

20.11.19
Б.19

Современные КОНЦЕПЦИИ ЕСТЕСТВОЗНАНИЯ

А.Н. Бабушкин



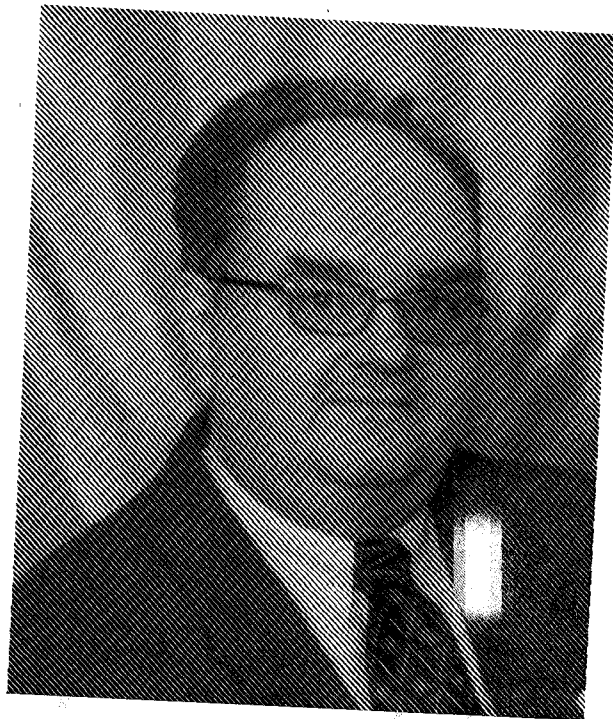
Уважаемый читатель!

Вы держите в руках один из учебников нового поколения по естествознанию для студентов высших учебных заведений, обучающихся по циклам общих математических и естественнонаучных дисциплин для гуманитарных и социально-экономических направлений. Учебник написан известным специалистом в области физики и естествознания и прошел сложный и длительный путь конкурсного отбора на конкурсе Министерства образования Российской Федерации на создание учебников нового поколения по циклам общих фундаментальных естественнонаучных дисциплин.

В конкурсе по одиннадцати номинациям приняли участие свыше трехсот пятидесяти авторских коллективов, чьи разработки более всего соответствовали как новым учебным программам, так и государственным образовательным стандартам по каждой дисциплине.

Конкурсная комиссия выражает надежду, что данный учебник внесет вклад в дело дальнейшего совершенствования российского высшего профессионального образования, и желает всем читателям — студентам и преподавателям — больших творческих успехов.

*Первый заместитель министра
общего и профессионального
образования России, академик
Российской академии образования,
председатель конкурсной комиссии
профессор В. Д. ШАДРИКОВ*



280864

20.7.3
12

А. Н. БАБУШКИН

СОВРЕМЕННЫЕ КОНЦЕПЦИИ ЕСТЕСТВОЗНАНИЯ

Лекции

*Издание третье,
исправленное
и дополненное*

РЕКОМЕНДОВАНО
Министерством образования
Российской Федерации в качестве
учебного пособия по дисциплине
«Концепции современного естествознания»
для гуманитарных направлений
и специальностей

Библиотека
ТГПУ

ИНВ. № 220864



САНКТ-ПЕТЕРБУРГ
2002

ББК 20я7

Б 12

Бабушкин А. Н.

Б 12 Современные концепции естествознания: Лекции
3-е изд., испр. и доп. — СПб.: Издательство «Лань»
2002. — 224 с., ил. — (Учебники для вузов. Специ-
альная литература).

ISBN 5-8114-0346-1

Лекции по курсу «Концепции современного естествознания» соответствуют государственным образовательным стандартам для гуманитарных и обществоведческих специальностей и в максимальной степени отвечают реальному курсу.

Рассмотрены современные представления о мегамире и микромире, самоорганизации в неживой природе, приведены начальные сведения о взаимодействии живой и неживой природы. Показано место человека в познании окружающего мира.

Содержание доступно для студентов младших курсов. Пособие может быть полезно для учащихся старших классов школы, учителей, людей, проявляющих интерес к естествознанию.

ББК 20я7

The research described in this publication was made possible in part by Award No. REC-005 of the U.S. Civilian Research & Development Foundation for the Independent States of the Former Soviet Union (CRDF). Any opinions, findings and conclusions, recommendations expressed in this material are those of the author and not necessarily reflect those of the CRDF.

БАБУШКИН Алексей Николаевич — физик-экспериментатор, доктор физико-математических наук, профессор Уральского государственного университета. Заведующий кафедрой физики низких температур. Член-корреспондент РАН. Область научных интересов — физика экстремальных воздействий на вещество.

Цена 48 руб.

Оформление обложки
С. ШАПИРО, А. ЛАПШИН

Охраняется законом РФ об авторском праве.
Воспроизведение всей книги или любой ее части
запрещается без письменного разрешения издателя.
Любые попытки нарушения закона будут
преследоваться в судебном порядке.

© Издательство «Лань», 2002

© А. Н. Бабушкин, 2002

© Издательство «Лань»,
художественное оформление, 2002

ВВЕДЕНИЕ

Первое, на что обращает внимание читатель книги, — введение. Именно во введении стоит объяснить, что за книга попала к нему в руки, есть ли смысл листать (а потом — и читать) ее дальше.

Для начала «расшифруем» название.

Первое слово — **современный**. Здесь нам не нужен словарь. Речь идет о сегодняшнем, соответствующем существующим сейчас представлениям, взгляде на рассматриваемые вопросы.

Второе слово — **концепции**. Что означает этот термин? Открыв энциклопедический словарь, обнаруживаем: «Концепция (от лат. conceptio — понимание, система) — определенный способ понимания, трактовки каких-либо явлений, основная точка зрения, руководящая идея их освещения; ведущий замысел, конструктивный принцип различных видов деятельности».

И, наконец, **естествознание** — совокупность наук о природе (естественных наук), взятых в их взаимосвязи, взаимозависимости, как целое.

Таким образом, из названия следует, что курс посвящен рассмотрению общих, не детализированных, представлений о том, как мы сегодня понимаем природу, каковы способы нашего познания природы. Ясно, что эти представления изменяются во времени — одни у Аристотеля, другие — у Ньютона, третьи — у Эйнштейна. Как изменятся наши представления о мире в будущем?

Задачи курса «Современные концепции естествознания» состоят в том, чтобы студенты, обучающиеся на

гуманитарных, обществоведческих и экономических факультетах высших учебных заведений, получили сведения о современных взглядах на природу; увидели необходимость как рационального, так и образного отражения окружающего мира; определили место человека в этом мире; поняли различие между точным знанием, верой, догадками, недобросовестными и тенденциозными интерпретациями наблюдаемых явлений.

Основные разделы курса основываются на школьных знаниях по физике, химии, биологии, астрономии, но не повторяют их. Деление естествознания на частные науки связано с удобством исследователя, природа же едина. Делается попытка показать естественные науки в их взаимосвязи, единстве. Сделать это непросто, особенно в небольшом курсе лекций. Кроме того, содержание лекций ориентировано на студентов-гуманитариев, для многих из которых естественные науки еще в школе были трудны.

В связи с этим стоит упомянуть высказывание Л. Н. Толстого: «Помню я раз, говоря со знаменитым астрономом, читавшим публичные лекции о спектральном анализе звезд Млечного пути, сказал ему, как хорошо бы было, если бы он, со своим знанием и мастерством читать, прочел бы публичную лекцию по космографии только о самых знакомых движениях Земли, так как, наверное, среди слушателей его лекций о спектральном анализе звезд Млечного пути очень много людей, особенно женщин, таких, которые не знают хорошенько того, от чего бывают день и ночь, зима и лето. Умный астроном, улыбаясь, ответил мне: „Да, это хорошо бы было, но это очень трудно. Читать о спектральном анализе Млечного пути гораздо легче“» (Толстой Л. Н. Полное собрание сочинений. Т. 30. М., 1951. С. 184).

Курс может быть условно разделен на пять частей. Первая посвящена общим вопросам естествознания: предмету естественных наук, проблеме измерения, общим проблемам пространства и времени. Вторая — проблеме вещества, самоорганизации в неживой природе. Сведения о мегамире: современных представлениях о Вселенной, закономерностях ее развития, динамике эволюции

звезд, Солнечной системе, — содержатся в третьей части. Далее рассмотрены сведения о строении Земли, атмосферы, гидросферы, климате. Заканчивается курс рассмотрением особенностей биологического уровня организации материи, структуры и устойчивости биосферы.

Студенты, их реакция, вопросы и сомнения определили вид и содержание лекций.

Сегодня есть ряд весьма удачных учебников и учебных пособий по рассматриваемому курсу, некоторые из них упоминаются в списке литературы. Эта книга отличается от них структурой, максимально приближенной к реальному учебному процессу.

Автор благодарен всем студентам — филологам, экономистам, юристам, — слушавшим этот курс; преподавателям естественных факультетов Уральского университета, деканам физических факультетов Казанского и Кабардино-Балкарского университетов профессорам А. А. Аганову и М. Х. Хоконову за обсуждение как книги в целом, так и отдельных вопросов, критику. Особенно полезными и приятными были дискуссии с профессорами Л. Я. Кобелевым, Ю. И. Новоженовым, В. М. Жуковским, С. В. Комовым, С. Ф. Борисовым, Б. С. Ишхановым, доцентами А. В. Полтавцом, Л. Ф. Истоминым.

ПРЕДМЕТ ЕСТЕСТВОЗНАНИЯ. КУЛЬТУРА И ЕСТЕСТВОЗНАНИЕ

Естествознание в современном понимании — совокупность наук о природе (естественных наук), взятых в их взаимосвязи, как целое.

Наука (лат. *scientia*, от *scire* — знать) — термин, используемый в самом широком смысле для обозначения обобщаемого и систематизируемого знания в любой области.

Усилия, направленные на систематизацию знаний, могут быть прослежены с доисторических времен — наскальных рисунков палеолита, вырезанных на кости или камне знаков, оставшихся от неолитических цивилизаций.

Самые древние из известных письменных записей результатов научного осмысления мира обнаружены на глиняных досках Древней Месопотамии: это данные астрономических наблюдений, списки веществ, признаки болезней, математические таблицы. Другие письменные источники, датирующиеся приблизительно 2000 годом до нашей эры, свидетельствуют, что вавилоняне в то время знали теорему Пифагора, умели решать квадратные уравнения, разработали систему счисления по основанию 60. Именно из нее возникли современные способы измерения времени и углов (60 минут в часе, 60 секунд в угловом градусе). Примерно к этому же периоду относится папирус, обнаруженный в долине Нила. В нем содержатся сведения относительно лечения ран и болезней, определения объема части пирамиды. Некоторые из современных единиц длины могут быть обнаружены

и египетских прототипах. Современный календарь — косвенный результат астрономических наблюдений древних греков.

Во все времена естествоиспытатели пытались выявить сущность явлений природы, их законы, и на этой основе предсказывать новые явления. Это — *познавательная сторона* естествознания. Но не менее важна и *прикладная сторона*: на основе знания явлений природы, умения их предсказывать и описывать, человек раскрывает возможность использования на практике полученных законов, сил и веществ. Заметим, что сначала появляется практический интерес, связанный с обеспечением существования человека, семьи, группы, общества. А потом — любопытство, попытки обобщения и систематизации...

Познание законов природы и создание на этой основе картины мира — непосредственная, ближайшая цель естествознания. Содействие практическому использованию этих законов — конечная задача.

Приведем два определения понятия «закон», взятых из энциклопедического словаря (Советский энциклопедический словарь, 1987).

1. Закон — необходимое, существенное, устойчивое, повторяющееся отношение между явлениями в природе и обществе. Закон — это форма всеобщности, так как он выражает общие отношения, связи, присущие всем явлениям данного рода, класса.

2. Закон — нормативный акт, принятый высшим органом государственной власти в установленном конституцией порядке. Основной источник прав в современном обществе.

Сопоставьте эти два определения.

Независимо от предмета исследования все науки о природе основываются на *наблюдении* или *эксперименте*. Сначала человек — исследователь, естествоиспытатель — взаимодействует с изучаемым явлением или объектом. Происходит установление фактов, их накопление. По мере этого возникает необходимость изложения полученных результатов и их первичной систематизации. Это *эмпирический уровень исследования* (от греч. *empeiria* — опыт).

Затем возникает необходимость объяснения обнаруженных фактов, обобщения полученных результатов. Результатом обобщения является формулирование гипотез (от греч. *hypóthesis* — основание, предположение), их анализ, постановка новых уточняющих наблюдений и экспериментов, выявление ранее не известных закономерностей и законов и, наконец, появление теории (от греч. *theōria* — рассмотрение, исследование), объясняющей рассматриваемые явления и эффекты, дающей направление новых экспериментов и наблюдений. Это *теоретический уровень исследования*. Эмпирический и теоретический уровни естествознания взаимосвязаны и обуславливают развитие друг друга.

Представления человека об окружающем мире, его мировоззрение формировались в течение тысячелетий. Однако с XVIII века роль естественных наук стала быстро меняться. Научные открытия ускорили развитие техники и технологий.

Потребности технического прогресса привели к новым научным открытиям. Наука стала основой развития человеческого общества.

В течение тысячелетий существовала одна наука о природе и обществе — натурфилософия (нем. *Naturwissenschaft* — природоведение; нем. *Naturphilosophie* от лат. *natura* — природа, греч. *phileo* — люблю и *sophia* — мудрость).

Самостоятельные науки, занимающиеся изучением тех или иных сторон природы, отдельных групп явлений, возникли не так давно.

Природа едина. Это человек, исследователь, выбирает способы ее описания. Понятно, что разделение естествознания на самостоятельные науки связано с выделением специфических предметных областей. При этом наши представления о природе могут быть получены только при объединении результатов разных наук.

И мы должны понимать, что наука порождена материальной и духовной культурой, является ее неотъемлемой частью и непосредственно связана с экономическим развитием общества (зависит от него в ближней перспективе и определяет — в дальней).

Выделение и объединение самостоятельных наук идет разными путями. Например, может быть сформулирован *предметный подход*, соответствующий последовательной связи объектов природы, их развитию и переходу одних в другие.

Естествознание может быть искусственно разделено на органическое и неорганическое, так как природа может рассматриваться (в некотором приближении) как живая и неживая. Тогда мы можем рассматривать естествознание как цепочку:

Физика → Химия → Неорганическая (неживая природа) → Органическая (живая природа) → Биология

Этот же принцип может быть положен в основу рассмотрения разных по масштабу явлений природы, например:

Астрономия → Геология → География → Биология

Возможно множество вариантов, границы между частными науками являются искусственными, установленными человеком исходя из тех или иных соображений. Именно здесь возникают пограничные, наиболее интенсивно развивающиеся области знаний, такие как физическая химия, химическая физика, биофизика, физика белка, астрофизика, химия и физика планет и т. п. Именно на границах возникают вопросы, не имеющие на сегодняшний день ответа, в том числе один из ключевых, волнующих человечество: «Как из набора сложнейших многоатомных органических молекул образуется живая клетка?»

Физика, химия, геология и биология относятся к фундаментальным отраслям современного естествознания и образуют стержень классификации естественных наук. Сегодня к этим наукам необходимо добавить **психологию** — науку, имеющую дело со всевозможными разумными существами.

В настоящее время естествознание имеет три главных направления.

Условная классификация их может быть такова:

- изучение очень большого,

- изучение очень малого,
- изучение очень сложного.

Изучением **очень большого** занимается астрономия. С помощью приборов астрономы наблюдают все более отдаленные объекты, пытаются посредством все более тонких теоретических методов составить представление о том, как выглядит населяемый нами мир во Вселенной. Астрономия сосредотачивает внимание не только на огромных расстояниях, но и на продолжительных отрезках времени. Как развивалась и развивается Вселенная? Что ожидает нас в будущем? Каково наше собственное положение во Вселенной? Единственны ли мы во Вселенной?

Изучением **очень малого** занимается физика. Очень малое представляет собой мир атомов, из которых состоим мы сами и все вокруг. Атомы, их строение, взаимодействие, более мелкие структурные единицы материи — сложнейшие объекты исследований. В физике особенно велика роль модели объекта или явления. Именно здесь, в силу относительной простоты рассматриваемых объектов, появляется понятие *математической модели*. В чем причина возникновения сил? Что такое законы сохранения?

Область **очень сложного** принадлежит биологии. Как из химических элементов, атомов возникает живая клетка, многоклеточный организм, мышление — где связь живого и мира атомов, каково влияние Космоса? Возникает бесконечная цепь усложнений.

Естественные науки — вместе с науками о человеке и обществе, искусством, литературой, религией — являются составными частями общечеловеческой культуры.

Известны литературные произведения, которые можно отнести и к литературе, и к естественным наукам. Примеры этого — диалоги древнегреческого философа-идеалиста Платона (428/27–348/47 гг. до н. э.), поэма «О природе вещей» Тита Лукреция Кара (I в. до н. э.), «Естественная история» Ж. Бюффона (1707–1788), произведения М. В. Ломоносова (1711–1765).

Гуманитарные науки, искусство, литература, религия сильно влияют на формирование мировоззрения ес-



Рис. 1.1

Иллюстрация соотношения между различными сферами культуры

тествоиспытателей. Особенно ярко это проявляется в трудах И. Кеплера (1571–1630), Т. Браге (1546–1601), Г. Галилея (1564–1642) и др. Альберт Эйнштейн (1879–1955) писал: «Музыка и исследовательская работа в области физики различны по происхождению, но связаны между собой единством цели — стремлением выразить неизвестное. Их реакции различны, но они дополняют друг друга».

Схема, приведенная на рис. 1.1, иллюстрирует соотношение между сферами науки (о природе, человеке, обществе), искусства и религии, образующими то, что мы называем культурой, и жизнью. Жизнь, к сожалению, протекает не только в рамках культуры. Область науки рациональна, построена на строгом анализе и синтезе знаний (независимо от объекта исследования — природы, человека или общества). Сфера искусства опирается на эмоциональное восприятие мира.

«...Деление образов мышления, тем самым и наук, по предмету изучения неправомерно. Гораздо удобнее деление по способу получения первичной информации. Тут возможны два подхода: чтение книг или выслушивание сообщений (легенд, мифов и т. д.) и наблюдение, иногда с экспериментом, — пишет Л. Н. Гумилев. — Первый способ соответствует гуманитарным наукам, царицей коих является филология. Второй — естественным наукам, которые следует подразделить на математизированные и описательные. Математизированные имеют

дело с символами, описательные — с феноменами. К числу последних относятся география и биология».

Известный литературовед Г. Д. Гачев приводит сравнение эстетического и рационального. «...Оно (эстетическое) — лакмус, барометр возможных в данном обществе радости и счастья.

В этом смысле искусство должно глубочайшим образом корениться в существующей жизни, знать ее собственную меру и реальные возможности — но в то же время, несмотря ни на что, требовать абсолюта, „невозможного“, совершенства — в отличие от науки, которая всегда отражает логику налично существующего общества и выдвигает лишь последовательно из момента вытекающие задачи — и примиряется с относительностью жизни.

Вот почему, если наука обеспечивает непрерывное и поступательное движение общества, его текущее направление, то искусство непрерывно дает ему мечту, мерку идеала, и побуждает людей вперед. Оно служит стимулом движения, тогда как логика и наука дают ему конкретное, связанное с прошлым и из него вытекающее направление и формы.

Так что, если наука обязана выдвигать лишь возможные цели, то искусство в этом отношении более свободно от данной исторической формы и имеет право (и не только право, но в этом и его призвание) манить, и дразнить, и издеваться над иллюзиями собственного совершенства, которые в любую эпоху имеет в себе общество, и делать неожиданные скачки и назад, и вбок. Кстати, именно в этом роль искусства в устоявшемся уже общественном строе: потому оно там несерьезно, есть по преимуществу смех, юмор, сатира, отчасти — критический реализм...»

Существует понятие *интуиции*, умения предсказать, основываясь на неуловимых деталях. Интуиция наиболее ярко проявляется у высочайших профессионалов. Так, рассказывают, что выдающийся советский авиаконструктор А. Н. Туполев по внешнему виду макета самолета говорил, полетит тот или нет. Аргумент был простой: он мне не нравится (или нравится).

Одним из критериев истинности научной теории и эксперимента является их внутренняя стройность, гармония, цельность, красота доказательства, оригинальность постановки опыта.

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

Ф. Тютчев

Во взаимодействии науки, технологии и искусства возникают новые виды искусств. Когда-то возникло книгопечатание. На глазах не слишком далеких предков — кино и радио. На глазах наших родителей — телевидение. Мы являемся свидетелями и участниками бурного развития новых глобальных информационных средств, делающих мир все более открытым для человека.

Но не только наука ведет к появлению новых видов искусства. Искусство оказывает влияние на рациональное знание, науку. Безусловно — через эмоции исследователя. Но не исключено, что искусство дает рациональный результат, ведет к новым инженерным решениям.

Так, возможно, идея создания раstra в телевизионных трубках цветных телевизоров и мониторов (миллионы цветов создаются с помощью трех точек — красной, синей и зеленой) была навеяна инженерам художниками-импрессионистами, создавшими пуантилизм (фр. *pointillisme* — «писать точками») — манеру письма отдельными мазками правильной, точечной или прямоугольной, формы.

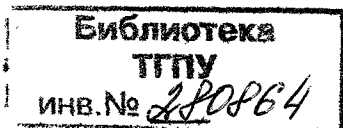
Клод Моне, вдохновитель импрессионизма, живописного стиля в искусстве Франции, сложившегося в 60–70-е годы XIX века, увидел градации света, реакцию цвета на свет в более тонких нюансах и первым передал это. Чтобы воспроизвести подвижную изменчивость светового состояния, художник использовал технику раздельного мазка, обязывающую смотреть картину не вблизи, а на определенном расстоянии, когда все отдельные мазки смешиваются, сливаются оптически в глазу зрителя, образуя тот мотив и тот эффект, которых старался достичь Моне.

Моне писал чистыми красками, почти совсем отказавшись смешивать их на палитре. Чистые пятна-мазки спектральной красочной гаммы, лежащая на холст по принципу дополнительных тонов и контраста, воссоздают тот сложный оттенок света, который увидел художник.

В 1959 г. в лекции «Две культуры», прочитанной в Кембриджском университете, Чарльз Перси Сноу (1905–1980, английский писатель и физико-химик) одним из первых сформулировал проблему существования двух независимых групп интеллигенции (гуманитариев, обществоведов, людей искусства, с одной стороны, и естествоиспытателей — с другой), практически не общающихся друг с другом. В тексте лекции, в частности, говорилось: «...Узнав о каком-нибудь открытии, сделанном людьми, никогда не читавшими великих произведений английской литературы, они (гуманитарии) сочувственно посмеиваются. Для них эти люди — просто невежественные специалисты, которых можно сбрасывать со счета. Между тем их собственное невежество и узость специализации ни чуть не менее страшны. Множество раз мне приходилось бывать в обществе людей, которые, по нормам традиционной культуры, считаются высокообразованными. Обычно они с большим пылом возмущались литературной безграмотностью естествоиспытателей. Один или два раза я не выдержал и спросил, кто из них может объяснить, что такое второй закон термодинамики. Ответом было молчание или отказ. А ведь задать этот вопрос ученому, занимающемуся изучением природы, значит примерно то же самое, что спросить у писателя „Читали ли вы Шекспира?..“ Сейчас я убежден, что если бы я поинтересовался более простыми вещами, например тем, что такое масса или что такое ускорение, то есть опустился бы до той ступени научной трудности, на которой в мире художественной интеллигенции спрашивают: „Умеете ли вы читать?“, то не более чем один из десяти высококультурных людей понял бы, что мы говорим с ним на одном и том же языке. Получается так, что величественное здание современной физики устремляется ввысь, а для большей части проницательных людей западного мира оно так же непостижимо, как и для их предков эпохи неолита...»

