить все события в природе с помощью этих основных понятий. Трудности, связанные с отклонением магнитной иглы, трудности, связанные со структурой эфира, внушили нам мысль создать более утончённую реальность. Появилось важное открытие электромагнитного поля. Нужно было смелое научное воображение, чтобы понять, что не поведение тел, а поведение

чего-то находящегося между ними, то-есть поля, может быть существенно для направления событий и для их понимания.

Позднейшее развитие разрушило старые понятия и создало новые. Абсолютное время и инерциальная система координат были отброшены теорией относительности. Основой для всех событий были уже не одномерное время и трёхмерный пространственный континуум, а четырёхмерный пространственно-временной континуум, другое свободное изобретение, с новыми свойствами преобразования. В инерциальной системе координат больше не было нужды. Любая система координат оказалась одинаково пригодной для описания явлений природы.

Квантовая теория раскрыла новые и существенные черты нашей реальности. Прерывность встала на место непрерывности. Вместо законов, управляющих индивидуальностями, появились законы вероятностей.

Реальность, созданная современной физикой, конечно, далеко ушла от реальности прежних дней. Но цель всякой физической теории попрежнему одна и та же.

С помощью физических теорий мы пытаемся найти себе путь сквозь лабиринт наблюдённых фактов, упорядочить и постичь мир наших чувственных восприятий. Мы желаем, чтобы наблюдённые факты логически следовали из нашего понятия реальности. Без веры в то, что возможно охватить реальность нашими теоретическими построениями, без веры во внутреннюю гармонию нашего мира, не могло бы быть никакой науки. Эта вера есть и всегда останется основным мотивом всякого научного творчества. Во всех наших усилиях, во всякой драматической борьбе между старыми и новыми воззрениями мы узнаём вечное стремление к познанию, непоколебимую веру в гармонию нашего мира, постоянно усиливающуюся ростом препятствий к познанию.

Мы суммируем:

Богатое разнообразие фактов в области атомных явлений опять вынуждает нас создавать новые физические понятия. Вещество обладает зернистой структурой; оно состоит из элементарных частиц — квантов

вещества. Зернистую структуру имеет электрический заряд, а самое главное, — с точки зрения квантовой теории зернистую структуру имеет и энергия. Фотоны — это кванты энергии, из которых состоит свет.

Является ли свет волной или ливнем фотонов? Является ли пучок электронов ливнем элементарных частиц или волной?

Эти фундаментальные вопросы навязаны физике экспериментом. В поисках ответа на них мы должны отказаться от описания атомных явлений как явлений в пространстве и времени, мы должны ещё дальше отступить от старого механистического воззрения. Квантовая физика формулирует законы, управляющие совокупностями, а не индивидуумами. Описываются не свойства, а вероятности, формулируются не законы, открывающие будущее системы, а законы, управляющие изменениями во времени вероятностей и относящиеся к большим совокупностям индивидуумов.

УКАЗАТЕЛЬ

- Абсолютное время 173 и д., 192, 218
 Абсолютная система координат 193, 197
 Аристотель 30
 «Беседы о двух новых науках» (Сочинение Галилея) 31, 97
 Блэк 55, 56, 65
 Бор 240, 255
 Борн 255
 Броун 74
 Броуновское движение 74—77
 Векторы 34—39, 41—45
 Волновая теория света 109 и д.
 Волны вероятности 249 и д.
 — вещества 242 и д.
 — длина 106, 114, 115
 — механические 105 и д.
 — плоские 109
 — поперечные 108, 117—119
 — продольные 108, 117
 — скорость 142
 — стоячие 244
 — сферические 108
 — электромагнитные 142, 143
 — электронные 248
 Вольты 93, 94
 — элемент 93—95
 Галилей 29—32, 55, 69, 97—98, 157
 Галилея закон инерции 147
 — принцип относительности 150
 Гальвани 83
 Гейзенберг 255
 Гельмгольц 70, 71
 Герц 142
 Гюйгенс 110, 118
 Движение абсолютное 161, 162, 193, 197, 212
 — броуновское 74—77
 —, динамическая картина 192
 — криволинейное 39 и д.
 — относительное 161, 197
 — прямолинейное 34
 —, статическая картина 191
 де-Бройль 243, 246, 247, 255
 Демокрит 69
 Джоуль 65—67
 Диполь магнитный 90, 91
 — электрический 90
 Дирак 255
 Дисперсия 103
 Диффракция рентгеновских лучей 242
 — света 116
 — электронных волн 248
 Законы движения 49
 — преобразования 153
 — инерции 31, 145
 — тяготения 48
 Изолятор 82
 Инвариант 154
 Инертная масса 52—54, 199
 Инерционная система координат 150, 197
 — — — ограниченная 200, 201
 Кванты 232 и д.
 Кинетическая теория 71 и д.
 Классические преобразования 155
 Константа движения 64