ВОПРОСЫ ДЛЯ САМОПРОВЕРКИ

1. Каковы возможные принципы классификации наук о природе?
2. Как связаны науки о природе и обществе? Каково место религии? В чем разница между верой и знанием?
3. Какова роль практики в естествознании?
4. Поясните понятия теоретического и эмпирического уровней естествознания. Какова их взаимосвязь?
5. Что такое эксперимент? В чем отличие эксперимента от наблюдения? Какие естественные науки основываются главным образом на наблюдении? Приведите примеры.
6. Чем отличаются законы природы и законы, устанавливаемые государством?
7. Поясните понятие «модель». Какие модели явлений и процессов природы вы знаете? Приведите примеры.



ФИЗИЧЕСКАЯ КАРТИНА МИРА

Одной из ведущих естественных наук является физика. Физика изучает самые элементарные явления природы, лежащие в основе мироздания, и ставит перед собой задачу выявить и объяснить законы природы. Физика работает с *моделями*, упрощенно описывающими изучаемые явления.

Например, нам надо описать движение космического корабля. Расстояние до него около 400 км. Размер — несколько десятков метров. Вполне разумно считать его материальной точкой, объектом, размерами которого в данной задаче можно пренебречь. Однако тот же самый космический корабль с точки зрения космонавта совсем не точка. Он может вращаться вокруг своих осей, чтобы поддерживать ориентацию солнечных батарей относительно Солнца. И здесь снова появляется модель — абсолютно твердое тело (простейший пример — треугольник из жестких стержней). Но и это не все. В корабле есть жидкое топливо, перемещаются космонавты, крутятся вентиляторы.

Появляются модели следующих уровней...

Разумное и обоснованное упрощение приводит к возможности широкого привлечения математики. Г. Галилей (1564–1642) писал: «...Тот, кто хочет решать вопросы естественных наук без помощи математики, ставит неразрешимую задачу. Следует измерять то, что измеримо, и делать измеримым то, что таковым не является...» Уместно вспомнить известное высказывание немецкого философа И. Канта (1724–1804): «...в любом частном уче-

нии можно найти науки в собственном смысле лишь столько, сколько имеется в ней математики...»

И единственным способом проверки верности применяемой для описания изучаемого явления модели могут служить эксперимент или наблюдение. Естественные науки, и в первую очередь физика, являются экспериментальными.

Выдающийся русский (советский) физик, лауреат Нобелевской премии (1978) академик П. Л. Капица (1894–1984), по этому поводу писал: «Я хотел бы, чтобы значение и роль хорошего эксперимента запомнились бы вам в словах шуточного афоризма, принадлежащего героине романа „Джентльмены предпочитают блондинок“ — одного из „классических“ американских произведений: „Любовь — это хорошая вещь, но золотой браслет остается навсегда“. Я думаю, что мы, ученые, можем сказать: „Теория хорошая вещь, но правильный эксперимент остается навсегда“».

Вместе с тем не стоит пренебрегать и теоретическими описаниями. Недаром австрийский физик Л. Больцман (1846–1906) говорил: «...Нет ничего более полезного и практического, чем хорошая теория...»

Однако мы видим, что история науки демонстрирует движение к более глубокому пониманию природы, но не к полному ее объяснению. Природа всегда сложнее и неожиданнее любого объяснения.

Известный физик Е. Вигнер писал в связи с этим в книге «Этюды о симметрии»: «Часто приходится слышать, что цель физики состоит в объяснении природы или, по крайней мере, неживой природы. Что мы понимаем под объяснением? Объяснение — это установление нескольких простых принципов, описывающих свойства того, что подлежит объяснению. Если мы что-то поняли, то поведение этого „что-то“, то есть те явления, которые с ним происходят, не должно удивлять нас какими-либо неожиданностями. Впечатление, что иначе быть не может, не должно покидать нас. Ясно, что в этом смысле физика не претендует на объяснение природы».

Действительно, история развития науки представляет собой цепь непрерывных усложнений, описывающих

все более подробно явления природы, расширяющих области применения физических теорий. Но никогда мы не можем утверждать, что достигли полного понимания природы.

Изучение совершенно обыденных явлений — движения тел, распространения света, поведения газов при изменении температуры или давления и т. п. — привело исследователей к совершенно неожиданному результату. Оказывалось, что в ряде случаев законы природы противоречат нашему обыденному опыту и не укладываются в рамки здравого смысла. Примеры тому: корпускулярно-волновая природа света, пропорциональность массы и энергии, изменение хода времени в движущейся системе, законы микромира и многое другое.

Действительно, к примеру, из нашего обыденного опыта не следует, что ход времени изменяется в движущейся системе. Однако при скоростях, близких к скорости света, это происходит. Так, из теории относительности А. Эйнштейна следует, что интервалы времени между двумя событиями в движущейся со скоростью V (Δt) и неподвижной (Δt_0) системах отсчета будут различны. Напомним, что *системой отсчета* называется тело отсчета, связанная с ним система координат и способ измерения времени (часы). Чем ближе скорость V к скорости света c , тем больше эта разница:

$$\Delta t = \frac{\Delta t_0}{\sqrt{1 - \frac{V^2}{c^2}}}. \quad (2.1).$$

Позже мы вернемся к рассмотрению этих вопросов.

Сейчас нас интересует другое. Каковы принципы, позволяющие проверить правомерность новых представлений, их объективность, независимость от исследователя?

Известен ряд основных принципов, которым не должна противоречить любая новая физическая модель, теория, претендующая на расширенное, по отношению к существующим представлениям, описание явлений природы.

Во-первых — *преемственность*. Так, теория относительности Эйнштейна не только объясняет поведение тел

при скоростях, близких к скорости света, но и содержит в себе сформулированный Галилеем принцип относительности движения. И, кроме того, она предсказывает новые явления природы, неизвестные до сих пор.

Во-вторых — подтверждение результатов теоретических расчетов и моделей экспериментом. Только эксперимент является последним критерием верности либо ошибочности модели, теории. Так, справедливость теории относительности Эйнштейна подтверждена огромным количеством экспериментов, в частности движением элементарных частиц при скоростях, близких к скорости света. Известно, что эта теория стала инженерной наукой, на ее основе проектируются ускорители заряженных частиц.

Чтобы пролить дополнительный свет на то, что представляет собой физика, перечислим то, что не относится к ней.

Астрология, психокинез, колдовство, загробная жизнь, сверхъестественные явления, черная магия, телепатия, летающие тарелки, машина времени, магические пирамиды либо требуют введения сил и взаимодействий, с которыми никогда не сталкивались физики, либо нарушают основные законы физики. Список может быть продолжен. В этом нам активно помогают средства массовой информации.

ВОПРОСЫ ДЛЯ САМОПРОВЕРКИ

1. Как вы понимаете термин «картина мира»?
2. Проанализируйте термин «модель». Чем отличается модель от реального объекта?
3. Для чего применяется моделирование в естественнонаучных исследованиях?
4. Поясните роль математики в современном естествознании.
5. Как развиваются наши представления о природе? Каковы критерии пригодности новых моделей?
6. Можем ли мы получить абсолютно полное знание о природе?

ФИЗИЧЕСКИЕ ВЕЛИЧИНЫ. ИЗМЕРЕНИЯ

При исследовании природы приходится иметь дело с измерениями физических величин.

Под **физической величиной** понимается особенность, свойство, общее в качественном отношении многим физическим явлениям, объектам, физическим системам, их состояниям и т. п., но в количественном отношении индивидуальное для каждого объекта (Советский энциклопедический словарь, 1987). Примерами физических величин служат масса, плотность, интервал времени, вязкость...

Что такое **измерение**? Это последовательность экспериментальных и вычислительных операций, осуществляемая с целью нахождения значения физической величины, характеризующей некоторый объект или явление. Измерение завершается определением степени приближения найденного значения к истинному, неизвестному, значению величины. Чем точнее измерение, тем ближе эти два значения. Измерение, наряду с наблюдением, является основным средством объективного, не зависящего от человека, познания окружающего мира.

Строго говоря, законченное измерение включает несколько элементов. Собственно физический объект (явление), свойство или состояние которого характеризует измеряемая величина; единицу этой величины; технические средства измерений, проградуированные в этих единицах; метод измерения; и, наконец, наблюдателя (регистрирующее устройство), воспринимающего результат измерений. При этом необходимо уметь оценить по-

грешность измерения, определить, насколько далеко измеренное значение от истинного.

Теперь можно проанализировать такой знакомый процесс, как покупку картошки. Хорошо известно, что картошку можно покупать ведрами, килограммами, штуками. Более того — площадями (когда отдают часть убранных вами урожая). И в любом случае мы будем иметь одно и то же — картошку!

Выберем наиболее распространенный способ покупки — взвешивание, то есть в качестве физической величины выбираем *массу* (здесь не место для анализа понятий «масса» и «вес», будем считать, что разница известна). Единица массы — килограмм (в международной системе единиц). Техническое средство измерений — весы и гири, проградуированные соответствующим образом. Метод измерения определяется тем, на каких весах производится взвешивание — рычажных или пружинных (типа динамометра, к ним относятся и электронные весы). С наблюдателем все понятно.

Измерения указанного типа носят название *прямых измерений*: мы непосредственно измеряем некую физическую величину. Однако бывают и *косвенные измерения*. В этом случае измеряются физические величины, от которых некоторым, известным экспериментатору, образом зависит интересующая его величина. К таким измерениям может быть отнесено, например, измерение массы по объему с помощью специально проградуированного кулинарного мерного стакана. Действительно, хозяйка измеряет объем физического тела и сразу определяет массу. Другое дело, что плотность соли, сахара или муки знает изготовитель стакана и наносит на него деления для разных продуктов. Именно поэтому деления для 100 г соли и 100 г муки находятся на разном расстоянии от верха. При этом совершенно не учитывается, что масса единицы объема сахара или соли зависит и от влажности.

Единицы физических величин устанавливаются соглашениями, и каждой из единиц соответствует некоторая образцовая мера — *эталон*. При этом эталоном может служить любая приемлемая для практики мера. Верность выбора той или иной меры в качестве эталона

определяется соответствием этой меры существующему в данный момент уровню техники.

Для примера приведем некоторые старые русские меры длины, массы и объема, часто встречающиеся в русской литературе (и их соответствие современным) и использовавшиеся в течение столетий.

Старые русские меры длины: 1 верста = 500 сажням = 500×3 аршинам = $500 \times 3 \times 16$ вершкам = 1,0668 км. Одновременно существовало другое деление сажени: сажень = 7 футам = 7×12 дюймам = $7 \times 12 \times 10$ линиям = $7 \times 12 \times 12 \times 10 \times 10$ точкам = 2,1336 м.

Старые русские меры объема: 1 бочка = 40 ведрам = 40×10 штофам = $40 \times 10 \times 2$ бутылкам = $40 \times 10 \times 2 \times 5$ чаркам = $40 \times 10 \times 2 \times 5 \times 2$ шкаликам = 491,96 л.

Старые русские меры массы: 1 берковец = 10 пудам = 10×40 фунтам = $10 \times 40 \times 32$ лотам = $10 \times 40 \times 32 \times 3$ золотникам = $10 \times 40 \times 32 \times 3 \times 96$ долям = 163,085 кг.

Видно, что система старых русских мер не имела постоянного, строго определенного коэффициента, характеризующего отношение между единицами измерений. Однако, как указывал еще Д. И. Менделеев, эта система являлась весьма удобной. Например, такие коэффициенты как 12, 16, 32 и 96, делились на большее (по сравнению с современными коэффициентами 10 и 100) количество чисел. Коэффициент 40 давал возможность определять на весах любую массу в пределах пуда при помощи только 4 гирь (1, 3, 9 и 27 фунтов).

Однако метрическая система мер, возникшая во Франции, оказалась более прогрессивной, и еще в 1867 г. Д. И. Менделеев обращался к участникам I съезда русских естествоиспытателей с призывом: «Облегчим... возможность всеобщего распространения метрической системы и чрез то поспособствуем и в этом отношении общей пользе и будущему желанному сближению народов...»

Именно «...желанное сближение народов...», то есть экономические интересы, и являются главным условием согласования единиц измерения. Сегодня соответствующим соглашением основными единицами для измерения длины, массы, времени, температуры выбраны метр, килограмм, секунда и кельвин. Вопрос выбора

основных единиц измерения — это вопрос соглашения мирового сообщества в условиях сложившегося рынка товаров и услуг.

Еще одна проблема, связанная с эталонами единиц измерения, — это точность определения физической величины и воспроизведения эталона.

Первоначально *метр*, (единица длины, характеризующая пространственную протяженность объекта) в метрической системе, был определен через расстояние от Северного полюса до экватора по меридиану, проходившему через Париж (около 10 000 км). В 1889 г. за международный эталон метра приняли расстояние между двумя штрихами на стержне из платиноиридиевого сплава. Сравнение длины тела с эталонным метром проводили при помощи микроскопа с точностью до 2×10^{-7} .

В 1961 г. в качестве эталона метра принята длина волны оранжевого света, испускаемого изотопом криптона (^{86}Kr). Один метр составляет 1 650 763,73 длины волны этого излучения. В 1983 г. на Международной конференции по мерам и весам принято новое определение метра: «Метр — длина пути, проходимого светом в вакууме за $1/2999792458$ долю секунды». Эталон, лежащий в основе измерений макромира, базируется на пространственных характеристиках микромира.

Важнейшей физической величиной является **время**. Что такое время? Как оно понимается современным естествознанием? Этому будет посвящена лекция 6. Здесь мы говорим о времени в практической деятельности человека, об измерениях интервалов времени между двумя последовательными событиями.

Для определения интервала времени могут быть использованы вполне определенные физические законы. Так, период вращения Земли с очень высокой степенью точности должен оставаться постоянным. Однако продолжительность суток подвержена различным влияниям. Поэтому за стандарт выбраны средние солнечные сутки 1900 г.

Из законов физики известно, что период колебаний механического маятника остается постоянным (без учета потерь на трение). То есть движение маятника можно

применить для использования в приборах измерения времени. Точность маятниковых часов со времени изобретения в XVII веке Г. Галилеем и Х. Гюйгенсом (1629–1695) возросла к сегодняшнему дню в тысячи раз и достигает 0,001 с в сутки.

Неизменен и период колебаний кварцевой пластинки, помещенной во внешнее электрическое поле (если постоянны температура и другие внешние условия). То есть генератор с кварцевой стабилизацией частоты можно применять для очень точного отсчета времени. Лучшие кварцевые часы за сутки «уходят» не более чем на 10^{-11} с.

Повышение точности измерений времени связано с использованием физических законов, описывающих периодические процессы в атомах. Появились атомные часы, основанные на неизменности частоты излучения атомов. Секунда определяется как интервал времени, на котором укладывается 9 192 631 830 периодов колебаний излучения, испускаемого атомом изотопа цезия ^{133}Cs .

То есть, как и в случае длины, при измерении больших промежутков времени, мы используем процессы, протекающие в микромире. Специальные экспериментальные системы, созданные в том числе и в России, способны обеспечить работу «часов», убегающих на 1 с за 1 миллион лет.

За единицу массы принята масса одного кубического сантиметра воды определенной чистоты при фиксированных температуре и давлении. Эта единица — **грамм**.

В физических законах масса присутствует в двух разных независимых видах.

С одной стороны, масса является мерой инертности тела: характеризует способность тела изменять характер своего движения под действием внешних сил. Вторым законом Ньютона, связывающий ускорение a , которое приобретает тело под действием силы F , имеет вид

$$a = k \times F, \quad (3.1)$$

здесь $k = 1 / m_{\text{ин}}$ — коэффициент пропорциональности, $m_{\text{ин}}$ — так называемая инертная масса.

С другой стороны, масса тела может быть определена и по силе притяжения, действующей между двумя тела

ми и определяемой законом всемирного тяготения Ньютона. Такая масса $m_{\text{гр}}$ называется гравитационной.

Сила гравитационного взаимодействия (притяжения) между двумя телами, имеющими массы $m_{\text{гр}}$ и M и находящимися на расстоянии R друг от друга, будет равна

$$F = G \times \frac{m_{\text{гр}} M}{R^2}. \quad (3.2)$$

Здесь G — гравитационная постоянная.

Возникает вопрос: равны (эквивалентны) ли инертная и гравитационная массы? Можем ли мы различить, ускоренно движется тело или находится в гравитационном поле другого тела?

Мы уже умеем измерять интервалы времени и длину. Ускорение тела (изменение скорости в единицу времени), необходимое для измерения инертной массы по (3.1), может быть получено только из этих измерений. Сила может быть определена, в простейшем случае, по растяжению пружины динамометра (то есть с помощью линейки). Тогда можно рассуждать следующим образом (что и сделал Галилей, изучая свободное падение тел).

Рассмотрим два тела. При свободном падении вблизи поверхности Земли первое тело с инертной массой $m_{1\text{ин}}$ движется с ускорением $a_{1\text{ин}}$, тогда

$$m_{1\text{ин}} \times a_{1\text{ин}} = G \frac{m_{1\text{гр}} M}{R^2}. \quad (3.3a)$$

Ускорение второго тела определяется соотношением

$$m_{2\text{ин}} \times a_{2\text{ин}} = G \frac{m_{2\text{гр}} M}{R^2}. \quad (3.3b)$$

Здесь M — масса Земли, с которой взаимодействуют тела.

Тогда получим

$$\frac{m_{1\text{ин}} \times a_{1\text{ин}}}{m_{2\text{ин}} \times a_{2\text{ин}}} = \frac{m_{1\text{гр}}}{m_{2\text{гр}}}. \quad (3.4)$$

Если все тела около Земли имеют одно ускорение g ($g = a_1 = a_2$), то отношения инертных масс будут равны отношениям гравитационных масс. То есть, если у какого-либо

тела эти массы пропорциональны, то они будут пропорциональны и для всех других тел.

И. Ньютону (1643–1727) удалось установить, что коэффициент пропорциональности равен 1 с точностью до 0,001. В начале XX века точность была повышена до 10^{-8} . В 1964 году — улучшена еще на три порядка. В настоящее время с помощью исследований, проведенных на искусственных спутниках Земли, совпадение инертной и гравитационной масс установлено с точностью до 10^{-16} .

То есть гравитационная и инертная массы в пределах точности современного эксперимента совпадают, нет способа их отличить. Этот факт носит название **принципа эквивалентности**. Но как обстоят дела за пределами точности эксперимента? Вопрос об эквивалентности инертной и гравитационной масс является предметом обсуждения физиков и сегодня.

Из семи основных величин международной системы единиц СИ четыре — масса, длина, время и температура — неразрывно связаны с человеческой деятельностью, поэтому удивительно, что одна из этих величин, **температура**, оставалась непонятой практически до начала XVIII в. И понадобилось еще 100 лет для формулировки приемлемого определения температуры.

Действительно, даже сегодня, пользуясь термометром, далеко не все могут сказать, что же они измеряют.

Если мы говорим об измерении давления, то понимаем, что оно определяется силой, действующей на единицу площади. Чем больше сила, тем больше (при тех же исходных условиях) давление. А силу легко измерить, используя те или иные физические законы. Мы можем измерить такую характеристику, как плотность, и сравнить ее с плотностью другого тела. Температура же, воспринимаемая нашими органами чувств, является характеристикой весьма расплывчатой. Так, понятия «тепло» и «холодно» субъективны. Они определяются, в частности, состоянием человека.

Проведем эксперимент. Возьмите в руку кусок дерева и кусок металла (или коснитесь металлической и пластмассовой или деревянной поверхности). Какой из них холоднее? Сотни студентов отвечали — металл. Но ведь исходная температура у кусков одинакова. Почему же по-

верхность дерева кажется теплее, чем металлическая? Это связано с тем, что материалы имеют разные теплофизические свойства (теплоемкость и теплопроводность). Из-за большой теплопроводности металла тепло эффективнее отводится от ладони, что субъективно воспринимается как снижение температуры. Кроме того, проявляются и особенности передачи ощущения тепла в организме человека.

Среди характеристик, описывающих состояние систем, находящихся в тепловом равновесии (отсутствуют потоки энергии), имеется одна, обладающая особым свойством принимать одинаковое значение в различных системах. Она и называется температурой.

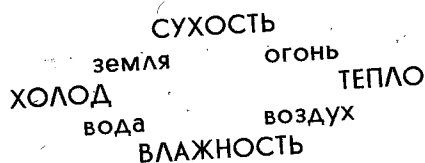
Все системы, находящиеся в тепловом равновесии друг с другом, обладают одинаковой температурой. Наоборот, все системы, имеющие одинаковую температуру, будучи приведены в тепловой контакт, окажутся в тепловом равновесии друг с другом. При измерении температуры одна из этих систем — термометр.

Состояние теплового равновесия систем однозначно характеризуется значениями параметров состояния — давления, объема и температуры.

Для расшифровки смысла понятия «температура» потребовалось длительное время. Была создана термодинамика — наука об общих свойствах систем, находящихся в состоянии теплового равновесия, и процессах перехода между этими состояниями. Позже появилась статистическая механика — наука о свойствах систем, состоящих из большого числа одинаковых частиц.

В основе представлений о температуре к началу XVII в. лежали медицинские трактаты древнеримского врача К. Галена (ок. 130 — ок. 200). Заметим, что почти за два тысячелетия эти представления не изменились, хотя цивилизация ушла далеко в своих знаниях об окружающем мире, развивались ремесла и медицина.

Клиническая термометрия Галена основывалась на идеях Аристотеля: основными началами природы являются абстрактные «принципы» — *холод, тепло, сухость и влажность*. Комбинируя их попарно и наделяя ими «первичную материю», Аристотель выводил четыре «основных элемента» — *землю, огонь, воздух и воду*.



Это давало Галену основания считать, что люди различаются по соотношению тепла, холода, влажности и сухости. Он использовал эталон «нейтральной температуры» — смесь равных частей кипящей воды и льда (просто подсчитать, что температура такой смеси будет около 10°C). При этом кипящей воде приписывалось четыре градуса (никакого отношения к используемым нами градусам) тепла, льду — четыре градуса холода и нуль — температуре смеси. В то время, вероятно, и появился термин *temperatura* (лат.) — смешивание в должном отношении.

Более чем через двенадцать (!) столетий, в 1578 году, врач Хаслер Бернский, следуя Галену, приписывал своим лекарственным смесям различные градусы тепла и холода. Для составления своих рецептов он использовал температурную шкалу Галена. По его мнению, жители экваториальных областей имеют четыре градуса тепла, а жители полярных районов — четыре градуса холода. На основании места жительства пациента и составляли смеси лекарств.

В то время не существовало прибора, который можно было бы назвать термометром.

Принято считать, что в 1592 году Галилей обратил внимание на связь между объемом воздуха в замкнутом сосуде и степенью его нагретости — температурой, и предложил устройство для ее измерения — воздушный термометр. Заметим, что свойство воздуха расширяться при нагревании было известно еще во II столетии до нашей эры. Вот роль великого человека — видеть новое в известном!

В XVII веке воздушный термометр стал известным прибором. Воздух в этом приборе являлся термометрическим телом, объектом, по изменению характеристик которого определяли температуру. Обратим внимание на

то, что в воздушном термометре мы измеряем объем, то есть пространственную характеристику.

В 1632 году английский биолог Д. Рей (1627–1705) предложил использовать в качестве термометрического тела жидкость — появился первый жидкостный термометр.

Таким образом, к середине XVII века в распоряжении ученых имелись весьма точные приборы для измерения температуры, но не было понятно, что это такое. Не было основы для возможности сравнения показаний различных термометров (имеющих разные размеры, заполненных разными жидкостями) — температурной шкалы.

Первая такая шкала была создана английским естествоиспытателем Р. Гуком (1635–1703). Она распространялась от -7 градусов (соответствующих наибольшему зимнему холоду в Лондоне) до $+13$ градусов (максимальная летняя жара). Эта шкала получила название шкалы Королевского общества. Создание температурной шкалы позволило вести первые количественные метеорологические наблюдения (вновь заметим, что эти градусы не имеют никакого отношения к сегодняшним).

В 1709–1714 годах немецкий физик Г. Д. Фаренгейт (1686–1736) изготовил термометры с ртутью и спиртом. Кроме того, он разработал метод создания температурной шкалы, основанный на двух фиксированных точках с разбиением интервала между ними на удобное число делений. В конце концов, он предложил шкалу, в которой одной из фиксированных точек была температура тела человека (96°), а второй — температура таяния льда (32°). Появилась температурная шкала Фаренгейта, принятая сегодня в ряде стран, в том числе в США.

В 1730 году французский естествоиспытатель Р. А. Реомюр (1683–1757) создал температурную шкалу, в которой за начало отсчета выбрана температура таяния льда. При изменении температуры на один градус объем спирта менялся на $0,1\%$. Точка кипения воды приходится в этой шкале на 80° . Шкала Реомюра используется иногда и сегодня. Именно Реомюр в 1734 году первым понял, что термометры со спиртом и ртутью дают разные показания и имеют различные шкалы. То есть показания термометра зависят от *термометрического тела*.

Шведский астроном и физик А. Цельсий (1701–1744) предложил в 1742 году за нуль температурной шкалы принять точку кипения воды при нормальном давлении, а за 100 — точку таяния льда. Шведский естествоиспытатель К. Линней (1707–1778) переставил точки 0 и 100 на шкале Цельсия. И сегодня мы используем эту шкалу в своей обыденной жизни. Один градус по Фаренгейту равен $5/9$ градуса по Цельсию.

В это же время француз Г. Амонтон (1663–1705) пришел к выводу, что самая низкая температура должна соответствовать нулевому давлению газа. Созданная им температурная шкала имела значительно более глубокий физический смысл, чем наиболее известная в то время шкала Фаренгейта.

Таким образом, возникли два направления в термометрии. Первое связано с созданием все более точных и удобных практических шкал, построенных по принципу, заложенному Фаренгейтом (таблица 3.1). Второе направлено на развитие газовой термометрии и физики тепловых процессов (термодинамики), создание *абсолютной термодинамической шкалы температуры* (шкалы Кельвина). Именно эта температурная шкала определяется не произвольным, пусть и удачным, выбором исследователя, а природой физических процессов.

Первый путь привел к созданию приборов для измерения температуры (термометров сопротивления, термо-

Таблица 3.1

Сопоставление температурных шкал

Реперная точка	Температурная шкала Цельсия, °C	Температурная шкала Фаренгейта, °F	Абсолютная шкала температур, K
Тройная точка воды (равновесие льда, воды и водяного пара при нормальном давлении 760 мм рт. ст.)	0	32	273,15
Температура кипения воды	100	212	373,15
Абсолютный нуль температуры	-273,15	-459	0

пар и т. п.). Второй — к пониманию физических процессов в газах, формированию представлений о том, что же такое температура. К концу XIX века сформировались современные представления о температуре, стало ясно, что температура системы большого числа частиц, находящихся в тепловом равновесии, определяется кинетической энергией частиц.

Применяя для определения таких понятий, как время, длина, масса, физические законы, мы не можем быть до конца уверены в абсолютной правильности этих законов во всей Вселенной и в любой момент существования Вселенной.

На самом деле, предположим, что скорость света постепенно меняется со временем. Это должно привести к изменению принятых эталонов длины и времени. Сегодня не существует никаких экспериментальных свидетельств изменения физических констант со временем, однако это не исключает возможности их очень медленного изменения за пределами существующей точности измерений.

Точность измерений, какова она должна быть? Если приятель опаздывает на несколько минут — неприятно, но можно простить. Но пусть наша система измерения времени обеспечивает стыковку космических аппаратов. Их скорость относительно поверхности Земли около 8000 м/с. Тогда при ошибке в определении времени 0,001 с ошибка в пространстве составит, по крайней мере, 8 м. С другой стороны, при определении точности, необходимой в каждом конкретном случае, встает и вопрос о стоимости измерительной системы. Стоимость возрастает быстрее точности.

В 1927 году В. Гейзенберг (1901–1976) сформулировал принцип неопределенности, утверждающий, что любая физическая система не может находиться в состояниях, в которых координаты ее центра масс и скорости (или импульс — произведение скорости на массу) принимают одновременно вполне определенные точные значения. Если Δx — погрешность (неопределенность) значения координаты, а Δp — неопределенность значения импульса, то их произведение не должно быть меньше некоторой постоянной величины (постоянной Планка $\hbar$):

$$\Delta p \times \Delta x \approx \hbar. \quad (3.5)$$

Принцип неопределенности существует для явлений микромира. Именно он определяет естественный предел точности измерений. Кроме того, в микромире оказывается принципиальным и то, что любое измерение — это взаимодействие изучаемого объекта с измерительным прибором. И при измерениях прибор вносит изменения в изучаемый объект. В лекции 7 мы подробнее рассмотрим этот вопрос.

ВОПРОСЫ ДЛЯ САМОПРОВЕРКИ

1. Вы пришли в магазин покупать ткань. Проанализируйте этот процесс с точки зрения представлений об измерении.
2. Насколько корректны сочетания «космический холод» или «космическая жара», часто используемые журналистами?
3. Все знают об известной винтовке «трехлинейке». Каков ее калибр в миллиметрах?
4. Перечислите измерительные приборы, которыми вы пользуетесь в быту. Что вы можете сказать об их точности? Надо ли ее увеличивать? Какова будет стоимость этого?
5. Оцените, на сколько «убегут» самые точные маятниковые и кварцевые часы за 1 год. А ваши часы?

ЛЕКЦИЯ ЧЕТВЕРТАЯ

СИЛЫ В ПРИРОДЕ. ФУНДАМЕНТАЛЬНЫЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ

В основе всяких природных явлений лежат силы. Постоянно мы сталкиваемся с силами трения, упругости. Живем в поле силы тяжести, магнитном поле Земли, электромагнитных полях естественного и искусственного происхождения. Электронный пучок в телевизоре или мониторе компьютера отклоняется силами электрических и магнитных полей. Мы окружены проводами, по которым течет переменный ток. Все эти и многие другие силы определяются тем или иным типом взаимодействий. И, несмотря на кажущееся множество сил в природе, до сих пор обнаружено лишь **четыре вида фундаментальных взаимодействий**.

Фундаментальные взаимодействия связаны с разными источниками и существенны на разных расстояниях

Таблица 4.1

Фундаментальные взаимодействия

Тип взаимодействия	Источник взаимодействия	Относительная интенсивность взаимодействия	Радиус действия силы
Гравитационное	Масса	$\sim 10^{-38}$	Сколько угодно далеко
Слабое	Все элементарные частицы	$\sim 10^{-15}$	$< 10^{-18}$ м
Электромагнитное	Электрические заряды	$\sim 10^{-2}$	Сколько угодно далеко
Ядерное (сильное)	Адроны (протоны, нейтроны, мезоны)	1	$\sim 10^{-15}$ м

от источника (таблица 4.1). Радиус влияния дальнедействующих взаимодействий охватывает Вселенную, короткодействующие взаимодействия заметны лишь в пределах атомного ядра. Но и те и другие определяют существование нашего мира.

Физике XVIII века было известно только гравитационное взаимодействие. По закону всемирного тяготения, сформулированному Ньютоном в книге «Математические начала натуральной философии» (1687), две материальные частицы притягиваются друг к другу с силой, прямо пропорциональной произведению масс и обратно пропорциональной квадрату расстояния между ними. Коэффициент пропорциональности G называется **гравитационной постоянной**. Числовое значение этого коэффициента было впервые определено Г. Кавендишем (1731–1810) в 1798 г. по измерению силы притяжения двух массивных шаров. Согласно современным данным, $G = 6,6745 \times 10^{-11} \text{ м}^3/\text{кг с}^2$. Гравитационные силы действуют на все объекты Вселенной, от галактик до элементарных частиц.

Ньютоновская теория тяготения явилась величайшим достижением естествознания. Она позволила с большой точностью описать обширный круг явлений: движение тел Солнечной системы, поведение галактик, звездных скоплений, предсказать существование таких планет, как Нептун и Плутон.

Отметим, что современные представления о Вселенной и микромире позволяют утверждать, что гравитационная постоянная является универсальной, фундаментальной величиной, ее значение одинаково во всех доступных для наблюдения точках Вселенной. Именно это значение определяет фундаментальное гравитационное взаимодействие.

Согласно закону всемирного тяготения (3.2), сила зависит только от взаимного положения тел в данный момент времени, то есть гравитационное взаимодействие распространяется мгновенно. Сегодня мы знаем, что это не так. Скорость распространения любого взаимодействия не может превышать скорость света.

При создании общей теории относительности для объяснения стационарности (как считалось в начале

XX века) Вселенной А. Эйнштейн предположил, что массы не только притягиваются, но и отталкиваются, причем эффект отталкивания проявляется только в масштабах Вселенной:

$$F_{\text{косм}} \sim \text{LRM}. \quad (4.1)$$

Сила космологического отталкивания $F_{\text{косм}}$ (4.1) должна быть пропорциональна расстоянию R между взаимодействующими массами и массе M отталкиваемого тела (но никак не связана с массой отталкивающего тела!). По оценкам постоянная L , определяющая отталкивание (4.1), будет в 10^{25} раз слабее гравитационного притяжения (3.2). Для двух галактик с массами 10^{41} кг, находящихся на расстоянии 10^{22} м (около 10 миллионов световых лет) гравитационное притяжение (3.2) и космологическое отталкивание (4.1) будут примерно равны. После обнаружения факта расширения Вселенной (лекция 10) о предложенном Эйнштейном космологическом взаимодействии забыли. Но сегодня наблюдения за мегамиром обнаружили некий порядок в расположении звезд и Галактик. Существует ли космологическое, определяющее крупномасштабную структуру Вселенной, взаимодействие? Фактов, доказывающих это, нет. Как нет и фактов, отвергающих возможность его существования.

Простейшие электрические и магнитные явления были известны в древние времена — янтарь, потертый о шерсть, притягивал легкие предметы, куски железной руды притягивали железо и друг друга. Но только в 1600 году У. Гильберт впервые разграничил электрические и магнитные явления. В XVII веке появилось понятие электрического заряда. Закон, определяющий силу, с которой взаимодействуют неподвижные точечные заряды, был сформулирован (в 1773 г., результаты опубликованы лишь в 1879 г.) Г. Кавендишем (1731–1810) и (в 1785 г.) Ш. Кулоном (1736–1806) и носит название закона Кулона. В соответствии с этим законом два точечных заряда Q , расположенные на расстоянии R друг от друга, взаимодействуют с силой F :

$$F = \frac{1}{4\pi\epsilon} \frac{Q_1 Q_2}{R^2}. \quad (4.2)$$

При этом направление действия силы (притяжение или отталкивание) зависит от такой характеристики взаимодействующих зарядов, как знак (положительный или отрицательный). Разноименные заряды притягиваются, а одноименные — отталкиваются.

Сила электростатического взаимодействия (4.2) зависит от универсальной постоянной — **заряда электрона**. Электрон (открыт в 1897 г. Дж. Томсоном, 1856–1940) является материальной частицей, носителем наименьшей массы и наименьшего электрического заряда. Заряды Q , входящие в (4.2), кратны заряду электрона. Интенсивность электромагнитного взаимодействия зависит от так называемой *постоянной тонкой структуры* $e^2/\hbar c = 1/137$. Три фундаментальные постоянные — скорость света c , постоянная Планка $\hbar$ и заряд электрона e — связаны друг с другом!

Магнитные силы порождаются движением электрических зарядов, электрическими токами. Это стало ясно в 1820 году после фундаментального открытия датского физика Х. Эрстеда (1777–1851), выявившего действие электрического тока на магнитную стрелку. В том же году А. М. Ампер (1775–1836) открыл закон взаимодействия электрических токов. Мы знаем, что любой магнит имеет два полюса (условно называемые *северным* и *южным*). Однако существуют теории, показывающие возможность полной симметрии электростатического (покоящиеся электрические заряды) и магнитостатического (покоящиеся магнитные заряды) взаимодействий. Магнитного заряда (так называемого монополя) не обнаружено.

Ускоренно движущиеся заряженные частицы отдают энергию в виде электромагнитного излучения. Электромагнитное излучение, имеющее длины волн от 400×10^{-9} до 800×10^{-9} м, воспринимается нами как видимый свет (границы этого диапазона индивидуальны, слегка различаются для разных людей). Телевизионные станции вещают в диапазоне метровых и дециметровых волн. Рентгеновские лучи имеют длины волн менее $0,5 \times 10^{-9}$ м.

Электромагнитное взаимодействие определяет структуру и поведение атомов, отвечает за связи между моле-

кулами (то есть определяет химические и биологические процессы).

Если гравитационное и электромагнитное взаимодействия являются *дальнодействующими*, распространяющимися на всю Вселенную, то слабое и сильное взаимодействия проявляются только в пределах атомного ядра и являются *короткодействующими*.

Частицы, входящие в состав атомного ядра, протоны и нейтроны (обобщающее название — нуклоны), удерживаются ядерными силами. Природа этих сил стала ясна относительно недавно. Японский физик Х. Юкава (1907–1981) в 1935 году для объяснения *сильного взаимодействия* нуклонов предложил теорию мезонного поля, основанную на обмене нуклонов мезонами (имеющими массу 273 электронов, обнаружены в 1947 году). Ядерные силы возрастают при сближении нуклонов. На расстояниях меньше или порядка 10^{-15} м эти силы значительно превышают электромагнитные. Именно поэтому протоны, входящие в состав ядра, не разлетаются. Этим объясняется малый размер ядра ($\sim 10^{-15}$ м) по сравнению с размером атома ($\sim 10^{-10}$ м). Силы электромагнитного взаимодействия оказываются существенными на расстояниях, превышающих 10^{-10} м. Сильные взаимодействия определяют течение ядерных реакций, особенно — термоядерного синтеза.

Слабое взаимодействие ответственно за многие ядерные процессы, например такие, как превращение нейтронов в протоны. Основные свойства слабого взаимодействия стали известны еще в 1931 году, в основном, благодаря работам Э. Ферми (1901–1954). Из-за слабого взаимодействия свободный нейтрон может существовать не более 10 минут и распадается на протон, электрон и антинейтрино с выделением некоторой энергии (1 миллион эВ). Напомним, что 1 эВ (электрон-вольт) равен энергии, которую имеет электрон, ускоренный разностью потенциалов 1 В.

Видно, что перечень известных на сегодняшний момент взаимодействий не всегда был таким. Гравитационное взаимодействие открыто в XVII веке, электромагнитное — в XIX веке. Слабое и сильное — в середине XX века. И не ясно, исчерпываются ли ими все взаимодействия в природе.

Если элементарные частицы и их взаимодействия являются действительно фундаментальными, они должны объяснять наблюдаемые явления не только микромира, но и макромира. Насколько это известно сегодня, поведение звезд и галактик описывается теми же физическими законами, что и поведение элементарных частиц. Своими корнями уходят в физику и химия, и биология.

При изучении самых простых явлений физики пытаются найти и выделить закономерности и общие правила, выявить области применения правил, применить их к более сложным (или иным) системам. Так можно перейти от механического упорядоченного движения к хаотическому (тепловому). От него — к микроструктуре вещества. Таким образом, огромная и сложная Вселенная представляется в виде совокупности элементарных частиц, взаимодействующих только четырьмя возможными способами и подчиняющихся небольшому количеству фундаментальных законов.

Окружающий нас мир, все существующее вокруг нас и обнаруживаемое с помощью ощущений, представляет собой материю. По определению философа и политика В. И. Ленина, **материя** — философская категория для обозначения объективной реальности, отображаемой нашими ощущениями и существующая независимо от них. Это определение может не быть исчерпывающим. Но на сегодня оно отражает описываемое понятие. В классических представлениях в естествознании различают два вида материи — *вещество* и *поле*.

Что такое поле? Поле определяется через силы, действующие на некоторый пробный, выбранный нами объект (заряд, массу), помещенный в данную точку пространства. Пространство непрерывно. В каждой его точке эта сила имеет вполне определенное значение, считающееся характеристикой поля. При этом переход от точки к точке непрерывный и плавный.

Важным свойством поля является непрерывность его характеристик. Именно непрерывность позволяет эффективно применять математические методы для описания физических характеристик разнообразных объектов. К настоящему времени известно несколько физических по-

лей, соответствующих типам взаимодействий, — электромагнитное и гравитационное поля, поле ядерных сил, волновые поля элементарных частиц.

Мы говорили о взаимодействиях, не задав принципиального вопроса: каким образом одно из взаимодействующих тел «чувствует» присутствие другого?

Долгое время считали, что взаимодействие между телами осуществляется непосредственно через пустое пространство, не принимающее участие в передаче взаимодействия. При этом передача взаимодействия происходит мгновенно. Это предположение составляет сущность концепции *дальнодействия*, составлявшую основу классической физики до конца XIX века.

Экспериментальные исследования электромагнитных явлений (самых удобных и доступных для изучения) показали, что изменение положения одной из заряженных частиц не ведет к мгновенному изменению положения (и действующих на нее сил) другой. То есть существует некая среда, передающая взаимодействие. Эта среда получила название электромагнитного поля. Скорость распространения электромагнитного поля равна скорости света в пустоте. Это и составляет сущность концепции *близкодействия*, имеющей отношение и к другим физическим полям.

Современные представления дают основания к веществу и полю добавить **третий вид материи** — *физический вакуум*.

В неживой природе постоянно открывают все новые и новые субатомные частицы, многие детали их поведения остаются неясными. Где предел дробления вещества и существует ли он? Что такое физический вакуум? Пустота? Но пустота — это когда ничего нет. А что такое *ничего*?

С точки зрения техники *вакуум* (лат. *vacuum* — пустота) — состояние газа, когда длина пробега молекул между последовательными столкновениями становится меньше характерных размеров сосуда. То есть, возможна передача энергии не от молекулы к молекуле, а от одной стенки сосуда к другой. Именно поэтому пористые вещества — поролон, обожженная глина, вата и т. п. — являются хорошими теплоизоляторами.

В абсолютно пустом сосуде (достичь такого состояния невозможно) остается поле и, оказывается, в физическом вакууме могут *виртуально*, на некоторый промежуток времени, рождаться пары: частица и античастица, электрон и дырка (позитрон). При этом выполняются, в общем, законы сохранения. Как исследовать эти состояния? Насколько виртуальные частицы отличаются от реальных? Это проблемы современного естествознания.

Мы практически ничего не знаем о происхождении Вселенной. Мало что знаем о Земле, об особенностях формирования климата, внутреннем строении, составе пород. Почему мир именно таков, каково будущее этого мира?

В живой природе круг неясного еще шире. Как формируется из неживого живое? Как работает клетка? Почему различаются симметрии живой и неживой природы? Неживая природа симметрична, а живая — асимметрична.

Бесконечная цепь вопросов. Разрешение одних ведет к появлению новых.

ВОПРОСЫ ДЛЯ САМОПРОВЕРКИ

1. Какие виды взаимодействий в природе вам известны? Какие взаимодействия отвечают за такие процессы, как плавание, скатывание с горки, телевидение, гром, деление клеток, источник энергии звезд, полет птицы, полет самолета?
2. Как вы считаете, почему последовательность обнаружения взаимодействий была именно такой?
3. Что такое «фундаментальные постоянные»? Приведите примеры таких постоянных.
4. В чем сущность концепций близкодействия и дальнего действия?
5. Как сказывается конечность скорости света на концепции близкодействия?
6. Почему понятие «поле» получило развитие после открытия электромагнитных сил?
7. Что такое пустота или вакуум? Поясните понятие «физический вакуум».

ЛЕКЦИЯ ПЯТАЯ

ПРОСТРАНСТВО

Представления о пространстве формировались по мере освоения человеком жизненно необходимых территорий. Действительно, древнейшая область математики — геометрия (греч. *geometria* — землемерие) — зародилась как наука о способах измерения площадей, объемов, расстояний. В первой книге «Начал» (а всего их 15) Евклид еще в III веке до нашей эры предпринял попытку систематизации научных знаний по геометрии и определил те объекты, с которыми она работает:

- точка есть то, что не имеет частей;
- линия есть длина без ширины;
- прямая есть такая линия, которая одинаково расположена относительно своих частей;
- поверхность есть то, что имеет только длину и ширину;
- плоскость есть поверхность, которая одинаково расположена по отношению ко всем прямым, лежащим в этой плоскости.

Термины «не имеет частей», «ширина», «длина», «одинаково расположена» — скорее, характеристики окружающего физического мира, чем строгие математические определения. Они выявляют некоторые характерные свойства реальных объектов: натянутой струны или луча света, гладкой поверхности и т. п.

Наряду с этими определениями Евклид приводит и список геометрических постулатов, на которых в течение тысячелетий базировались представления о пространстве.

1. Требуется, чтобы от любой точки до любой другой точки можно было провести прямую.

2. И чтобы любую (ограниченную) прямую можно было продолжить.

3. И чтобы из любого центра можно было описать окружность любого радиуса.

4. И чтобы все прямые углы были равны.

5. Если две прямые пересечены третьей, то они пересекаются в той полуплоскости относительно секущей, где сумма односторонних внутренних углов меньше двух прямых.

Пятому постулату, объекту особо пристального и критического внимания, существует несколько эквивалентов. Один из них говорит, что сумма внутренних углов треугольника равна 180° . Но возникает вопрос: Евклидово ли пространство, в котором мы находимся? Не искривлено ли оно? Не пересекутся ли параллельные линии на бесконечности? Всегда ли сумма углов треугольника 180° ?

Действительно, представим себе две линии, проведенные на поверхности сферы. Они могут замкнуть часть пространства. То есть возникает вопрос: что такое прямая в физическом мире? Иначе говоря: как построить действительности прямую линию?

Ответ может быть прост. Возьмем луч света. Луч света — прямая линия, но только в однородном пространстве. Свет испытывает преломление, связанное с неоднородностью среды, по которой распространяется. Например, известны миражи в неоднородно нагретом воздухе, другие оптические эффекты.

В XIX веке Н. И. Лобачевский (1792–1856) и Я. Бойяи (Большай) (1802–1860) показали, что можно построить замкнутую геометрическую систему, в которой через данную точку может проходить несколько прямых, параллельных заданной. Это была новая геометрия, построенная на постулатах, отличных от предложенных Евклидом. Именно они подготовили расширение понятий пространства и едином пространстве-времени в физике.

Примерно тогда же появилась геометрия Г. Ф. Б. Римана (1826–1866) — геометрия на сфере. В ней не может существовать ни одной прямой, параллельной заданной. Прямые здесь определяются как линии, проходящие через полюса сферы.

Как же все-таки определить, в каком пространстве мы живем, какой геометрией оно описывается?