- Координаты точки 152
 Координат система 147—150
 Коперник 147, 196, 198
 Корпускулы света 100—102
 Кристалл 242
 — турмалина 118
 Кулон 85, 91, 96, 217
- Лейбниц 44
 Лоренца преобразования 176—179, 216
- Магнитные жидкости** 89—92
 Магниты 89 и д.
 Майер 65, 66
 Майкельсон 99, 164
 Максвелл 139 и д., 217
 Максвелла уравнения 137, 140, 217
 Масса 51
 Масса атома водорода 227
 — движущегося тела 182
 — инертная 52—55, 199
 — молекулы водорода 77, 227
 — покоя 182
 — тяжёлая 51—54, 199
 — электрона 230
 Метрические свойства 214
 Мера превращения 65 и д.
 Меркурий 219, 220
 Механические волны 105 и д.
 Механический эквивалент теплоты 66, 67
 Молекулы 72—74, 77
 —, число, их 77
 Морли 164
- Невесомые субстанции** 58, 86
 Ньютон 29, 34, 44, 48, 49, 85, 110, 114, 115, 216
- Обобщения** 40
 Относительность общая 205, 216—220
 — специальная 198
 Отражение света 101
- Планк 234
 Поле 123 и д.
 — как представление 125
 — статическое 131
- Поле, его структура 137—142
 Полюса магнитов 89
 Преломление света 101
 Преобразования законы 153
 — классические 155
 — Лоренца 176, 193
 «Принципы» (Сочинение Ньютона) 34
 Пробное тело 124
 Проводники 81
 Пространство 186 и д.
 — одного измерения 186
 — двух измерений 187
 — трёх измерений 187
 — четырёх измерений 193
 Прямолинейное распространение света 100, 101, 203, 204
 Птоломей 196, 197
- Радий 183, 253
 Радиоактивное вещество 183, 253
 Радиоактивный распад 183, 250
 Резерфорд 232
 Рёмер 99
 Рентгеновские лучи 241, 242
 Роуланд 96, 97
 Румфорд 60, 61, 65
- Свет белый** 102, 103
 —, дисперсия 103
 —, искривление в поле тяжести 204
 — как субстанция 100 и д.
 —, кванты 226—228, 232 и д.
 — однородный 104
 —, отражение 101
 —, преломление 101, 102, 112—114
 —, прямолинейное распространение 100, 101, 204
 Сила 33, 34, 41, 43, 46, 50
 Силовые линии 123, 126
 Синхронизация часов 170, 171
 Система координат 147—149
 Скорости вектор 42—46
 Скорости изменения 35, 40, 43, 45, 46, 49
 — электромагнитных волн 142
 Соленоид 128
 Спектральные линии 238—240
 Спектр видимый 103, 238

- Спектроскоп 239
Специальная относительность 198
Статистика 252
Статическая картина движения 191
Температура 54—56
Тепловая энергия 65—68
— субстанция 54
Теплоёмкость 57
Теплород 58
Теплота 54—61
Тяжёлая масса 52—54, 199
Фарадей 138, 139, 142
Физо 99
Фотоны 235—238, 247
— ультрафиолетовые 241
Фотоэлектрический эффект 233—235
Френель 115
Шрёдингер 243, 255
Эквивалентность энергии и массы 184
Электрические жидкости 79, 81, 83, 85—88, 94
Электрический заряд 86, 87
— потенциал 86, 87
Электромагнитная теория света 143—145
Электромагнитное поле 139—141
Электромагнитные волны 141, 142
Электрон 229, 249
Электронные волны 248
Электроскоп 79
Элементарные кванты 227—232
— частицы 183
Энергия кинетическая 63, 64
— магнитная 136
— механическая 65, 67
— потенциальная 63—65, 66
— тепловая 65—68
—, уровень 240
— электрическая 136
Эрстед 95, 138, 139, 140
Эфир 111, 113, 117—122, 155—167
Юнг 115
Ядерная физика 231, 232
Ядро 231
-

ОГИЗ СССР
ГОСУДАРСТВЕННОЕ ИЗДАТЕЛЬСТВО
ТЕХНИКО-ТЕОРЕТИЧЕСКОЙ ЛИТЕРАТУРЫ
«ГОСТЕХИЗДАТ»

Москва, Орликов пер., 3.

ПЕЧАТАЮТСЯ:

Вентцель Г. Введение в квантовую теорию волновых полей. Перевод с немецкого.

Кюри М. Радиоактивность. Перевод с французского.

Льюис Л. В. Методы электрического счёта альфа-и бета-частиц. Перевод с английского.

Паули В. Общие принципы волновой механики. Перевод с немецкого.

ИМЕЮТСЯ В ПРОДАЖЕ:

Капцов Н. А. Электрические явления в газах и в вакууме. 808 стр. Цена 21 руб.

Максутов Д. Д. Астрономическая оптика. 368 стр. Цена 19 руб.

Мезон. Сборник статей под ред. И. Е. Тамма.