Возможно, что проще всего это сделать, измерив углы большого треугольника. В геометрии Евклида сумма углов треугольника 180° , в геометрии Римана — больше 180° , в геометрии Лобачевского — меньше 180° .

Эксперименты по измерению углов треугольников в пространстве на больших базах были проведены К. Ф. Гауссом (1777–1855). Он с помощью геодезических приборов измерял углы треугольника, построенного на вершинах гор при расстоянии между ними около 100 км. Отклонений суммы углов от 180° не было обнаружено.

Лобачевский измерял углы треугольника, основание которого совпадало с диаметром земной орбиты, а вершина находилась в месте положения яркой звезды (Сириуса). Отклонений суммы углов от 180° не было обнаружено.

Но пусть мы выберем какой-то иной треугольник, произведем аналогичные описанным измерения и обнаружим, что сумма углов отличается от 180° . Можем ли мы тогда сделать однозначный вывод: пространство не подчиняется геометрии Евклида? Нет.

Действительно, откуда нам известно, что лучи света прямые? Может, они искривлены и не обладают свойствами Евклидовых прямых. Или проходят через неоднородное пространство и искривляются.

Живя на сфере и имея дело с линиями на поверхности сферы, мы, не задумываясь, используем геометрию Евклида в практической деятельности.

Вопрос, является ли наше пространство Евклидовым, не имеет ответа. Если мы договоримся, что лучи света распространяются по прямым линиям, а затем обнаружим, что сумма углов треугольника, образованных этими лучами, отличается от 180° , можно считать, что наш выбор данных лучей как прямых был неудачен, и попытаться заменить их чем-то другим. Именно эта возможность и является источником трудностей, связанных с выяснением вопроса: Евклидово ли пространство?

В теории тяготения Ньютона считается, что пространство Евклидово, а частицы двигаются криволинейно только под действием сил.

В общей теории относительности Эйнштейна предполагается, что единое пространство-время неевклидово, а частицы перемещаются вдоль путей, которые при заданной кривизне пространства совпадают с кратчайшими расстояниями между любыми двумя точками.

Эти воззрения принципиально различны.

Однако результаты обеих теорий в большинстве случаев совпадают. Это еще раз доказывает условность выбора точки зрения на геометрию пространства. Этот выбор — плод человеческой мысли. Его адекватность реальности проверяется по тому, насколько успешно оно объясняет наблюдаемые явления природы.

Способы описания пространства и объектов в пространстве развиваются и сегодня.

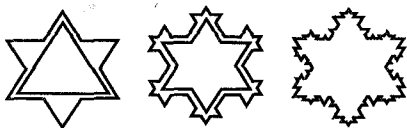
Так, мы хорошо знаем, что линия имеет размерность (т. е. число координат, необходимых для определения положения лежащей на этой фигуре точки) 1, плоскость — размерность 2, тело — размерность 3. Но можем ли мы представить себе множество с размерностью $3/2$?

В 1919 году немецкий математик Ф. Хаусдорф (1868–1942) математически строго определил такое пространство. В 1975 году математик Ш. Мандельброт (1899–1983) назвал пространства с дробной размерностью фрактальными (от англ. fraction — дробь). Сопоставляя классическую геометрию с новой, фрактальной, он писал: «...Почему геометрию часто называют холодной и сухой? Одна из причин заключается в ее неспособности описать форму облака, горы, дерева или берега моря. Облака — это не сферы, линии берега — это не окружность, и кора не является гладкой, и молния не распространяется по прямой. Природа демонстрирует нам не просто более высокую степень, а совсем другой уровень сложности. Число различных масштабов длин в структурах всегда бесконечно. Существование этих структур бросает нам вызов в виде трудной задачи изучения тех форм, которые Евклид отбросил как бесформенные, — задачи исследования морфологии аморфного...»

Простейшим примером объекта, описываемого с помощью новой геометрии, является снежинка, открытая Г. Кох в 1904 г. (рис. 5.1). Из рисунка видно, как «рас-

Рис. 5.1
Снежинка Кох

Демонстрирует, как конечную площадь можно охватить бесконечной (в пределе) замкнутой линией.



тет» снежинка, ее рост ничем не ограничен. При этом, в пределе, *конечная* площадь будет охвачена *бесконечной* линией! Итальянский математик Э. Чезаро (1859–1906), удивленный внутренней бесконечностью и самоподобием снежинки Кох, писал в 1905 году: «Если бы она была одарена жизнью, то можно было бы лишить ее жизни, только уничтожив кривую в целом, в противном случае она возрождалась бы снова и снова из глубины своих треугольников, как это делает жизнь во Вселенной».

Заметим, что представления о фрактальных пространствах были введены формально, безотносительно к каким-либо физическим объектам. Сегодня же стало ясно, что использование аппарата фрактальной геометрии позволяет эффективно описывать разнообразные физические явления: свойства поверхности кристаллов, процессы в магнитных материалах, образование новых материалов при внешних воздействиях и др. При этом возникает некоторая проблема: в математике нет предела делимости, есть понятие бесконечности. В природе бесконечность отсутствует. При рассмотрении, например, поверхности кристалла пределом делимости будет размер атома.

Приведем *определения пространства*, даваемые математикой и физикой. Сравните их. В современной математике пространство определяют как множество каких-либо объектов, которые называют его точками. Ими могут быть геометрические фигуры, функции, состояния физической системы и т. д. Рассматривая их множество как пространство, отвлекаются от всяких их свойств и учитывают только те свойства их совокупности, которые определяются принятыми во внимание или введенными (по определению) отношениями. Эти отношения между точками и теми или иными фигурами, то есть множествами точек, определяют «геометрию» (Математика // Большой энциклопедический словарь. М., 1998). Физический энциклопедический словарь (М., 1983) дает следующее

определение: «...пространство выражает порядок сосуществования отдельных объектов, *время* — порядок смены явлений...»

В завершение приведем высказывание одного из современных математиков француза А. Гротендика (род. 1928): «...быть может, наступает пора извлечь на свет... аксиому, по умолчанию принятую среди физиков со времен античности, глубоко укоренившуюся в самом способе нашего восприятия пространства: аксиому, утверждающую непрерывность природы пространства и времени (или пространства-времени), „места“, где происходят события, которые изучает физика... листая скромный томик, заключающий полное собрание трудов Римана, я был поражен замечанием, брошенным им мимоходом. Согласно ему, вполне могло бы случиться, что структура пространства, в конце концов, дискретна и что «непрерывные» ее модели, нами изготавливаемые, представляют собой упрощение (возможно, чрезмерное...) более сложной действительности. Для человеческого разума „непрерывное“ уловить легче, чем „разрывное“, так что первое служит нам приближением, помогающим понять второе».

ВОПРОСЫ ДЛЯ САМОПРОВЕРКИ

1. Попробуйте дать определение понятия «пространство». Как понимают его разные науки?
2. Каким способом мы измеряем пространство? Как выявить геометрию пространства?
3. Приведите примеры субъективного восприятия пространства. Как пространство воспринимается в живописи, архитектуре, скульптуре?

ЛЕКЦИЯ ШЕСТАЯ

ВРЕМЯ

В «Исповеди» Августина (354–430), христианского теолога и церковного деятеля, есть слова: «Если меня никто об этом не спрашивает, я знаю, что такое время. Если бы я захотел объяснить спрашивающему, нет, не знаю...»

Существует довольно много подходов к описанию явлений и событий во времени. Этим занимается, в частности, **хронология**, имеющая дело с разделением времени на регулярные периоды, с расположением событий в порядке их возникновения, с установлением соответствия дат к известным событиям, с выявлением несоответствий в датах, вызванных различием в системах, применяемых в древности и сегодня.

Астрономическая хронология основана на астрономических явлениях и законах. Даты астрономических явлений могут быть определены весьма точно математическими вычислениями. Дата исторического случая могла быть установлена или проверена с высокой точностью, если событие сопровождалось астрономическим явлением (типа солнечного затмения).

Во многих случаях астрономическая хронология используется для проверки или уточнения дат. Так, солнечное затмение было причиной прекращения сражения между мидийцами и персами. Такое затмение должно было произойти 28 мая 585 года до нашей эры. Шотландская история демонстрирует другой случай: когда король Норвегии Хекон IV (Старый) приплыл с норвежским флотом, чтобы наказать короля Шотландии, он высадился на Оркнейских островах. В это время на Солнце

появилось тонкое, яркое кольцо. Уже в наше время было доказано, что кольцевое затмение Солнца было видно в той местности 5 августа 1263 года. Такие проверки в хронологии зависят от доказательств современных событию авторов или информации, полученной из надписей на монетах, медалях и памятниках.

Летописец Кирик из Новгородского Антониева монастыря 11 августа 1124 года записал: «...Пред вечерней ночи убывать солнца и погиге все. О велик страх и тьма быть...»

В летописи и в «Слове о полку Игореве» сказано:

У Донца был Игорь, только видит —
Словно тьмой полки его прикрыты,
И возрел на светлое он Солнце —
Видит: Солнце — что двурукий месяц,
А в рогах был словно уголь горящий;
В темном небе звезды просияли,
У людей в глазах позеленело.

Это было, как установили астрономы, 1 мая 1185 года — накануне сражения Игоря с половцами.

Геологическая хронология построена на изучении окаменелостей, ископаемых, структуры земных недр (лекция 17). Точность определения датировки очень мала и не позволяет устанавливать связь событий на разных континентах. А без таких сравнений история Земли остается в значительной степени загадкой. Только открытие радиоактивности изменило ситуацию, появились методы радиометрического датирования, сделавшие возможным вычисление абсолютного возраста минералов и определения геологических дат с беспрецедентной точностью.

Политическая хронология определяет даты и последовательность событий в истории наций, стран, человечества. Наиболее древние нации связывали историю со сроком службы некоторого деятеля, короля. Эта система дала довольно полную хронологию, но часто события между смертью короля и приходом его преемника были пропущены, в ряде случаев правление непопулярных руководителей исключалось из письменных источников. Уместно вспомнить опубликованный в 1949 году роман

антиутопию Д. Орузлла «1984» и Министерство Правды, в угоду конъюнктуре и «высшим интересам» искажающее историю фантастической державы Океании.

В Древней Месопотамии, в Шумере, Ассирии и Вавилоне непрерывная хронология начиналась с рождения царя Саргона (приблизительно 2335–2279 годах до нашей эры), причем список царей распространяли к первой династии Ур (приблизительно 2670 год до нашей эры). Хронология Древнего Египта начинается с господства первого фараона первой династии Менеса (3100–3066 годах до нашей эры). Египетский год начинался с восхода звезды Сириус и содержал точно 365 дней.

Эра греческих Олимпиад была рассчитана с 1 июля 776 года до нашей эры, греческие астрономы ввели два цикла по 235 лунных месяцев (почти точно 19 лет) и 940 лунных месяцев (около 76 лет). В римской хронологии эра основания города (ab urbe condita, или AUC) начинается с 22 апреля 753 года до нашей эры.

По римскому (юлианскому) календарю, принятому христианской церковью, зимнее солнцестояние наступало 25 декабря. Эта дата была освящена древними персами как день рождения Митры — «рождество Солнца непобедимого». И праздник этот поклонники солнечного бога торжественно отмечали в подземных храмах — митреумах.

Христиане сначала праздновали этот праздник вместе с митраистами, а позже приурочили к 25 декабря и рождение своего бога — Христа. Случилось это уже после того, как христианство стало господствующей религией в Римской империи — в IV веке по нынешнему летоисчислению. Но этого исчисления еще не было — римляне вели счет годов по эре Диоклетиана. Диоклетианова эра началась с 29 августа 284 года (по нынешнему летоисчислению). В тот день начальник дворцовой стражи Диоклетиан с помощью родовой знати захватил высшую власть и был провозглашен императором. Новый император стал преследовать христиан как наиболее опасных конкурентов языческой религии. Церковь использовала летоисчисление по Диоклетианову исчислению и после его смерти, особенно при расчете сроков наступления

пасхи. Новую пасхалию, которая должна была начаться с 248 года, заблаговременно стал вычислять настоятель римского монастыря Дионисий, по прозвищу Малый. Он первый задумался: почему нужно исчислять года от воцарения язычника Диоклетиана, злейшего врага христиан?

Здесь возникает вопрос — когда родился Христос? По пасхальным таблицам Дионисий высчитал, что наиболее подходящая дата — 25 марта 254 года до начала эры Диоклетиана.

В Евангелии указано, что Христу в момент распятия было тридцать с небольшим лет. Значит, он родился 25 декабря 284 года до эры Диоклетиана. Получалось, что всего от рождения Христа прошло 284 года до диоклетиановой эры да еще 247 лет после нее. То есть 531 год.

Это летоисчисление длительное время использовали для расчета пасхалий. Только с 1431 года во всех актах и документах, рассылаемых римским папой, даты стали указывать по христианскому летоисчислению.

В 2000 году наступил 2754 год от основания Рима (AUC). В то же время мусульмане отметили 1378 год хиджры, 5760 год — иудеи. Для буддистов наступил 2544 год, тибетская традиция утверждает, что пришел 2124 год. Китайцы встретили 4697 год.

Позволим себе процитировать выдающегося русского историка Л. Н. Гумилева: «...Чтобы описать свою историческую традицию, членам этноса становится необходима система отсчета времени. Легче всего учитывать временные циклы. Простые наблюдения показывают, что день и ночь составляют повторяющийся цикл — сутки. Подобно этому, времена года, сменяясь, составляют больший цикл — год. Из-за этой простоты и очевидности первый известный людям счет времени, употребляющийся до сих пор, — это счет циклический». (С представлением о цикличности времени связано само происхождение русского слова «время», однокоренного со словами «вертеть» и «веретено».)

На Востоке, например, была изобретена система отсчета времени, при которой каждый из 12 годов носит название того или иного зверя, изображаемого определенным цветом (белый — металл, черный — земля, крас-

ный — огонь, сине-зеленый — растительность). Но поскольку этнос живет очень долго, ни годового, ни даже двенадцатилетнего цикла восточных народов недостаточно, чтобы описать хранящиеся в памяти людей события.

В поисках выхода из этого тупика начали применять линейное измерение времени, при котором отсчет ведется от определенного момента в историческом прошлом. Для древних римлян эта условная дата — основание Рима, для эллинов — год первой Олимпиады. Мусульмане считают годы от Хиджры — бегства пророка Мухаммеда из Мекки в Медину. Христианское летоисчисление, которым пользуемся мы, ведет счет от Рождества Христова. О линейном измерении времени можно сказать лишь то, что, в отличие от циклического, оно подчеркивает необратимость времени.

На Востоке существовал еще один способ осознания и отсчета времени. Вот пример такого исчисления. Царевна из южнокитайской династии Чэн, уничтоженной северной династией Суй, попала в плен. Она была отдана в жены тюркскому хану, желавшему породниться с китайской императорской семьей. Царевна скучала в степях и сочиняла стихи. Одно из ее стихотворений звучит так:

Предшествует слава и почесть беде,
Ведь мира законы — круги на воде.
Во времени блеск и величье умрут,
Сравниются, сгладятся башня и пруд.
Хоть ныне богатство и роскошь у нас —
Недолог всегда безмятежности час.
Не век опьяняет нас чаша вина.
Звенит и смолкает на лютне струна.
Я царскою дочерью прежде была,
А ныне в орду кочевую зашла.
Скиталась без крова и ночью одной,
Восторг и отчаянье были со мной.
Превратность царит на земле искони,
Примеры ты встретишь, куда ни взгляни,
И песня, что пелась в былые года,
Изгнанника сердце тревожит всегда.

Здесь течение времени рассматривается как колебательное движение, а определенные временные отрезки выделяются в зависимости от насыщенности событиями.

При этом создаются большие дискретные «участки» времени. Китайцы называли все это одним легким словом — «превратность». Каждая «превратность» происходит в тот или иной момент исторического времени и, начавшись, неизбежно кончается, сменяясь другой «превратностью». Такое ощущение дискретности (прерывности) времени помогает фиксировать и понимать ход исторических событий, их взаимосвязь и последовательность.

Но, говоря о прерывистом времени, времени линейном или циклическом, надо помнить, что речь идет лишь о созданных человеком системах отсчета. Единое абсолютное время, исчисляемое нами, остается реальностью, не превращаясь в математическую абстракцию, и отражает историческую (природную) действительность.

Обратите внимание на высказывание А. Гротендика, завершающее предыдущую лекцию!

Что же такое время? Как его можно измерить? И можно ли вообще говорить об измерении времени? Каков возраст Вселенной?

Мы непосредственно ощущаем промежутки времени, встречающиеся в нашей жизни. Кратчайший промежуток времени, который мы можем ощутить, равен примерно 0,1 с, длительности щелчка пальцами. Время реакции человека на внешний сигнал составляет около 0,2 с и зависит от психофизического состояния человека. Психологи отмечают, что «внутреннее» время человека может значительно изменяться. Так, например, «психологическая минута» среднего здорового человека лежит в пределах 63–70 с, человека, плохо приспособляющегося к окружающей обстановке — 46–48 с, а у людей, незадолго до наблюдения покушавшихся на самоубийство, уменьшается до 20 с.

Естественные единицы времени, с которыми мы имеем дело в повседневной жизни — день, год, времена года, лунные сутки, — основаны на циклических изменениях, наблюдаемых в природе. Такие циклические изменения могут иметь значительные периоды (год — период обращения Земли вокруг Солнца, сутки — период обращения Земли вокруг своей оси), но могут быть

и достаточно быстрыми (период колебания маятника в механических часах, период колебаний молекул в кристалле и т. п.). Это — **обратимые процессы** (лекция 9). То есть через определенное время положение, например, Земли, относительно Солнца повторится, и мы можем точно рассчитать этот момент времени.

Существуют и **необратимые во времени процессы**. Так, мы понимаем, что имеется в виду, когда говорим о длительности человеческой жизни. Очевидно, что процесс существования живого организма необратим.

В случае обратимых процессов нет различия между прошлым и будущим. Мы можем предсказать положение Луны через сколь угодно большой промежуток времени и рассчитать, в какой точке небосклона была Луна сколь угодно давно. Именно это позволяет использовать астрономические явления при датировке исторических событий, если считать, что движение, в котором находится планета, — бесконечно.

Прямой зафиксированный опыт человечества распространяется примерно на 5000 лет — именно этому времени соответствуют первые памятники письменности шумерской цивилизации. Из этих и более поздних описаний, старинных карт и гравюр известно, что русла реки, очертания берегов морей, горы мало изменялись, если бы не вмешался человек. Но очевидно, что характерные детали ландшафта не всегда существовали в современном виде.

Легко оценить время, необходимое для того, чтобы вследствие действия ветра, воды, непогоды исчезла, допустим, гора. Пусть это будет гора высотой 2000 м с диаметром основания 2000 м. То есть в ней, около 2×10^9 м³ горных пород. Площадь склонов близка 10^7 м². Капризы погоды приводят к постепенному разрушению громады горы. Пусть с каждого квадратного метра горы в год отламывается кусок размером в несколько сантиметров. Тогда за год с горы осыплется около 1000 м³ породы. То есть за 1 миллион лет объем горы уменьшится вдвое. Таким образом, мы оценили возраст ландшафта Земли — несколько миллионов лет. Это — **необратимый процесс**.

Ясно, что процессы горообразования идут и сегодня. Так, осенью 1994 года остров Кунашир опустился в океан за месяц на 6 метров. Но это — природная катастрофа. На Урале, в Нижнем Тагиле, известна присказка: «Была гора Высокая, стала яма глубокая». Это — результат техногенной деятельности человека.

Как измерить интервалы времени, отвечающие геологическим событиям? Для этой цели надо применить такие «часы», которые шли бы достаточно медленно и по ним можно было бы измерять длительные промежутки времени.

Такие часы есть, они используют явление радиоактивности — еще один необратимый процесс, — открытое в 1896 году А. Беккерелем (1852–1908).

Процесс радиоактивного распада нельзя ускорить или замедлить. Он протекает с постоянной скоростью, характерной для данного элемента. Так, например, при радиоактивном распаде один из $1,6 \times 10^{11}$ атомов изотопа рубидия превращается за год в атом стронция. То есть для полного исчезновения такого изотопа рубидия необходимо по крайней мере, 10^{11} лет. Но на Земле он обнаружен. Для урана эта «постоянная» составляет 10^{-10} , для калия — 10^{-9} . И они есть в земной коре.

Тут мы приходим к фундаментальному выводу: Земля не могла существовать вечно. Действительно, если бы возраст Земли был больше 10^{11} лет, то мы не могли бы обнаружить на ней радиоактивных веществ, таких как рубидий, уран, калий... Это значит, что «возраст» материала, из которого состоит Земля, не может превышать несколько миллиардов лет.

Самая древняя порода, обнаруженная на Земле (в Антарктиде), имеет возраст 3900 ± 300 миллионов лет. Недавние исследования найденных в Эфиопии каменных орудий труда показали, что их возраст около 2,5 миллиона лет. Это самые древние известные археологам образцы камней, обработанных человеком. Возраст определен по соотношению изотопов аргона в исследованных образцах. Точно таким же способом оценивают время существования Солнечной системы. Для этого можно измерять содержание радиоактивных элементов в метеори-

тах. Оказалось, что все метеориты имеют примерно одинаковый возраст — 4–5 миллиардов лет. Следовательно, используя такое необратимое физическое явление, как радиоактивный распад, можно оценить промежутки времени космического масштаба.

Но как оценить возраст Вселенной? Единственная возможность — изучать излучение звезд, звездных скоплений, галактик. По спектрам излучения оценивают скорости их движения и химический состав. Обсуждая модели возникновения Вселенной, мы поговорим об этом подробнее (лекции 10, 11).

Одна из последних оценок возраста Вселенной — 16 ± 2 миллиардов лет. Метод *нуклеокосмохронологии* (определение относительного содержания радиоактивных долгоживущих элементов или соотношения двух элементов и сравнения с содержанием в других звездах, в частности — в Солнце) показал, что возраст одной из самых старых звезд CS22892-052 составляет от 13 до 21 миллиарда лет. Насколько можно верить этой оценке? Она сделана по спектру одной звезды по одиночной линии излучения тория.

Таким образом, мы видим, что существуют физические явления и процессы, определяющие **направление течения времени**.

Обратимость процессов в природе является приближенной — для законов, обратимых во времени, придется вводить дополнительные ограничения и оговорки. Так, маятник будет колебаться сколь угодно долго, если нет трения в точке подвеса, сопротивления воздуха, других причин.

В основе природы лежат *необратимые процессы*, с особой отчетливостью это проявляется на биологическом уровне.

Приведем некоторые классы явлений, характеризующие направление времени — **стрелу времени** (понятие введено в 30-е годы XX века английским астрофизиком А. С. Эддингтоном, 1882–1944).

Излучение. Волна (упругая, электромагнитная) всегда испускается источником и является расходящейся, загущающей по прошествии времени (*уходящей в будущее*).

Все решения волновых уравнений, описывающих излучение и поглощение, учитывают только этот факт, считающийся физически имеющим смысл. Не известно волн, сходящихся к источнику из прошлого (хотя теоретически можно решить уравнения, рассматривающие эту возможность).

Термодинамика. Второе начало термодинамики, знаменитый *закон возрастания энтропии* в системе, не обменивающейся с внешним миром ни энергией, ни веществом, выражает увеличение молекулярного хаоса до тех пор, пока система не достигнет термодинамического равновесия. Напомним, что энтропия (от греч. entropia — поворот, превращение) позволяет отличать, в случае изолированных систем, обратимые процессы (энтропия максимальна и постоянна) от необратимых (энтропия возрастает). Л. Больцман (1844–1906) и М. Планк (1858–1947) сформулировали один из важнейших законов природы, связывающий энтропию S и вероятность состояния W системы:

$$S = -k \ln W. \quad (6.1)$$

Коэффициент k является фундаментальной постоянной и носит название постоянной Больцмана. Из (6.1) видно, что чем более вероятно состояние системы (то есть чем ближе W к единице), тем больше энтропия. Пример перехода системы к наиболее вероятному состоянию — растекание капли чернил в стакане с водой. Подробнее эти вопросы рассмотрены в лекции 9.

Эволюция. Динамическая самоорганизация материи, наблюдаемая в биологической эволюции и эволюции общества, противоречит второму закону термодинамики — закону возрастания энтропии (ведь эволюция — это возрастание порядка в системе). Однако мы должны учесть, что в этих случаях рассматриваемые системы не являются замкнутыми. В них имеется производство энтропии, необратимые процессы, например — химические явления, диффузия, теплопроводность и т. п.

Радиоактивный распад. При радиоактивном распаде происходит необратимое преобразование одних атомов в иные, обратного процесса не наблюдается.

Остановимся подробнее на отличиях представлений о времени в механике Ньютона и Эйнштейна.

В механике Ньютона для описания движения тела необходимо ввести три координаты и некоторый параметр — *время*. Пространство трехмерно, время одномерно, и то и другое — бесконечны. Течение времени абсолютно, не зависит от того, происходит что-либо или нет. Эталоны длины и времени имеют универсальный характер и не зависят от характера движения системы. Уравнения механики не меняются при обращении времени — замена t на $-t$ не меняет уравнений. *Время не равноправно с пространственными координатами.*

Ньютон писал: «Абсолютное, истинное и математическое время само по себе и по самой своей сущности течет одинаково безотносительно к чему бы то ни было внешнему... относительное же время все ближе приближается к абсолютному при улучшении наших измерений...»

Теория относительности Эйнштейна утверждает, что время такая же полноправная координата, как и пространственные. Мы должны говорить не о трехмерном пространстве и времени, а о четырехмерном пространство-времени.

Определяя время, мы выбираем отрезок между событиями (год, сутки и т. п.). Именно из этих наблюдений и возникло понятие времени. К нему добавилась идея о том, что отрезки времени между одними и теми же событиями одинаковы для всех наблюдателей, события, одновременные для одного наблюдателя, одновременны и для любого другого.

Эйнштейн понял, что никто из нас не может сверить свои часы с часами во внешнем пространстве, и предложил отказаться от двух последних предположений, подтверждаемых всем опытом человечества.

Из-за конечности скорости света, ведущего постулата теории относительности Эйнштейна, два события, одновременные в одной системе отсчета, не одновременны в других.

Запишем преобразования, полученные в 1904 году голландским физиком Х. А. Лоренцем (1853–1928), для

интервала времени (здесь t и t' — интервалы времени в системах, движущихся относительно друг друга со скоростью V , x — пространственная координата, c — скорость света):

$$t' = \frac{t - \frac{Vx}{c^2}}{\sqrt{1 - \frac{V^2}{c^2}}}, \quad x' = \frac{x - Vt}{\sqrt{1 - \frac{V^2}{c^2}}}. \quad (6.2)$$

События, одновременные для одного наблюдателя ($t = 0$), будут неодновременными для другого ($t' \neq 0$). *Понятие одновременности относительно!*

В 1967 году в Американском физическом журнале был приведен очень простой вывод формулы эйнштейновского замедления времени.

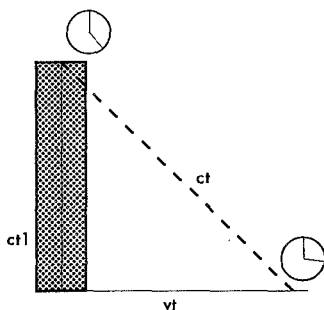


Рис. 6.1

К простому выводу формулы замедления времени в движущейся системе

Пусть брусок движется со скоростью V в направлении, перпендикулярном его длине (рис. 6.1). Вместе с бруском двигаются часы. Тогда по этим часам время распространения светового сигнала по бруску сверху вниз равно t_1 . Длина бруска ct_1 (c — скорость света). С другой стороны, в неподвижной (относительно бруска) системе отсчета световой сигнал пройдет путь ct . Тогда по теореме Пифагора

$$c^2 t_1^2 + v^2 t^2 = c^2 t^2,$$

отсюда

$$t_1 = t \sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}, \quad t = \frac{t_1}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}. \quad (6.3)$$

Замедление времени может быть измерено. Известны элементарные частицы μ -мезоны, образующиеся на высоте около 10 км под действием космического излуче-

ния. Они имеют заряд, равный заряду электрона, а массу — в 200 раз больше. Скорость близка к скорости света. Время полураспада (то есть период, за который останется половина от имеющихся частиц) — $1,5 \times 10^{-6}$ с.

Из соображений, основанных на представлениях классической механики, половина из них должна распасться, пройдя путь 450 метров. То есть на поверхности Земли μ -мезонов не было бы в космическом излучении. Однако эти частицы есть в потоке, фиксируемом на поверхности Земли.

Дело в том, что время «течет» для μ -мезона иначе, чем для внешнего наблюдателя. Если скорость частицы будет равна 90% скорости света, «собственное время» μ -мезона от момента возникновения до достижения поверхности Земли не превысит 10^{-5} с.

Замедление времени проверено и при существенно меньших скоростях движения часов. Один цезиевый эталон времени был помещен в самолет, а другой остался в лаборатории. В течение месяца первые часы летали. В соответствии с теорией относительности летавшие часы должны были отстать от покоящихся на 184 наносекунды с точностью 23 наносекунды. Наблюдаемое отставание составило 203 наносекунды с точностью 10 наносекунд. Это еще раз подтвердило верность теоретических предсказаний.

Один из самых известных парадоксов теории относительности — *парадокс близнецов*. Пусть два брата-близнеца разлучаются, и один из них улетает со скоростью, близкой к скорости света. По возвращении он будет много моложе брата, оставшегося на Земле. Пусть нам удастся этот эксперимент. Скорость корабля на 1% меньше скорости света. Тогда, если на Земле прошло 30 лет, то на космическом корабле — около 5 лет (в 6 раз меньше). То есть близнец с корабля будет заметно моложе.

Однако мы можем стать на точку зрения космонавта: он покоится, а Земля движется относительно космического корабля. Тогда моложе будет брат, оставшийся на Земле. Именно в этом и состоит парадокс близнецов.

Кто же прав? В чем ошибка? Дело в том, что не все системы отсчета эквивалентны. Есть движущиеся

равномерно и прямолинейно, без ускорения — инерциальные системы отсчета. А есть движущиеся ускоренно. Космический корабль ускоренно двигается, по крайней мере, в момент поворота к Земле. Именно в такой системе отсчета время будет идти иначе, чем в инерциальной системе отсчета.

ВОПРОСЫ ДЛЯ САМОПРОВЕРКИ

1. Попробуйте дать определение понятия «время». Как это понятие изменялось при развитии естествознания?
2. Какие процессы позволяют определять ход времени?
3. Что такое обратимые и необратимые процессы? Приведите примеры.
4. Почему мы утверждаем, что время необратимо?
5. Почему понятие одновременности относительно?
6. Как вы понимаете термин «стрела времени»?
7. Что следует из постоянства скорости света?

ЛЕКЦИЯ СЕДЬМАЯ

ВЕЩЕСТВО. РЕАЛЬНОСТЬ АТОМОВ И МОЛЕКУЛ

Перейдем к рассмотрению некоторых основополагающих представлений о мире атомов и молекул, микромире, веществе и поле. Именно законы микромира определяют существование гигантских звезд, планет, биологических объектов, человека.

Для начала определим, что мы понимаем под веществом.

Вещество складывается из элементарных частиц, масса которых не равна нулю (в основном — электронов, протонов и нейтронов). Масса пропорциональна энергии покоя ($E = Mc^2$). Если принять скорость света за единицу, то получим, что масса тела равна его энергии покоя. Именно энергия покоя, «дремлющая» в массивных телах, частично освобождается в химических и особенно ядерных реакциях. Частицы света — безмассовые, для них $m = 0$, фотон может двигаться только со скоростью света.

В классической физике вещество и поле противопоставлялись друг другу как два вида материи, у первого из которых структура дискретна, а у второго — непрерывна. Квантовая физика, внедрившая идею двойственной корпускулярно-волновой природы любого микрообъекта, привела к нивелированию этого представления. На этой основе были строго разграничены понятия вещества и материи, отождествляющиеся в науке на протяжении многих веков. Понятие «поле» рассмотрено в лекции 4.

Наука о веществах зародилась в Египте — передовой стране древнего мира. Металлургия, керамика, изготовление стекла, крашение, парфюмерия, косметика

достигли там значительного развития задолго до нашей эры.

Термин «химия» происходит (по Плутарху) от одного из древних названий Египта, Хеми («черная земля»), и в первоначальном смысле означал «египетское искусство». Позже химия определялась как искусство делания золота и серебра. Существует и иная точка зрения, связанная с греческим *hymia* — искусство литья (от *huma* — литье).

Наука о веществах и их взаимодействиях — химия — считалась в Египте «божественной наукой» и находилась целиком в руках жрецов. Однако некоторые сведения все же просачивались за пределы Египта, в основном через Византию и арабов (после завоевания ими в 711 году Испании). Именно на арабском Востоке появился термин «алхимия».

Целью алхимиков, главным образом, было создание «философского камня», способного все металлы превращать в золото. В основе этого лежал элементарный практический заказ: золото в Европе было необходимо для развития торговли, а известных месторождений было мало.

В основе взглядов алхимиков лежали представления Аристотеля, о которых мы говорили ранее (лекция 3). Позже к принципам и элементам Аристотеля алхимики добавили *растворимость* (каменная или поваренная соль), *горючесть* (сера) и *металличность* (ртуть). Видно, что в качестве новых элементов выбраны наиболее доступные и известные в то время вещества.

Дошедшие до нас сочинения европейских алхимиков написаны туманным языком, знание в них переплетено с мистикой. Вот один из рецептов изготовления «философского камня»: «Мы соединяем, то есть делаем А из тела и Меркурия. Мы подвергаем гноению и перевариванию при двойном жаре сказанное А. После того как оно сгноено и переварено, мы его разрешаем. После разрешения мы его отделяем и разделяем. После отделения и разделения мы его очищаем и чистим». Меркурий, видимо, ртуть. Что такое А или тело, ничего в рецепте не сказано...

«В тебе сокрыта вся чудесная и ужасная тайна. Проведи нас, осветив все элементы лучистым образом. Дай познать нам, как высшее опускается до низшего, и как низшее восходит до высшего, и как находящееся в середине приближается и к высшему, и к низшему, сливаясь и образуя единое целое. Покажи нам благословенные воды, ниспадающие с высоты, чтобы пробудить умерших, которые лежат вокруг центра Ада, прикованные во тьме; как эликсир Жизни доходит до них и будит их от глубокого сна; как новые воды, которые образовались во время их смертного сна, под действием света пронизывают их. Испарения поддерживают их; поднимаясь из глубины моря, они поддерживают воды».

Это отрывок из алхимического сочинения. Современные историки химии пришли к выводу, что в этом отрывке дано описание процесса, известного как дистилляция с противотоком, широко применяющегося в настоящее время.

Точной наукой наука о веществах стала после того, как в середине XVIII века был сформулирован закон сохранения массы — масса всех веществ, вступающих в реакцию, равна массе всех продуктов реакции.

Открытие этого закона приписывают М. В. Ломоносову. Однако, скорее всего, Ломоносов в 1748 году первым точно сформулировал его в письме Л. Эйлеру: «...Все времена, в натуре случающиеся, такого суть состояния, что сколько у одного тела отнимается, то столько же присовокупляется к другому. Так, ежели где убудет несколько материи, то умножится в другом месте. Сей общий естественный закон простирается и в самые правды движения: ибо тело, движущее своей силой другое, столько же оныя у себя теряет, сколько сообщает другому, которое от него движение получает...»

Таким образом, в середине XVIII века в практике исследования вещества появились точные количественные методы.

Позже был установлен закон постоянства состава — каждое химическое соединение имеет вполне определенный и постоянный состав. То есть состав химического соединения не зависит от способа его получения.

Это дало возможность Дж. Дальтону (1766–1844) в 1803 году сформулировать закон кратных отношений, утверждающий, что элементы входят в соединение некоторыми порциями, и сделать вывод о дискретном строении вещества. Именно Дальтон ввел в современную науку представление об *атомах* как мельчайших частицах, из которых образованы все вещества, понятие «атомный вес».

Заметим, что представление об атомном строении вещества является одним из самых древних в современной науке.

В некоторых странах Азии оно существовало более чем за 1000 лет до нашей эры. Влияние этих идей дошло, возможно, до Древней Греции, и в V веке до нашей эры древнегреческие философы Левкипп и Демокрит сформулировали вывод о невозможности бесконечного деления вещества на все более мелкие части. В конечном счете, полагали они, получатся настолько маленькие частицы, что дальнейшее деление будет невозможным. Существует большое разнообразие подобных частиц, из которых сделаны различные вещества. И при соединении различных частиц получаются новые вещества. По-гречески *atomos* — неделимый (от *temnein* — рассекать, резать, и отрицания «а»), поэтому частички, которые нельзя больше разделить, называли *атомами*. В Древней Греции эти представления не получили распространения. Аристотель являлся их рьяным противником, и атомарным представлениям о строении вещества пришлось ждать признания более 2000 лет. (Заметим, что в конце XIX века Беккерель показал, что и атом не является неделимым.)

Несколько слов о терминологии.

Когда мы говорим о веществе (чистом веществе), то тем самым указываем на то, что оно обладает однородными свойствами. При этом чистые вещества могут быть двух типов. Одни разлагаются после некоторых воздействий. Другие — нет. Например, сравним железо, кислород, водород и окись железа, воду, перекись водорода.

Первые вещества — элементы, вторые — соединения. Сегодня известно 92 стабильных элемента и многие сот-

ни тысяч чистых веществ, построенных из них. Существуют тысячи минералов, десятки тысяч неорганических и, особенно, органических соединений, неисчислимое количество сплавов.

Все разнообразие веществ возникает из сложного, но повторяющегося сочетания мельчайших составных частей — атомов (как и все книги — суть набор нескольких десятков символов, собранных огромным разнообразием способов).

Попытки создания систематики химических элементов начались сразу после освоения наукой представлений об атомах. Однако только Д. И. Менделееву (1834–1907) удалось сформулировать периодический закон, позволивший не только систематизировать все известные на тот момент (1869 год) химические элементы, но и предсказать существование новых. Периодический закон в формулировке Менделеева, опубликованный им в учебнике «Основы химии», звучит следующим образом: «...Свойства простых тел, также формы и свойства соединений элементов, находятся в периодической зависимости от величины атомных весов элементов. *В соответствии этому закону и составлена периодическая система элементов...*» В 1870 году подобную систематику создал немецкий ученый Ю. Л. Майер (1814–1878).

Созданная систематика позволила предсказать свойства элементов с вероятными атомными весами 44, 68, 72. В 1875 году был открыт галлий (атомный вес 69,7), в 1879 — скандий (атомный вес 45,1), в 1886 — германий (атомный вес 72,6). В 1893 году был открыт аргон, которому не было места в периодической системе элементов. После обнаружения на Солнце (с помощью спектрального анализа), а затем и на Земле гелия, открытия криптона, неона, ксенона стало ясно, что «благородные» (инертные) газы образуют новую группу периодической системы. Это еще раз подтвердило строгость периодического закона Менделеева.

В то же время Менделеев писал: «Мы не понимаем причины периодического закона...» Он просто раскладывал пасьянс, основанный на известных свойствах химических элементов и их соединений. И только после

выяснения строения атомов был вскрыт физический смысл обнаруженных им закономерностей.

Атомы девятиюсто двух видов стабильны (до урана) и обладают различными свойствами. С одной стороны, одни из них образуют газы, другие — металлы. Одни способны легко образовывать химические соединения, другие (инертные газы) почти никогда не дают соединений.

В то же время все атомы имеют примерно одинаковый размер. Действительно, мы знаем, что в 1 см^3 вещества содержится около 10^{23} молекул (атомов для одноатомных веществ). Тогда на один атом приходится объем около 10^{-23} см^3 и размер атома (кубический корень из объема) близок 10^{-8} см .

Но что мы знаем о внутреннем строении атома?

Из опыта известно, что любой предмет может быть заряжен электричеством одного или другого вида. Мы называем эти два вида зарядов «положительными» или «отрицательными». В этих названиях не отражено ничего принципиального. Просто мы знаем, что одноименные заряды отталкиваются, а разноименные притягиваются — это следует из эксперимента.

Эксперимент же показывает, что незаряженное тело просто содержит в себе равные количества положительных и отрицательных зарядов. В этом состоит одно из величайших открытий физики.

Мы обнаруживаем, что заряды могут перемещаться в веществе. За проводимость металлов ответственны электроны. Еще в Древней Греции было замечено, что если потереть янтарь (греч. *electron*) кусочком ткани, то он приобретает свойство притягивать шерстинки. Именно поэтому в 1891 году для обозначения единицы минимального количества электричества был введен термин «электрон». Элементарная частица, называемая сегодня электроном, открыта Дж. Томсоном в 1897 году.

Заметим, что когда мы трем поверхность янтаря или иного непроводящего материала (диэлектрика) шерстью, тканью, мы вовсе не «сдираем» электроны с электронных оболочек атомов. Мы просто снимаем поверхностные заряды, «грязь», экранирующие неоднородный поверхностный заряд диэлектрика (его поляризацию).

Итак, к концу XIX века стало известно, что существуют положительные и отрицательные заряды, вещество построено из них. Минимальная «порция» вещества — атом. Следовательно, и атом должен состоять из положительных и отрицательных зарядов и, по существу на этот момент представлениям, быть неделимым. Тогда простейшая модель атома — модель желе (пудинга с изюмом), в котором смешаны положительные и отрицательные заряды, и разделить их нельзя (модель Томсона, 1904 год).

Решающий эксперимент по проверке этой модели был проделан в 1910 году Э. Резерфордом (1871–1937), Х. Гейгером (1882–1945) и Р. Марсденом (1889–1970). Возникающие при радиоактивном распаде α -частицы (ядра гелия, имеющие положительный заряд) направляли на тонкую золотую фольгу и наблюдали, как изменится направление их движения после прохождения через металл. Если верна модель «желе», то α -частицы не должны отклоняться от первоначального направления. Если же электрический заряд по атому расположен неравномерно, то α -частицы должны были бы по-разному отклоняться неоднородностями электрического заряда.

Было обнаружено совершенно неожиданное явление — некоторые α -частицы отклонялись от первоначального направления настолько сильно, что почти возвращались к источнику.

Таблица 7.1
Результаты одного из экспериментов
по наблюдению рассеивания α -частиц золотой фольгой

Угол отклонения α -частицы	15	38	45	60	75	105	120	135	150
Число наблюдений α -частиц	132 000	7800	1435	477	211	70	52	43	33
% от общего числа наблюдений	92,87	5,5	1,0	0,3	0,1	0,03	0,025	0,02	0,015

Резерфорд следующим образом вспоминал свою первую реакцию на эти результаты: «...Я помню... ко мне пришел очень взволнованный Гейгер и сказал: „Мы, кажется, получили несколько случаев рассеяния α -частиц назад...“ Это самое невероятное событие, которое было в моей жизни. Это почти так же невероятно, как если бы вы выстрелили 15-дюймовым снарядом в папиросную бумагу и он, отразившись, попал бы в вас. При анализе я понял, что такое рассеяние должно быть результатом однократного столкновения, и, произведя расчеты, увидел, что это никоим образом невозможно, если не предположить, что подавляющая часть массы атома сконцентрирована в крошечном ядре. Именно тогда у меня и зародилась идея об атоме с крошечным массивным центром, в котором сосредоточен заряд...»

Заметим, что еще в 1887 году, за 10 лет до открытия электрона и почти за 30 лет до работ Резерфорда, выдающийся (в будущем) русский физик П. Н. Лебедев (1866–1912) в дневнике писал: «...Каждый атом всякого нашего первичного элемента (Н, О, Ва...) представляет собой полную Солнечную систему, то есть состоит из различных атомопланет, вращающихся с разными скоростями вокруг центральной планеты или каким-либо другим образом двигающихся характерно периодически. Периоды движения весьма кратковременны...». Это — пример удивительной прозорливости ученого.

Стало ясно, что атом состоит не из смеси положительно и отрицательно размазанных по объему частиц, но из массивного положительного заряда — ядра, окруженного отрицательно заряженными электронами, значительно более легкими, чем ядро. Размер ядра, оцененный из этих экспериментов, составляет около 10^{-13} см.

Как мы помним, размер атома около 10^{-8} см. То есть размер ядра, по крайней мере, в 10 000 раз меньше размера атома.

Основываясь на этих исследованиях, в 1911 году Резерфорд предложил новую, «планетарную» модель, уподоблявшую атом Солнечной системе. В центре находится маленькое положительное ядро, содержащее почти всю массу атома, а вокруг ядра — электроны, число ко-

торых равно положительному заряду ядра, выраженного в электронных зарядах.

Казалось, структура атома понята. В водороде имеется один электрон и ядро с положительным зарядом, численно равным заряду электрона. В гелии два электрона и соответствующим образом заряженное ядро. И так вплоть до урана с 92 электронами и ядром, несущим 92 единицы положительного заряда. То есть удалось качественную разницу между атомами свести к количественной. Можно расположить атомы в определенном порядке в соответствии с их атомными номерами. Каждому номеру от 1 до 92 (кроме технеция — 43 и прометия — 61) отвечает элемент, обнаруженный в природе.

Существуют и трансурановые элементы с атомными номерами больше 92. Они имеют малые времена жизни и в природе при естественных условиях не встречаются.

Сведение *качественных* различий между атомами к *количественным* представляет собой огромный шаг вперед. Стала понятна структура периодического закона Менделеева, принципы систематизации атомов.

Однако каждое открытие ставит новые, более сложные вопросы. Действительно, почему бром с 35 электронами — коричневая жидкость, легко образующая химические соединения; криптон с 36 электронами — благородный газ, практически не вступающий в химические соединения; рубидий с 37 электронами — металл, химически очень активный? Почему один лишний электрон приводит к столь резкому изменению свойств элемента? На эти вопросы удалось получить ответ только после того, как была понята квантовая природа материи.

Есть и другие вопросы. Так, если мы принимаем планетарную модель атома, то считая, что электроны вращаются вокруг ядра, и зная размер атома (радиус орбиты электронов), мы можем оценить время оборота одного электрона вокруг ядра. Оно составляет около 10^{-16} с. Правильность этой оценки легко проверить экспериментально — частота света, испускаемого раскаленным водородом, составляет 10^{16} Гц.

Однако, если электрон испускает свет, то есть теряет свою энергию, радиус его орбиты должен уменьшаться и, в конце концов, электрон должен упасть на ядро. Но этого не происходит. Более того, раскаленный и холодный водород должны были бы испускать свет одинаковым образом, но холодный водород свет не испускает. Известно, что каждый атом испускает (или поглощает) свет вполне определенных частот, характерных только для данного атома. На этом основаны, в частности, методы спектрального анализа состава веществ.

Более того, атом газа сталкивается с другим атомом один раз за 10^{-12} с, то есть через каждые 10 000 оборотов электрона вокруг ядра. И при этом сохраняются и частота излучения и размер атома... Представим себе, что Солнечная система или Земля столкнутся с подобными себе объектами...

Отметим особо свойства атомных систем, которые не способна описать модель Резерфорда.

1) Устойчивость. Атомы сохраняют свои специфические свойства, несмотря на сильные столкновения и возмущения, которым они подвергаются.

2) Тождественность. Все атомы одного рода (с одинаковым числом электронов) обладают тождественными свойствами. Они испускают и поглощают излучение с одними и теми же частотами, имеют равные размеры, свойства.

3) Воспроизводимость. Способность возвращаться в исходное состояние. Если форма атома была искажена и его электронные орбиты изменили свой вид в результате внешнего воздействия (высокого давления, соседства других атомов и т. п.), то после устранения причины искажения атом и электронные орбиты вновь приобретут исходную форму.

Эти противоречия показывают, что планетарная модель так же, как и ее предшественники, — только некое приближение к действительному строению атома. Опыты показывают, что атом, как планетарная система, не может обладать всеми перечисленными свойствами. То есть модель приближенна. Нужен новый взгляд на природу атома.

ВОПРОСЫ ДЛЯ САМОПРОВЕРКИ

1. Почему закон сохранения массы в химической реакции послужил основой для формирования современных представлений о строении вещества?
 2. Что доказывает закон кратных отношений?
 3. Почему электризуется одежда из синтетических тканей? Почему электризация проявляется зимой в сильные морозы?
 4. Почему в атоме число протонов и электронов должно быть одинаковым?
 5. Почему опыты Резерфорда по рассеянию α -частиц фольгой привели к созданию планетарной модели атома?
 6. Проанализируйте общие черты и различия моделей атома Томсона («желе» или «пудинга с изюмом»), Резерфорда («планетарной»).
 7. Почему после появления планетарной модели возникли новые вопросы о строении атома?
-

ЗАРОЖДЕНИЕ ПРЕДСТАВЛЕНИЙ
О ДВОЙСТВЕННОЙ ПРИРОДЕ
МИКРОМИРА. КВАНТЫ.
ВОЛНОВАЯ ПРИРОДА
АТОМНЫХ ЧАСТИЦ.
КОРПУСКУЛЯРНАЯ ПРИРОДА
СВЕТА

Итак, вновь противоречия. С одной стороны, атом в эксперименте проявляет себя как миниатюрная «планетарная» система из обращающихся по орбитам вокруг ядра электронов. С другой стороны, мы обнаруживаем его устойчивость и иные свойства, чуждые планетным системам.

Какие же закономерности управляют миром атомов, микромиром?

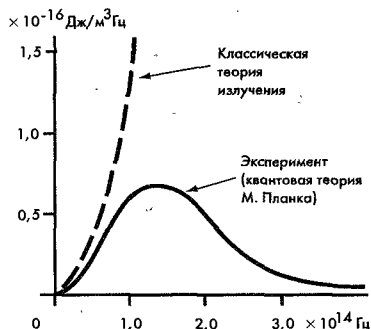
Это, во-первых — квантовые состояния атома. Во-вторых — квантовая природа излучения (поля). В-третьих — волновые свойства материальных частиц. Эти представления служат фундаментом современных представлений о явлениях микромира.

В конце XIX века одним из ключевых направлений естествознания было изучение строения вещества. В лекции 7 мы кратко рассмотрели результаты этих исследований. В то же время естествоиспытателей волновал вопрос и о том, каким образом излучает энергию нагретое тело. Ведь только по измеряемому излучению мы знаем о Вселенной. Это была еще одна проблема, не связанная с исследованием вещества, решаемая совершенно иными методами и исследователями. *Области исследования — вещество и излучение (поле) — представлялись совершенно независимыми.*

Для простоты рассуждений об испускании и поглощении излучения нагретым объектом была придумана модель «абсолютно черного тела» — объекта, полностью поглощающего весь падающий на него поток излучений.

Рис. 8.1
«Ультрафиолетовая катастрофа»

Зависимость спектральной плотности энергии от частоты излучения абсолютно черного тела, нагретого до 2000 К, в случаях классической и квантовой теорий излучения.



Такой объект может иметь только черный цвет (коэффициент поглощения излучения равен 100%). Казалось, что такое тело должно излучать энергию по достаточно простому закону, предсказанному существующей к концу XIX века теорией.

Однако эксперимент, проведенный на модельных объектах, близких к абсолютно черному телу (создать действительно абсолютно черное тело невозможно), показал, что это не так. Классическая теория предсказывала быстрый рост интенсивности излучения с уменьшением длины волны излучения, в ходе же эксперимента наблюдался максимум излучения при некоторой длине волны (рис. 8.1).

Заметим, что с таким излучением каждый из нас сталкивается в жизни — если бы была верна классическая теория, то при открывании дверцы духовки газовой плиты мы мгновенно попадали бы под поток чрезвычайно опасных для жизни коротковолновых жесткого ультрафиолетового излучения гамма-квантов и рентгеновского излучения.

Это была катастрофа (по определению физиков начала XX века) классических представлений — «ультрафиолетовая катастрофа».

И вот в 1900 году М. Планк (его настоящее имя Карл Эрнст Людвиг) выдвинул идею, что абсолютно черное тело излучает энергию не сплошным «поток», а порциями. Этой мельчайшей порции в 1905 году Планк и Эйнштейн дали название *квант* (от лат. quantum — сколько, как

много). Квантовая теория совершила революцию в физике, создав совершенно новые представления о веществе и энергии. Действительно, то, что считалось ранее непрерывным, по новым представлениям стало дискретным. Это противоречило всему обыденному опыту. Квант электромагнитного поля — фотон (от греч. *phos*, родительный падеж *photos*, — свет).

Однако было совершенно непонятно, дискретность излучения есть результат взаимодействия с дискретным веществом или свойство, присущее самому излучению.

По этому поводу А. Эйнштейн писал: «Если пиво всегда продают в бутылках, содержащих пинту, то вовсе не следует, что пиво состоит из неделимых частей, равных пинте».

Он первым понял, что дискретность поглощения и испускания излучения — неотъемлемое свойство самого излучения. Через пять лет после появления понятия кванта Эйнштейн применил идею дискретности излучения к объяснению явления фотоэффекта (появление электрического тока в вакууме вследствие выбивания электронов из металла под действием излучения). Именно за объяснение природы фотоэффекта в 1921 году он был удостоен Нобелевской премии («...за успехи в теоретической физике, особенно за открытие законов фотоэффекта»).

В 1913 году, Дж. Франк и Г. Герц провели ряд экспериментов, в которых они пытались изменить орбиты электронов в атомах.

Как мы говорили ранее, эти орбиты очень устойчивы, и с помощью внешних воздействий (например, столкновений атомов) их изменить не удастся. Для изменения орбиты надо использовать какие-то силы. Проведем аналогию с планетой: для изменения орбиты необходимо, чтобы мимо планеты прошло массивное тело (масштаба самой планеты). Тогда за счет сил тяготения планета (либо все планеты) изменят свои орбиты.

В опытах Франка и Герца через разреженный газ проходил пучок электронов, играющий роль такого тела. Взаимодействие, которое приводило к возникновению сил, изменяющих орбиты электронов в атомах металла, изве-

стно нам как электромагнитное. (С пучком электронов мы имеем дело каждый день — в телевизоре имеется устройство, называемое «электронная пушка».)

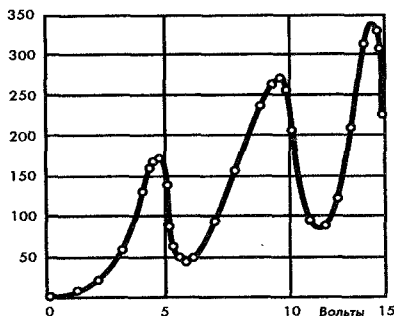
Мы можем измерить скорость электронов в пучке до взаимодействия с атомами и после него и по изменению этой скорости сделать заключение о тех процессах, которые произошли при взаимодействии пучка электронов с атомами. Это сделать достаточно просто, выявив зависимость тока, протекающего через трубку с газом (парами металла), от ускоряющей разности потенциалов.

Из обычных, классических представлений, следует, что электроны пучка должны изменять орбиты электронов атома, их энергия (скорость) должна уменьшаться, причем часть электронов должна просто всю свою энергию отдать атому. И этот эффект должен наблюдаться при любых энергиях пучка электронов. Поэтому зависимость тока от разности потенциалов должна быть монотонной.

Но эксперимент дал совершенно иной результат. На рис. 8.2 показана зависимость тока, протекающего через трубку с парами ртути, от разности потенциалов. Вместо монотонной кривой — кривая с максимумами! Причем расстояние между максимумами не зависело ни от плотности пара (то есть числа атомов, с которыми пучок электронов взаимодействовал, не имело значения), ни от внешних воздействий (электрического и магнитного поля), но имело непосредственное отношение к оптическому спектру металла, пары которого были в установке. Оказалось, что это расстояние точно равно напряжению,

Рис. 8.2
Результаты эксперимента
Франка-Герца

Зависимость тока, протекающего через трубку с парами ртути, от ускоряющей разности потенциалов. Видно, что максимумы расположены через расстояния, равные 4,9 В. Из исследований спектров излучения паров ртути следовало, что эти расстояния должны быть равны 4,84 В.



необходимому для освобождения одного электрона с внешней электронной оболочки атома ртути (потенциалу ионизации), известному из оптических исследований.

Результат более чем странный, не вписывающийся в обычные представления о свойствах вещества, известные к началу XX века. Оказалось, что энергию электрона в атоме нельзя изменить на произвольную величину. Она либо меняется порциями, либо не меняется совсем. Причем эта порция достаточно велика. *То есть и энергия частицы (а не только поля!) меняется порциями — квантами.* За эту работу Франк и Герц получили Нобелевскую премию 1925 года.

Таким образом, мы видим, что в начале XX века принципиальным образом претерпели изменения представления о материи: и о веществе, и о поле.

Но в одном они оставались неизменными: электромагнитное излучение по своим свойствам считалось резко отличающимся от электронов и других «частиц» материи. Некоторое сближение наметилось, когда у излучения были обнаружены свойства, характерные для частиц, — корпускулярные свойства. Однако волновые свойства считались присущими только электромагнитному полю.

Поэтому насторожено было встречена гипотеза Луи де Бройля (1924) об универсальности, применимости не только к полю, но и веществу, волновых представлений, *корпускулярно-волнового дуализма.*

Действительно, идеи де Бройля могли показаться безумными. Он утверждал, что не только фотоны, но и электроны и любые другие частицы обладают как корпускулярными, так и волновыми свойствами. В 1925 году Эйнштейн писал другу о диссертации де Бройля: «...Прочтите ее! Хотя и кажется, что ее писал сумасшедший, написана она солидно...»

В одной из поздних работ де Бройль так излагает суть своей идеи: «...Теория света страдала редкой болезнью раздвоения между волновой теорией, с одной стороны, и теорией фотонов — с другой. Чтобы исправить положение, следовало воспользоваться принципом „чем хуже, тем лучше“ и перенести эту болезнь на здоровую доселе теорию вещества...»

На первый взгляд, гипотеза де Бройля (импульс тела mV связан с длиной волны λ , характеристикой излучения, соответствующей состоянию этого тела, соотношением $mV\lambda = \hbar$, здесь $\hbar$ — постоянная Планка, фундаментальная постоянная) опровергается повседневным опытом. В окружающих нас предметах и нас самих нет ничего волнового (а волновые свойства определяются способностью волны огибать экран, эффектами дифракции и интерференции на объектах с размерами порядка длины волны).

Оценим длину волны де Бройля электрона и пылинки массой 0,001 г. Электрон имеет массу около 10^{-26} г. Длина волны электрона (ускоренного разностью потенциалов в несколько тысяч вольт, как в телевизоре), рассчитанная по соотношению де Бройля, равна примерно 10^{-9} м (1 нм). Мы можем наблюдать дифракцию электронов на периодических структурах и объектах такого размера: кристаллической решетке, атомных структурах. То есть имеем возможность экспериментально проверить корпускулярно-волновой дуализм электрона (рис. 8.3).

Для пылинки, имеющей такую же скорость, длина волны будет в 10^{23} раз меньше, чем для электрона, то есть равна примерно 10^{-32} м. Мы просто не имеем объектов, на которых может проявлять волновые свойства (дифракция, интерференция) такая волна.

В конце 1999 года австрийскими учеными продемонстрированы волновые свойства молекулы фуллерена C_{60} . С помощью пучка этих молекул получена интерференционная картина. Показано, что аналогичными квантовыми свойствами обладает и молекула C_{70} . Это самые большие объекты, у которых наблюдали волновые свойства.

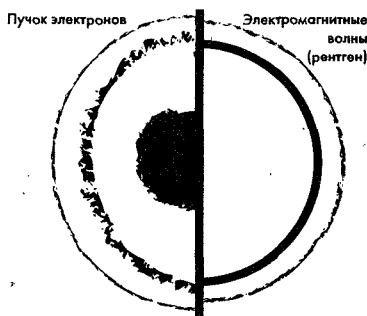


Рис. 8.3
Фотография, иллюстрирующая подобие картин рассеяния электромагнитного излучения (рентгеновские лучи) и электронного пучка тонкой пленкой алюминия

Но, может быть, волновые свойства электронов связаны с тем, что в описанных опыта́х они двигаются в пучке, а не отдельно друг от друга?

В 1949 году В. А. Фабрикант (род. 1907) провел эксперименты, в которых изучали дифракцию очень слабых электронных потоков. Время между «пролетами» двух электронов было почти в миллион раз больше времени прохождения электронов через регистрирующее устройство. При длительной экспозиции были зафиксированы такие же дифракционные картины, как и для плотных пучков (рис. 8.3). То есть волновые свойства присущи именно частицам.

В классической физике частица обладает свойством двигаться по вполне определенной траектории, и в любой момент времени мы можем *точно* определить ее координаты и скорость.

Волна этим свойством не обладает. Она не имеет координат. Нет смысла говорить о длине волны в данной точке пространства (вспомним волны на воде...).

Тогда из корпускулярно-волнового дуализма вытекает совершенно неожиданное правило: если мы точно знаем координаты частицы, то мы совсем не знаем ее скорости и, наоборот, если частица имеет точно определенную скорость, мы ничего не можем сказать о ее координатах — *принцип неопределенности* (2.6), установленный В. Гейзенбергом в 1927 году (лекция 2).

Приведем простейшее рассуждение, приводящее к формулировке этого принципа (такие рассуждения называют мысленным экспериментом, провести его с помощью приборов невозможно).

Пусть мы хотим определить координату и скорость электрона. Для этого мы должны осветить его (свет в качестве измерительного устройства) и зафиксировать координату X . Но длина волны света конечна и равна λ . Тогда, очевидно, мы можем измерить координату тела с точностью до длины волны света (точно так же с помощью линейки можно измерить длину с точностью до минимального деления — 1 мм). То есть точность определения координаты $\Delta X \sim \lambda$.

При измерении часть энергии кванта света — фотона будет передана электрону. То есть неточность в определе-

нии энергии электрона (и его скорости V) будет определяться величиной энергии фотона. Как сказано выше, импульс частицы пропорционален длине ее волны. То есть $\Delta V \sim 1/\lambda$.

Тогда $\Delta X \times \Delta V \sim 1$ есть соотношение неопределенности. Здесь не важно, какая постоянная величина стоит справа. Важно другое — неопределенности определения координаты и импульса связаны друг с другом.

Одно из следствий *принципа неопределенности* состоит в изменении наших взглядов на *принцип причинности*.

Под причинностью мы понимаем наличие причинно-следственных связей между явлениями природы. Законы классической физики полностью определяют судьбу физической системы при условии, что вся необходимая информация нам известна в некоторый определенный момент времени. Пример тому — астрономические расчеты движения небесных тел. Принцип причинности главенствовал в естествознании до начала XX века.

Пьер Симон Лаплас (1749–1827) писал: «...Мы можем рассматривать настоящее состояние Вселенной как следствие ее прежних состояний и как причину для будущих. Разумное существо, которое могло бы знать в какой-либо момент времени все действующие в природе силы, а также соответствующие положения всех составных частей природы, смогло бы — при наличии достаточных аналитических способностей для оценки этих данных — охватить движение величайших небесных тел и мельчайших атомов с помощью одной формулы. Ничто не укрылось бы от этого существа; прошедшее и будущее, в равной степени открытые, легли бы перед ним...»

В квантовой физике, физике микромира, мы никогда не знаем состояние системы с точностью большей, чем это допускается принципом неопределенности. Мы вынуждены перейти на *вероятностное* описание явлений микромира. По яркому выражению Эйнштейна: «...Природа играет в кости...» Заметим, что в природе часто реализуются ситуации, формальная математическая вероятность которых ничтожно мала (пример тому приведен в таблице 7.1).

Один из основателей современной физики, датский ученый Н. Бор (1885–1962), сформулировал еще одно принципиальное положение, описывающее наши взгляды на природу вещества, — *принцип дополнительности*.

Согласно этому принципу, получение экспериментальной информации (вспомним, что физика, да и все естествознание, в основе своей имеют эксперимент) об одних физических величинах, описывающих микрообъект, связано с потерей информации о других величинах, дополнительных к первым. Такими взаимно дополнительными величинами являются, например, координата частицы и ее скорость (кинетическая и потенциальная энергия; напряженность электрического поля в данной точке и число фотонов). С физической точки зрения этот принцип (по Бору) объясняется влиянием измерительного прибора (макроскопический объект!) на состояние микрообъекта. При точном измерении одной из величин дополнительная к ней в результате взаимодействия с прибором претерпевает такое изменение, что ее последующее измерение теряет всякий смысл.

Именно здесь впервые появляется проблема взаимодействия измерительного прибора и исследуемого объекта. При измерении мы изменяем объект и получаем информацию не о независимом от нас объекте, а о результате взаимодействия объекта и прибора. Несколько абзацами выше, проведя мысленный эксперимент, мы показали это на примере измерения скорости и координаты электрона.

Другая сторона *принципа дополнительности* состоит в возможности описания квантовых систем с разных точек зрения. Атом можно описывать и как «планетарную» систему, и как подобное волне состояние. Каждое из описаний одинаково правильно, но применимо в различных условиях. (Способ описания выбирает исследователь!).

Еще один из принципов квантовой физики — *принцип тождественности*, согласно которому невозможно экспериментально различить одинаковые частицы.

Действительно, в классической механике мы всегда можем различить два одинаковых шара, проследив их

траектории до и после столкновений. В квантовой механике такая возможность отсутствует, так как мы можем определить только вероятность обнаружения частицы в той или иной точке пространства. Так, все электроны Вселенной тождественны, мы не имеем способа *пометить* один из них и *следить* только за ним.

Отметим, что сегодня мы знаем примеры проявления квантовых свойств частиц и в макроскопических масштабах. Например, известно так называемое явление *сверхтекучести* жидкого гелия при температурах ниже 2 К. Жидкость течет так, будто отсутствует ее вязкость. Это явление связано с проявлением квантово-механических свойств в макромасштабе. Известны квантовые кристаллы, в которых каждый атом равновероятно занимает любые позиции (что обычно для жидкости или газа) в кристалле. Упорядоченное, кристаллическое состояние при этом сохраняется.

Уже упоминавшийся математик Гротендик пишет: «...В этой новой механике (квантовой) традиционная „материальная точка“ исчезает, уступив место чему-то вроде «вероятностного облака», более или менее плотного в той или иной области пространства. В зависимости от „вероятности“, с которой точка находится в этой области. В этом новом подходе явственно ощущается „мутация“ нашего способа восприятия явлений в механике... — мутация, которая не ограничивается простой заменой математической модели, немного узкой в плечах, другой похожей, но большего размера или лучше скроенной. На этот раз новая модель так мало напоминает старые добрые традиционные модели, что даже математик, будь он при этом большим специалистом в области механики, перед ней вдруг чувствует себя в недоумении, даже в растерянности (или в бешенстве...). Переход от механики Ньютона к эйнштейновской должен ощущаться математиком примерно так же, как переход от давнего, трогательного провинциального диалекта к парижскому жаргону последней моды. Напротив, перейти к квантовой механике — все равно что заменить французский китайским».

Завершая эту тему, необходимо сказать, что и сегодня, более чем через 100 лет после появления понятия

кванта, зарождения представлений о корпускулярно-волновом дуализме, не стихают дискуссии о верности такого описания природы микромира. Однако, с другой стороны, можно заметить, что такое сложное для восприятия описание является основой создания современных устройств. Микроэлектроника, лазеры, системы мобильной связи, компьютеры были бы невозможны без применения представлений о двойственной природе микромира.

ВОПРОСЫ ДЛЯ САМОПРОВЕРКИ

1. Что такое «цвет»? Почему изменяется цвет материала в зависимости от характера освещения (лампы дневного света, лампы накаливания, солнечный свет)?
2. Обнаруженное в конце XIX века различие между наблюдаемым и теоретически ожидаемым спектрами излучения абсолютно черного тела получило название «ультрафиолетовой катастрофы». Почему?
3. Как вы понимаете термин «корпускулярно-волновой дуализм»?
4. Оцените пространственные характеристики объекта, позволяющие обнаружить интерференционную картину с помощью молекул фуллерена.
5. Сформулируете принцип неопределенности. С чем связано его существование?
6. Сформулируйте принцип дополнительности. Почему в квантовой механике возникает проблема измерения?
7. Сформулируйте принципы тождественности и причинности.
8. В чем различия представлений о причинности в XIX и XX веках?

ВТОРОЙ ЗАКОН ТЕРМОДИНАМИКИ. ПОРЯДОК И БЕСПОРЯДОК. САМООРГАНИЗАЦИЯ В НЕЖИВОЙ ПРИРОДЕ

«Мир богаче, чем можно выразить на любом одном языке», — так сформулировал принцип дополнительности лауреат Нобелевской премии, создатель термодинамики неравновесных процессов и физики открытых систем И. Пригожин (род. 1917).

Диапазон доступных исследованию масштабов физического мира фантастичен.

Физика элементарных частиц изучает процессы, протекающие на расстояниях $\sim 10^{-15}$ см за времена $\sim 10^{-22}$ с. В космологии мы встречаемся с временами $\sim 10^{10}$ лет (возраст Вселенной) и, следовательно, с расстояниями $\sim 10^{28}$ см (расстояние до горизонта событий — самое дальнее расстояние, с которого из-за конечности скорости света может быть принят какой-либо физический сигнал).

Эта лекция посвящена рассмотрению некоторых представлений о динамических и статистических закономерностях, о возникновении порядка из хаоса, самоорганизации в неживой природе.

Классическая физика подчеркивает устойчивость, постоянство окружающего нас мира. Сегодня очевидно, что это справедливо лишь в редких случаях. Даже обобщенная с учетом положений квантовой механики и теории относительности динамика (наука о движении и его причинах) не делает различия между прошлым и будущим.

Идея эволюции в неживой природе появилась в естествознании в XIX веке в виде так называемого *второго закона* (или *начала*) *термодинамики* (именно о нем

говорил в лекции «Две культуры» Ч. П. Сноу, указывая, что не знать о нем гуманитарии так же стыдно, как и естественнику не иметь представлений о произведениях Шекспира).

Термодинамика — наука о наиболее общих свойствах макроскопических физических систем, находящихся в состоянии термодинамического равновесия, и о процессах перехода между этими состояниями. Термодинамика строится на основе фундаментальных принципов (начал), являющихся обобщением наблюдений и выполняющихся независимо от конкретной природы образующих систему тел.

Все процессы, протекающие в природе, могут быть разделены на ряд групп.

Они могут быть *равновесными* или *неравновесными*. Если система находится в состоянии равновесия (не обменивается энергией, массой, зарядом) с иными системами, то при неизменных внешних условиях такое состояние не меняется со временем. Однако это не является достаточным признаком равновесности. Если в самой системе существует перенос заряда, массы, энергии и т. п., то есть существуют градиенты (перепады) температуры, концентрации и др., состояние будет *неравновесным*. Пример таких неравновесных процессов — диффузия, теплопроводность, перенос электрического заряда. В *равновесных системах* градиенты температуры или концентрации отсутствуют. Классическая термодинамика рассматривает системы, близкие к равновесности.

Под влиянием внешних воздействий система может переходить из одного равновесного состояния в другое, проходя через некоторые переходные состояния, не являющиеся равновесными. Такой переход будет *обратимым*, если его можно совершить в обратном направлении и при этом в окружающей среде *не останется никаких изменений*. В противном случае мы будем иметь дело с *необратимым* процессом.

Обратимые и необратимые процессы различаются фундаментальным образом. В качестве примера необратимого процесса можно привести диффузию, приводя-

щую, в простейшем случае, к однородному распределению массы. Примером обратимого процесса служат колебания математического маятника (при пренебрежении трением, другими потерями энергии). Именно необратимые процессы указывают направления течения времени (лекция 6).

Первый закон (начало) термодинамики — закон сохранения энергии в замкнутой (изолированной) системе в случае, когда в ней имеют место механические и тепловые процессы. Полная энергия замкнутой системы не изменяется (вечный двигатель первого рода невозможен). То есть предполагается, что возможен полный переход тепловой энергии в механическую и обратно.

Однако опыт конструирования тепловых машин уже в начале XIX века показал, что это невозможно. Коэффициент полезного действия тепловых машин всегда меньше единицы (часть теплоты неизбежно рассеивается в окружающую среду). Для любой тепловой машины всегда необходимы три элемента — нагреватель, рабочее тело, холодильник. Второй закон термодинамики обобщает этот факт.

В 1850 году немецкий физик Р. Клаузиус (1822–1888) сформулировал **второе начало**: невозможен процесс, при котором теплота переходила бы самопроизвольно от более холодных тел к более нагретым.

Независимо от Клаузиуса в 1851 году У. Томсон (лорд Кельвин) (1824–1907) дал второму началу формулировку: невозможно построить периодически действующую тепловую машину, вся деятельность которой сводилась бы к совершению механической работы и охлаждению теплового резервуара.

На кухне работает холодильник. Это обычная тепловая машина. Нагревателем в нем являются охлаждаемые продукты, рабочим телом — фреон, холодильник — окружающий воздух. Тепловая энергия отнимается от продуктов и передается окружающей среде за счет работы компрессора. То есть циклические процессы конденсации и испарения рабочего тела обеспечиваются внешним по отношению к системе источником энергии.

В 1854 году Клаузиус ввел понятие *энтропии* (см. лекцию 6). При температуре T изменение энтропии ΔS изолированной системы при сообщении последней теплоты ΔQ определяется соотношением

$$\Delta S = \Delta Q / T. \quad (9.1)$$

При *обратимых процессах* полное изменение энтропии ΔS системы равно нулю. Однако, если процесс *необратим*, то изменение энтропии ΔS больше нуля. То есть энтропия замкнутой системы при необратимых процессах возрастает.

В 1872 году Л. Больцман (1844–1906) установил, что возрастание энтропии обусловлено переходом системы из менее вероятного состояния в более вероятное (6.1). Иными словами, *эволюция замкнутой системы осуществляется в направлении наиболее вероятного перераспределения энергии по отдельным подсистемам.*

На основании этого возникла драматическая формулировка второго начала термодинамики, принадлежащая Клаузиусу: «Энтропия Вселенной возрастает». Из этого утверждения следует, что Вселенная движется к «тепловой смерти».

Все виды энергии во Вселенной в конце концов перейдут в энергию теплового движения, равномерно распределенную по веществу. Все макроскопические процессы, определяющиеся переносом энергии, массы, заряда, прекратятся.

Действительно, при таком «сценарии» развития Солнце, и звезды в какой-то момент израсходуют запасы свободной энергии, излучив их во всех направлениях. Ярко светящиеся звезды погаснут. Все существующие в природе перепады температур выровняются, и все тела приобретут некоторую одинаковую среднюю температуру. При этом, в соответствии с законом сохранения энергии, полная энергия Вселенной сохранится. Но исчезнет вся жизнь, ни одна машина не сможет прийти в движение.

Столь мрачная картина «тепловой смерти» основана на предположении, что второе начало термодинамики применимо без ограничений, абсолютно во всех областях физики, во всех точках пространства, во все моменты времени.

Какие возражения могут быть сформулированы против этой гипотезы?

Во-первых, второе начало термодинамики (или закон возрастания энтропии) получено обобщением данных наблюдений и опытов, относящихся к ограниченным (пусть и очень большим) системам. Распространение же этого начала на всю Вселенную есть очень грубая экстраполяция, для которой нет достаточных оснований.

Во-вторых, Вселенная не является изолированной (замкнутой, закрытой) системой. По современным представлениям она неоднородна, нестационарна.

В-третьих, за счет существующих взаимодействий, в первую очередь — гравитационных, роль в эволюции отдельных областей Вселенной играют флуктуации, случайности, никак не учтенные термодинамикой начала XX века.

Гипотеза «тепловой смерти» не согласуется с наблюдениями над Вселенной в ее современном состоянии, а также с выводами, которые можно сделать из известного нам прошлого Вселенной. Наблюдается непрерывный рост разнообразия, эволюция в направлении возникновения более сложных форм. Основные причины формирования звезд, галактик, планет — флуктуации плотности и гравитационное взаимодействие (лекция 12).

Рассмотрим, что происходит с системой, далекой от равновесности, с большими перепадами температур и концентраций.

Поместим смесь двух газов в сосуд, стенки которого имеют разные температуры. Оказывается, что один из газов (более тяжелый) соберется у холодной стенки, а другой — у горячей. То есть из неупорядоченной смеси получается система с высокой степенью упорядоченности. Этот метод использовали для разделения изотопов урана.

Неравновесность служит источником упорядоченности!

Здесь необходимо остановиться на терминологии. Что такое порядок и беспорядок, хаос?

Идея порядка столь же стара, как и само мышление. Понимать — значит упорядочивать чувственные впечатления, выводя из частных общие. И далее — устанавливать

соответствие между идеями, синтез идей. Затем — на основании найденных соотношений предсказывать ожидаемые результаты, сопоставляя их с опытом, наблюдением.

Особенно велика роль идеи порядка в естественных науках, ограничивающихся рассмотрением лишь доступной измерениям части мира.

Порядок можно отождествить с существованием общих, однотипных отношений в широком классе объектов, явлений. В математике единственным ограничением хода рассуждений является требование логической обоснованности связей между произвольно выбранными объектами. В физике эти объекты берутся из окружающего мира и поэтому измеримы. Они уже не могут быть произвольными. К физике сводятся, в принципе, и прочие науки, имеющие дело с более сложными объектами, — химия, геология и т. п.

При высокой степени неравновесности системы проявляются и другие эффекты.

Как пример циклического процесса рассмотрим эволюцию звезды. С одной стороны, известен большой эволюционный цикл, в котором идет обмен веществом между звездами и межзвездной средой. В этот цикл вовлечено все вещество Вселенной. С другой стороны, существуют периодические эффекты и меньшего масштаба, наблюдаемые на примере отдельной звезды. Это пульсации светимости некоторых звезд.

В галактиках из облаков межзвездного газа непрерывно образуются звезды. Облако газа в начальный момент формирования звезды находится в сильно неравновесном состоянии. Вследствие локальных флуктуаций, колебаний, плотности меняется энергия частиц, их концентрация.

В итоге первоначально однородное межзвездное вещество разделяется на части — внешнюю, охлаждающуюся при расширении, и внутреннюю, сжимающуюся под действием гравитационных сил. Внутренняя часть разогревается, в ней начинается термоядерная реакция, происходит изменение химического состава. Звезда испускает вещество, пополняющее межзвездную среду, даю-

щую, в свою очередь, жизнь новым звездам. Таким образом, звезды и межзвездная среда вовлечены в устойчивый циклический процесс взаимного перехода.

Одновременно происходит образование несжигаемых остатков — сердцевин потухших звезд. То есть часть вещества перестает участвовать в циклическом процессе. Для Солнца период гравитационного сжатия составляет несколько миллионов лет, время расходования водорода при термоядерной реакции — миллиарды лет. То есть эти циклические процессы — крайне растянуты во времени. Подробнее эти процессы рассмотрены в лекции 12.

Однако в жизни звезд известны и значительно более кратковременные циклические процессы. Это пульсации светимости звезд-цефеид. У этих звезд происходит обмен веществом между внешними и внутренними оболочками. В сжатом состоянии гелий легче ионизируется под действием излучения, то есть возрастает светимость внешних оболочек звезды. При расширении гелий возвращает внешним оболочкам энергию, затраченную на его ионизацию. Два процесса — затухание тепловых колебаний и фотохимические процессы — ведут к циклическому процессу изменения светимости звезды.

В настоящее время известно множество примеров образования упорядоченных состояний в результате неравновесных процессов. При этом наблюдается как пространственное упорядочение, так и упорядочение во времени.

Такие состояния И. Пригожин назвал *диссипативными структурами*. Этим названием подчеркивается, что они возникают в системах с потерей (диссипацией) энергии в ходе необратимых неравновесных процессов. Диссипативные структуры могут образовываться только в открытых системах, в которых возможен поток энергии, частиц и т. п. Эти структуры возникают в макроскопических системах, состоящих из большого числа элементарных составляющих (атомов, клеток, звезд — в зависимости от масштаба явления).

Диссипативные структуры являются устойчивыми, стационарными образованиями. Их устойчивость зависит только от устойчивости и времени существования источников энергии.

Рассмотрим сосуд, подогреваемый снизу. До какого-то момента (перепад температур между дном и поверхностью мал) тепло переносится за счет теплопроводности жидкости. Однако при определенном градиенте температур в жидкости внезапно, без какого-либо дополнительного воздействия, возникают ячейки конвективных потоков с регулярным течением жидкости — *ячейки Бенара*. То есть возникает упорядоченная структура при некоторой степени неравновесности системы. При этом отдельная ячейка Бенара содержит около 10^{21} атомов. Такие ячейки достаточно просто наблюдать при кипении воды в сосуде с толстым дном.

Известны примеры химических реакций, обладающих удивительными чертами самоорганизации. Наиболее известная из них — реакция Белоусова-Жаботинского (описанная в 1958 году). При определенных условиях при окислении лимонной кислоты броматом калия, катализируемом ионной парой Ce^{4+} – Ce^{3+} , происходят периодические колебания концентрации ионов брома и отношения концентраций ионов церия разной валентности.

Появляющиеся структуры резко отличаются от «равновесных структур». Они могут существовать вдали от равновесия лишь за счет значительных потоков энергии и вещества.

В качестве примера такой системы может служить и город, существующий до тех пор, пока он является потребителем пищи, топлива, других предметов и производителем различной продукции и отходов.

Эти методы плодотворны при исследовании процессов, связанных со спонтанной коллективной деятельностью людей: динамики фондовых бирж и применении к экономике вообще, изучение сетей транспортных магистралей (например, возникновение «пробок»). Одно из исследований было посвящено анализу поведения толпы в состоянии паники, когда люди покидают помещение через узкую дверь в экстренном случае, например при пожаре. Природа человека такова, что в таких ситуациях он часто ведет себя так же, как и все вокруг, — именно это и позволяет рассматривать (к счастью, только

приближенно) толпу людей как набор объектов, следующих простым правилам.

Удивительно, как много того, что можно описать с помощью весьма простого формализованного подхода, которому все равно, к чему его применяют — к действиям больших коллективов людей или молекул! Заметим, описание получается, конечно, неточным, приблизительным, вероятностным.

ВОПРОСЫ ДЛЯ САМОПРОВЕРКИ

1. Что такое замкнутая система? Существуют ли такие системы? Приведите примеры.
2. Определите понятия «равновесный» и «неравновесный процесс». Приведите примеры.
3. В чем суть гипотезы «тепловой смерти» Вселенной? Почему она ошибочна?
4. Попробуйте понаблюдать за кипением воды в кастрюле и получить упорядоченную структуру. Лучше, если кастрюля будет с толстым дном.
5. Приведите собственные примеры возникновения упорядоченных структур из хаоса.

ВСЕЛЕННАЯ

Греки космосом называли мир упорядоченный, прекрасный в своей гармонии в отличие от Хаоса — первозданной сумятицы. Все наши знания о Вселенной происходят из наблюдений. Единственным источником информации является свет, пришедший из дальних миров.

Энергия, полученная с помощью оптических телескопов с момента их создания (Г. Галилей, 1609–1610), ничтожно мала и достаточна для нагрева стакана воды на 0,01 К. За всю историю развития радиоастрономии (в 1931 г. впервые зафиксировано радиоизлучение Млечного пути) — всего на 10^{-7} К.

И на этой основе базируются все наши сведения о Вселенной!

На протяжении всей истории человек воспринимал и анализировал с помощью органов чувств лишь видимый свет, незначительный интервал электромагнитного излучения.

Что видели наши древние предшественники? Что видим мы? Смену дня и ночи, движение Луны, Солнца. Движение на ночном небосводе неких конфигураций звезд — созвездий.

Созвездия как отдельные группы звезд на небе наблюдатели выделяли уже в глубокой древности. Каждое созвездие получило название, различное в разных странах и даже в одной стране в разных религиях (рис. 10.1). Сегодня на звездном небе 88 созвездий (по решению Международного астрономического совета в 1930 году), около 240 звезд имеют собственные имена. Наиболее извест-

ное созвездие неба Северного полушария — Большая Медведица. Его старинное русское название — Воз.

Мистическое влияние приписывают созвездиям Зодиака. Уже ко II веку до нашей эры годовой путь Солнца среди звезд разделили на 12 частей, каждую из которых обозначили символом ближайшего к ней созвездия, знака зодиака. В настоящее время из-за особенностей движения Земли (прецессии оси вращения, см. лекцию 15) зодиакальные знаки не совпадают с соответствующими созвездиями. Так, 22 марта Солнце входит в зодиакальный знак Овна, фактически находясь в созвездии Рыб. Человек, рожденный «под знаком Близнецов» должен помнить, что Солнце в это время было на самом деле в созвездии Тельца. Такие мелочи не останавливают любителей астрологии, а интерес к оккультным предсказаниям подогревается средствами массовой информации.

В 1991 году любитель-астроном из США объявил конкурс с премией в 10 000 долларов. Условия конкурса очень просты — сделать снимок затменного Солнца 11 июля (в момент полного солнечного затмения в Лос-Анджелесе в 1991 года) на фоне созвездия Рака. Но надо знать, что 11 июля Солнце будет в созвездии Близнецов. Только астрологи считают, что Солнце в этот день находится в созвездии Рака. Именно для этого они предпочитают говорить не о созвездиях, а о «знаках». За тысячелетия, прошедшие с момента создания астрологических таблиц, прецессия земной оси изменила видимое положение Солнца.

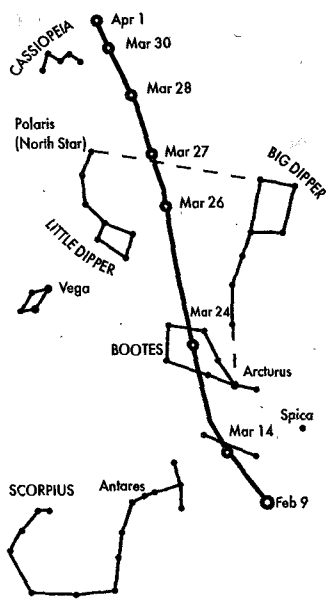


Рис. 10.1
Путь кометы Хейя-Кутаки
в проекции на созвездия
северного неба

Остановимся на единицах измерений, применимых для гигантских масштабов Вселенной.

Световой год — используется в популярной литературе. Соответствует расстоянию, которое свет пройдет за один год, около 10 000 миллиардов км.

Астрономическая единица — радиус орбиты Земли ($1 \text{ а. е.} = 1,496 \times 10^{11} \text{ м}$).

Парсек (параллакс-секунда) — в научной литературе применяется для измерения межзвездных и межгалактических расстояний.

Эффект параллакса легко обнаружить, посмотрев на палец вытянутой руки сначала одним, а потом другим глазом. Изображение пальца двигается, так как вы смотрите на палец с двух разных точек — левым и правым глазом.

Парсек (пс) — расстояние, с которого радиус земной орбиты виден под углом 1 с (отсюда и название). Под таким углом монета достоинством в 1 копейку видна с расстояния 3 км. Самая ближняя звезда-соседка Солнца — Проксима (в переводе с древнегреческого — ближайшая) Центавра находится от нас на расстоянии 1,3 пс. Определить это расстояние достаточно просто. Если мы знаем диаметр орбиты Земли, то по проекции положения звезды на «неподвижной» небесной сфере, наблюдаемой с противоположных относительно Солнца точек орбиты, можно определить угловое смещение (параллакс) изображения звезды (рис. 10.2). Для Проксимы Центавра параллакс равен 0,751 угловой секунды. Тогда для этой звезды расстояние будет равно $4,1 \times 10^{13} \text{ км}$ или 1,3 пс.

Окружающие Солнце звезды составляют лишь ничтожную часть гигантского скопления звезд и туманностей, именуемого Галактикой (с большой буквы — в ней находится Солнечная система).

Это скопление звезд мы знаем как *Млечный Путь*.

Млечный Путь — довольно большая Галактика, имеет диаметр около 40 000 пс. Самая близкая Галактика — Магеллановы Облака в созвездии Анд-

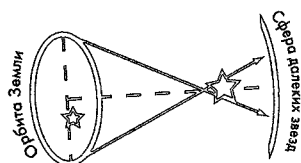
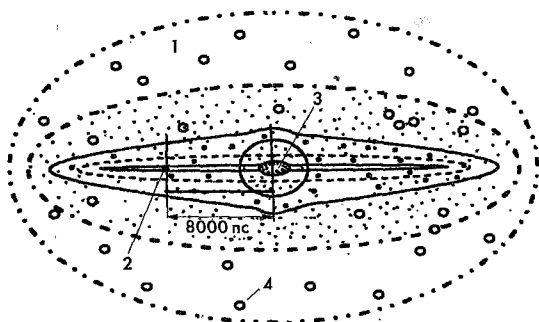


Рис. 10.2
К определению расстояния до звезды

Рис. 10.3
Строение
Галактики

1 — сферическая составляющая; 2 — Солнце; 3 — ядро; 4 — шаровое скопление.



ромеды (и по расстоянию, и по размерам) находится на удалении 720 000 пс. То есть отношение расстояния между галактиками к их средним размерам около 20.

Расстояние до ближайшей к Солнцу звезды $4,1 \times 10^{13}$ км при диаметре Солнца около $1,5 \times 10^6$ км. Тогда отношение расстояния между типичными звездами к их размеру около 10^7 . Ясно, что это число характеризует вероятность столкновения объектов. Чем оно больше, тем менее вероятно такое явление. То есть столкновение галактик значительно более вероятно, чем столкновения звезд (и действительно наблюдаются последствия таких столкновений).

Средняя плотность галактик в наблюдаемой части Вселенной около 3 на 1 кубический миллион парсеков, то есть среднее расстояние между ними — около 700 000 пс. Типичная скорость движения галактик около 1000 км/с. Так, для прохождения расстояния до ближайшей соседки требуется около 1 миллиарда лет. Если учесть размеры галактик и случайность направления движения, то окажется, что за 10^{13} лет (оценочное время существования Вселенной) каждая галактика может испытать, по меньшей мере, одно столкновение с себе подобной.

Размеры Галактики (рис. 10.3): радиус — около 20 000 пс, толщина в центральной части — около 5000 пс. Скорость движения Солнца по галактической траектории на расстоянии около 8000 пс от центра Галактики близка к 300 км/с.

Около галактической плоскости расположено 95% массы Галактики. На долю сферической составляющей 1

приходится около 5% вещества Галактики. Важными представителями сферической составляющей являются шаровые скопления звезд.

Если в окрестностях Солнца на 10 кубических парсеков приходится одна звезда, то в шаровых скоплениях она в пять раз выше, а около центра скопления доходит до одного миллиона звезд на кубический парсек.

Много неясного связано и с ядром Галактики. Его диаметр, видимый с Земли, около 9 градусов, линейные размеры около 4000 световых лет. Ядро является источником очень мощного радиоизлучения.

В 1934 году Э. Хаббл подсчитал, что на один квадратный градус приходится в среднем 131 галактика со светимостью до 20 звездной величины (лекция 11). Сфера содержит 41 253 квадратных градуса. То есть общее число галактик до двадцатой звездной величины на небесной сфере около 6 миллионов. Более того, показано, что галактики в пространстве распределены достаточно однородно.

Внимательное изучение спектров галактик позволило сделать одно открытие фундаментальной важности. Было обнаружено (Э. Хаббл, 1929 год), что у удаленных галактик спектральные линии всегда смещены в красную область спектра («красное смещение»).

Частота излучения, измеряемая наблюдателем, зависит от направления и скорости движения источника относительно наблюдателя. С таким явлением мы сталкиваемся, например, когда стоим на железнодорожной станции и мимо нас на большой скорости проходит состав. Этот эффект был описан в 1842 году австрийским физиком Х. Доплером (1803–1853) и носит его имя.

Когда источник (звуковой волны или электромагнитного излучения) приближается, для наблюдателя его спектр смещается в сторону коротких длин волн («фиолетовое смещение»). Когда же источник удаляется, то его спектр для наблюдателя смещается в сторону больших длин волн («красное смещение»). Заметим, что частота излучения самого источника при этом остается неизменной. Кстати, именно эффект Доплера лежит в основе электронных устройств, применяемых сотрудниками органов внутренних дел для измерения скорости автомобиля.

«Красное смещение», то есть уменьшение частоты излучения, спектральных линий является свидетельством того, что все галактики удаляются от нас. Скорость разлета весьма велика. Так, радиогалактика 3С295 (излучающая в основном радиоволны), удаленная от нас на 5 миллиардов световых лет, улетает со скоростью 138 000 км/сек (половина скорости света!).

Никто не знает, как возникла Вселенная. Моделей зарождения Вселенной существует много. Все они основаны на фактах разлета удаленных галактик и наличии обнаруженного в 1965 году реликтового излучения (А. Пензиас и Р. Уиллсон, Нобелевская премия 1967 года).

Интенсивность этого излучения не зависит от направления, в котором его наблюдают исследователи с Земли, — оно изотропно в пространстве. Интенсивность реликтового излучения очень мала и соответствует излучению черного тела с температурой 3 К (рис. 10.4).

При этом мы должны отметить, что Вселенная, видимо, конечна и существует ограниченное время. Действительно, если бы Вселенная существовала *бесконечно* долго и была бы *бесконечной*, свет от всех заполняющих ее звезд (*бесконечно* большого числа) дошел бы до Земли, и ночной небосвод был бы не черным с вкраплениями звезд, а светлым. Это заключение носит название парадокса Ольберса (по фамилии сформулировавшего его в 1826 году Г. Ольберса).

Кроме того, в бесконечной Вселенной энергия гравитационного взаимодействия любого тела со всеми другими была бы бесконечно большой, то есть ньютоновскую теорию тяготения к Вселенной применять нельзя (это заключение носит название парадокса Зеелигера и сформулировано в 1895 году).

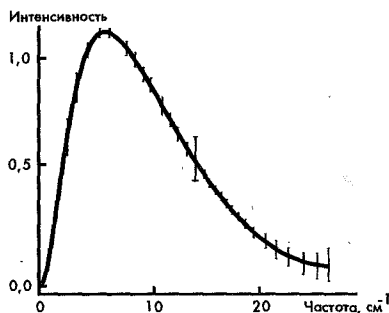


Рис. 10.4

Спектр реликтового излучения

В какую бы точку пространства ни был направлен радиотелескоп, он обнаружит реликтовое излучение.

Одна из наиболее вероятных моделей Вселенной — модель Большого взрыва. Наличие реликтового излучения — одно из подтверждений этой модели. Около 10–14 миллиардов лет назад вещество Вселенной существовало в виде объекта сверхбольшой плотности. Что это за состояние? Что происходило с ним при Большом взрыве?

Комбинируя три фундаментальных физических постоянных: скорость света c , гравитационную постоянную G и постоянную Планка $\hbar$ можно получить некие характерные длину l , время t , массу m и плотность ρ :

$$\begin{aligned} l_p &= \sqrt{\frac{G\hbar}{c^3}} = 1,6 \times 10^{-33} \text{ см}, \\ t_p &= \frac{l}{c} = \sqrt{\frac{G\hbar}{c^5}} = 5,3 \times 10^{-44} \text{ с}, \\ m_p &= \sqrt{\frac{ch}{G}} = 2,2 \times 10^{-5} \text{ з}, \\ \rho_p &= \frac{m_p}{l_p^3} = \frac{c^5}{G^2 \hbar} = 5 \times 10^{93} \text{ з/см}^3. \end{aligned} \quad (10.1)$$

Современные представления о зарождении Вселенной оперируют этими величинами и позволяют проанализировать возникновение Вселенной, считая эти величины исходными для дальнейших рассуждений. При этом все наши представления о Большом взрыве начинаются с момента $t \sim 10^{-44}$ с (другие оценки — 10^{-35} с). Что было до этого момента?

Модель расширяющейся Вселенной была сформулирована А. А. Фридманом (1888–1925) в 1922–1923 годах еще до обнаружения «красного смещения» в спектрах галактик.

В модели Большого взрыва раннюю стадию развития Вселенной можно разделить на ряд этапов. Первый этап — эра тяжелых частиц и мезонов. Основную роль играет излучение. В конце этого промежутка частицы аннигилируют с античастицами, остается небольшой избыток частиц (время после Большого взрыва $t < 10^{-4}$ с, плотность материи $\rho > 10^{14}$ г/см³, температура $T > 10^{12}$ К).

Второй этап — лептонная эра. Основную роль играют легкие частицы — электроны, позитроны, нейтрино и антинейтрино. Заканчивается этап аннигиляцией электрон-позитронных пар ($t < 10$ с, $\rho > 10^4$ г/см³, $T > 10^{10}$ К). Третий этап — эра радиации. Излучение «отделяется» от вещества. Реликтовое излучение является как раз результатом этого процесса ($t > 10$ с, $\rho < 10^4$ г/см³, $T > 3000$ К). На четвертом этапе формируются протозвезды и протогалактики ($t \sim 1\,000\,000$ лет, $\rho \sim 10^{-21}$ г/см³, $T \sim 3000$ К).

ВОПРОСЫ ДЛЯ САМОПРОВЕРКИ

1. Что такое созвездие? Одинаково ли расстояние до звезд, входящих в созвездие?
 2. Как по созвездию Большая Медведица найти Полярную звезду?
 3. Как измерить расстояние до звезды? Для каких звезд подходит метод параллакса?
 4. Почему вероятность столкновения галактик больше вероятности столкновения звезд?
 5. Что такое «красное смещение»? Приведите примеры из своего опыта.
 6. Что мы понимаем, когда говорим: «Вселенная расширяется»?
 7. Мы наблюдаем разбегание галактик, значит ли это, что наблюдатель на Земле находится в центре Вселенной?
-

ЛЕКЦИЯ ОДИННАДЦАТАЯ

ЗВЕЗДЫ. КЛАССИФИКАЦИЯ ЗВЕЗД

Ежедневно мы невооруженным глазом наблюдаем мириады звезд. С ними связаны легенды, верования. Культура человечества содержит целые пласты, связанные со звездами.

Классификация звезд основывается на таких характеристиках звезд, как масса, светимость (полное количество энергии, излучаемое звездой), радиус и температура поверхностных слоев.

Температура звезды определяет цвет звезды, то есть ее спектральные характеристики. Температуру нагретого тела оценивают по зависимости интенсивности излучения

от длины волны (рис. 11.1), лекция 8. Чем выше температура излучающего тела, тем дальше в область коротких волн сдвигается максимум интенсивности излучения. Этот факт сформулирован в законе Вина: длина волны, соответствующая максимуму энергии, излучаемой абсолютно черным телом, обратно пропорциональна его температуре.

Если температура поверхностных слоев звезды (как и любого нагретого тела) 3000-4000 К, то ее цвет красноватый.

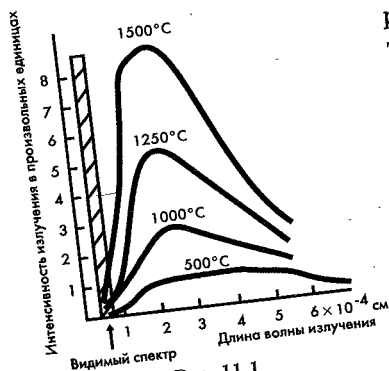


Рис. 11.1

Связь интенсивности спектра излучения с температурой нагретого тела

Сравните рисунок с рис. 8.1 и 10.4.

тый, при температуре 6000–7000 К — желтоватый. Очень горячие звезды имеют белый и голубоватый цвета (10 000–12 000 К). Подавляющее большинство звезд имеют температуру около 3500 К.

Таким образом, измерение зависимости интенсивности излучения от его длины волны позволяет оценить температуру поверхности звезды.

Светимость звезды (количество энергии, испускаемое звездой в единицу времени) определяют с использованием так называемой величины звезды (звездной величины). По определению, если наблюдаемая светимость (блеск) одной звезды больше светимости другой в 100 раз, то они будут отличаться друг от друга на 5 видимых звездных величин. Нетрудно подсчитать, что блеск звезды нулевой и двадцатой звездной величин будет отличаться в 100 миллионов раз.

По международным соглашениям отсчет звездных величин первоначально был установлен по Полярной звезде, ее звездная величина была принята за +2. Однако оказалось, что Полярная звезда — переменная и не подходит для этих целей. Поэтому сейчас нуль-пункт установлен при помощи других звезд, светимость которых точно измерена. Звезда, имеющая звездную величину +3 ярче Полярной в 2,512 раза, а звездную величину +1 — слабее Полярной в 2,512 раза. Сириус ярче Полярной звезды в 25 раз, что соответствует разности звездных величин 3,5. Поэтому звездная величина Сириуса $+2,0 - 3,5 = -1,5$. Невооруженным глазом видны звезды, имеющие звездную величину +6 и меньше.

Шкала видимых звездных величин, доступных для наблюдения современными оптическими приборами, заключена от -26,7 для Солнца (самой яркой звезды нашего неба) до +24 для самой слабой из видимых звезд. Два фактора обуславливают этот огромный диапазон звездных величин — диапазон присущих звездам значений светимости и разнообразие их расстояний от Земли.

Солнце гораздо ярче других звезд. Однако это совсем не значит, что его светимость самая большая. Оно просто близко. Для корректного сравнения светимостей необходимо исключить фактор расстояния. В связи с этим

введено понятие *абсолютной звездной величины* как видимой звездной величины, которую звезда имела бы, находясь на расстоянии 10 пс от Солнца. Именно эта характеристика и будет определять светимость звезды. Абсолютная звездная величина Солнца +5.

Так как расстояния до Солнца и Проксимы Центавра меньше 10 пс, то их абсолютные звездные величины меньше видимых звездных величин. Для остальных звезд — абсолютные звездные величины больше видимых звездных величин.

Возникает вопрос: почему так важно уметь сопоставлять характеристики звезд, учитывать поправки на расстояние и другие причины (например, межзвездное поглощение), о которых мы не говорим? Только в этом случае мы можем получать объективную информацию о звезде и имеем возможность сопоставлять поведение разных звезд на разных этапах эволюции.

Измерив расстояние до звезды (используя для достаточно близких звезд метод параллакса) и видимую звездную величину, мы получаем абсолютную звездную величину звезды, являющуюся мерой ее светимости. По измерениям зависимости интенсивности излучения звезды от длины волны можно установить ее температуру. Известно, что энергия, излучаемая единицей площади поверхности нагретого тела, пропорциональна четвертой степени температуры T тела (закон Стефана-Больцмана):

$$Q = \sigma T^4. \quad (11.1)$$

Полная энергия, испускаемая звездой (светимость), будет определяться радиусом звезды R :

$$L = 4\pi\sigma R^2 T^4. \quad (11.2)$$

Здесь σ — постоянная величина.

Отсюда мы можем оценить радиус звезды, абсолютная звездная величина и температура которой известны. Для этого надо использовать соотношения (11.1) и (11.2) для Солнца (абсолютная звездная величина +5, радиус 700 000 км, температура 6000 К) и составить пропорцию.

Радиусы звезд меняются в очень широких пределах: есть звезды, по своим размерам не превышающие Землю

(«белые карлики»); нейтронные звезды имеют радиусы в несколько десятков километров. Существуют огромные «пузыри» — сверхгиганты, внутри которых может поместиться орбита Марса (тысячи радиусов Солнца).

Массы звезд изменяются в сравнительно узких пределах. Очень мало звезд, массы которых больше или меньше массы Солнца в 10 раз. Типичные значения масс звезд лежат в диапазоне 0,03–60 масс Солнца. Плотность Солнца $1,4 \text{ г/см}^3$, плотность «пузырей» — в миллионы раз меньше. Плотность «белых карликов» и нейтронных звезд — до 10^{12} г/см^3 .

При возрастании температуры меняется не только длина волны, которой соответствует максимум излучения (рис. 11.1), но и проявляется влияние внешних оболочек звезды на ее спектр. Возможна классификация звезд по особенностям их спектров излучения. **Спектральная классификация** содержит семь классов, обозначаемых буквами O, B, A, F, G, K, M — от самых горячих звезд к самым холодным. (*Мнемонические правила: Один Великий Англичанин Финики Жевал Как Морковь; O, Be A Fine Girl, Kiss Me.*) Каждый класс разбивается на 10 подклассов — B0, B1, B2 ... B9. Солнце — звезда класса G2 (табл. 11.1).

Внешние оболочки звезды, как правило, представляют собой сильно ионизированные водород и гелий, плазме с одинаковым числом положительно и отрицательно ионизированных частиц. Тяжелые элементы, также в ионизированном состоянии, присутствуют в виде незначительных «добавок». Заметим, что возможна ситуация, когда

Таблица 11.1

Звездные спектры и температура звезды

Класс	Температура, К	Класс	Температура, К
O	50 000	G2 (Солнце)	5800
B0	25 000	K0	5100
A0	11 000	M0	3600
F0	7600	R и N (очень холодные)	2000
G0	6000		

атомы полностью потеряют электроны. В этом случае отдельно существуют ядра и электроны, понятие химического элемента исчезает.

Химический состав звезды определяют по ее спектру излучения. Средний химический состав наружных слоев звезды выглядит примерно следующим образом. На 10 000 атомов водорода приходится 1000 атомов углерода, 5 атомов кислорода, 2 атома азота, 1 атом углерода, 0,5 атома железа. Содержание других элементов еще ниже. В то же время необходимо отметить, что тяжелые элементы, занимая во Вселенной весьма скромное место, определяют характер эволюции звезд. Кроме того, вопрос возникновения жизни на Земле, существования жизни во Вселенной прямо связан с эволюцией химических элементов, их происхождением.

Класс А, например, включает так называемые водородные звезды со спектрами излучения, характерными для водорода. Типичная звезда этой группы — Сириус.

Класс F включает звезды, в спектрах которых особо выделяются спектральные линии кальция и водорода.

К классу G относятся звезды, в спектрах которых кроме спектральных линий кальция и водорода видны спектральные линии многих металлов, особенно железа. Солнце принадлежит к этой группе, поэтому звезды такого типа часто называют звездами солнечного типа.

Звезды класса K имеют в спектрах интенсивные линии кальция и линии, указывающие на присутствие других металлов.

В класс M входят звезды, спектры которых содержат полосы, характерные для окислов металлов, особенно окиси титана. Максимум излучения сдвинут в красную область спектра. Типичный представитель — звезда Бетельгейзе (созвездие Ориона).

Важную роль в поведении звезд играют магнитные поля. В пятнах на Солнце магнитное поле достигает 4000 Э. Это поле, которое можно получить на Земле с помощью относительно сильного электромагнита. Напряженность магнитных полей отдельных звезд достигает 10 000 Э.

Мы перечислили основные характеристики звезд. Возникает вопрос: существует ли какая-либо связь меж-

ду ними? Можно ли систематизировать существующие данные о миллионах наблюдаемых звезд?

Рассчитанные по данным наблюдений светимость, температура и радиус звезды связаны друг с другом. При помощи уравнений (11.1) и (11.2) по двум из этих параметров можно рассчитать третий. Звезды, как мы видим, чрезвычайно разнообразны.

Звезды с наибольшими светимостями в миллионы раз ярче Солнца. Звезды, имеющие самые слабые светимости, — примерно в миллион раз слабее Солнца. Поверхностные температуры самых горячих звезд — сотни тысяч кельвинов, самых холодных — около 1000 К. Различны и радиусы звезд.

Можно было бы ожидать, что во Вселенной, содержащей миллионы и миллионы звезд, представлены любые возможные сочетания этих параметров. Это предположение можно проверить, выбрав любые два параметра для большого количества звезд и построив диаграмму, связывающую их.

В 1905 году Э. Герцшпрунг и Г. Рессел независимо друг от друга заметили, что голубые (горячие) звезды малой светимости встречаются очень редко, а красные звезды образуют две группы. В 1911 году Герцшпрунг, а в 1913 году — Рессел начали строить диаграммы, связывающие светимость звезд со спектральным классом.

Сегодня диаграмма, на которую нанесены большинство известных звезд (измерять температуры и определять спектральные классы совсем слабых звезд практически невозможно), носит название диаграммы Герцшпрунга–Рессела (рис. 11.2).

Звезды лежат на этой диаграмме не случайным образом, а образуют явно выраженные последовательности. Большинство звезд находится в пределах сравнительно узкой полосы, идущей от левого верхнего угла диаграммы к правому нижнему. Это так называемая *главная последовательность*. В верхнем правом углу — довольно беспорядочная группировка звезд. Их спектральные классы — G, K, M. Это яркие звезды с абсолютными звездными величинами от +2 до -6 — «красные гиганты». В левой нижней части диаграммы — небольшое

количество звезд. Их абсолютные величины $+10$ и больше, а спектральные классы от В до F. То есть это горячие звезды с низкой светимостью. Но низкая светимость при высокой поверхностной температуре может быть только тогда, когда радиус звезды мал. В этой части диаграммы находятся маленькие горячие звезды — «белые карлики».

Для того чтобы получить представление об относительном количестве звезд разных последовательностей, можно построить диаграмму Герцшпрунга–Рессела для близких окрестностей Солнца (рис. 11.3).

В объеме радиусом 5 пс подавляющее количество звезд слабее и холоднее Солнца. Это — «красные карлики». Только три звезды излучают сильнее Солнца — Сириус, Альтаир и Прокцион. Зато на рисунке пять белых карликов. Это является свидетельством того, что во Вселенной их количество достаточно велико. Оценки показывают, что «белых карликов» в нашей звездной системе (Галактике) по крайней мере несколько миллиардов (полное количество звезд в нашей Галактике около 150 миллиардов). Совершенно ясно, что наблюдать звезды-гиганты

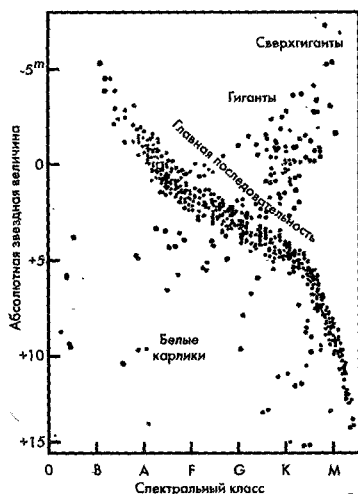


Рис. 11.2
Диаграмма Герцшпрунга–Рессела



Рис. 11.3
Диаграмма Герцшпрунга–Рессела для ближайших к Солнцу звезд

с высокой светимостью проще — их видно с больших расстояний. Значительно более многочисленные «карлики» наблюдать значительно сложнее.

Существование главной последовательности, на которую попадает, по крайней мере, 95% всех звезд (в том числе и Солнце), является аргументом в пользу предположения, что большинство звезд подчиняется одним и тем же законам, имеет близкий химический состав, проходит одинаковые этапы в своем развитии.

ВОПРОСЫ ДЛЯ САМОПРОВЕРКИ

1. Опишите способы определения характеристик звезд. Какие физические законы лежат в основе этих способов?
2. Каковы масштабы изменения характеристик звезд?
3. Что такое спектральный класс? Что можно сказать о химическом составе звезд?
4. Что такое «главная последовательность»?
5. Почему на диаграмму «спектр-светимость» невозможно поместить все наблюдаемые звезды?
6. Что позволяет выявить закономерности в природе, составе, поведении звезд?
7. Предположим, что в Млечном Пути имеется 100 миллиардов звезд, подобных Солнцу. Рассчитать абсолютную звездную величину Галактики.
8. Расстояние до скопления галактик в созвездии Девы равно 8 миллионам парсек. Сколько лет назад это скопление было таким, каким мы его видим сегодня?

ЛЕКЦИЯ ДВЕНАДЦАТАЯ

ЭВОЛЮЦИЯ ЗВЕЗД

Современная астрономия располагает большим количеством аргументов в пользу утверждения, что звезды образуются путем конденсации облаков газовой-пылевой межзвездной среды. Процесс образования звезд из этой среды продолжается и в настоящее время. Многие наблюдаемые звезды являются сравнительно молодыми объектами, а некоторые из них возникли тогда, когда на Земле уже был человек.

Центральным в проблеме эволюции звезд является вопрос об источниках их энергии. Откуда, например, берется огромное количество энергии, необходимое для поддержания излучения Солнца на уровне, близком сегодняшнему, в течение нескольких миллиардов лет?

Ежесекундно Солнце излучает энергию более 10^{26} Дж. Его возраст около 5 миллиардов лет. Тогда за это время оно потеряло посредством излучения более 10^{43} Дж. Пусть первоначально Солнце состояло только из водорода, полностью превращающегося в результате термоядерной реакции в гелий. Тогда полная энергия, которая может быть выделена при термоядерной реакции в недрах Солнца, составит около 10^{45} Дж. Это в 100 раз больше энергии, испущенной Солнцем за время своего существования. То есть для поддержания излучения на наблюдаемом уровне Солнце «израсходовало» не более 10% своей массы.

Модель эволюции звезды. Если опираться на модели Большого взрыва (лекция 10), около 14 миллиардов лет назад началось образование расширяющейся Вселенной из какого-то начального, неизвестного нам, «сингуляр

ного» (от лат. *singularis* — отдельный, особый) состояния бесконечной или очень большой плотности. Мы можем ожидать, что в простейшем случае расширение происходит пространственно однородно. То есть после Большого взрыва расширение во все стороны одинаково и плотности вещества и поля на заданном расстоянии от точки взрыва одинаковы во всех направлениях, нет оснований для возникновения каких-либо неоднородностей в их распределении в пространстве. (При этом вспомним, что мы не знаем, по какому сценарию развивается Вселенная, а модель Большого взрыва является одной из наиболее вероятных с точки зрения сегодняшних представлений.)

Это хорошо подтверждается наблюдениями: вещество «разбегается» от нашей Галактики (что вовсе не значит, что Галактика находится в центре Вселенной, просто именно здесь находится человек, исследующий Вселенную) со скоростью, монотонно возрастающей при увеличении расстояния, а реликтовое излучение имеет одну и ту же энергию (температуру) — 3 К в любой точке небесной сферы.

Но если бы расширение Вселенной происходило абсолютно однородно в пространстве, то вещество не могло бы конденсироваться (слипаться) под действием гравитационных сил и Вселенная представляла бы собой газ из атомов и элементарных частиц, становящийся все более и более разреженным в процессе расширения Вселенной. Не было бы ни звезд, ни галактик, ни планет.

Вспомним, что средняя плотность вещества Вселенной 10^{-21} г/см³. Единственными силами, приводящими к образованию неоднородностей в распределении вещества во Вселенной, являются гравитационные силы.

То есть мы вынуждены признать, что современная структура Вселенной связана с неоднородностями, возникшими на ранних стадиях расширения. Уже тогда существовали слабые разрежения и сжатия вещества, разбросанные по пространству. Изменения средней плотности должны быть заметными (в современную эпоху мы можем выделить звезды, галактики, скопления галактик), но не слишком большими (если рассматривать

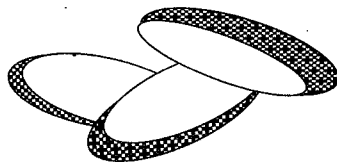


Рис. 12.1
К образованию
случайно распределенных
в пространстве областей
повышенной плотности

Вселенную в более крупных масштабах, то она достаточно однородна).

В современных моделях состояния Вселенной показано, что «выжили» лишь те флуктуации плотности, массы которых достигали 10^{16} масс Солнца. Именно из них в дальнейшем образовались гигантские газовые облака неправильной формы, похожие на блины (рис. 12.1).

В областях пересечения «блинов» возникают зоны повышенной плотности, имеющие форму волокон.

Если рассматривать смесь вещества и излучения в ранней Вселенной как идеальный газ, то следствия возмущений плотности очевидны. Любое случайное увеличение плотности вещества ведет к возрастанию гравитационных сил притяжения и дальнейшему сжатию к центру масс. Ограничить сжатие могут только силы внутреннего давления сжимаемого газа.

Таким образом, причиной формирования скоплений газа во Вселенной являются случайности (флуктуации) в распределении газа и действие сил взаимного гравитационного притяжения между отдельными молекулами газа. Иных причин, способных привести к концентрации вещества Вселенной, не существует.

Вероятная картина эволюции звезды. Следствие случайного возрастания плотности из рассеянного во Вселенной вещества формируется богатое водородом газопылевое облако. Под влиянием сил гравитационного взаимодействия это облако уплотняется, образуя газовый шар. Заметим, что шар имеет наименьшую площадь поверхности при данном объеме. Поэтому образование шара из облака неопределенной формы энергетически выгодно.

За счет гравитационных сил шар сжимается, плотность возрастает. Вещество теряет прозрачность, но остается газом. Но растет и давление внутри шара, противодействующее силам гравитации. При адиабатическом

сжатии (отсутствует возможность обмена энергией с внешней средой; это тот же процесс, вследствие которого нагревается ручной насос при быстрой подкачке шины) температура шара (это уже протозвезда) увеличивается, часть энергии излучается в пространство. На диаграмме Герцшпрунга—Рессела (рис. 11.2) эти объекты, имеющие низкую температуру поверхности, располагаются справа от главной последовательности. С точки зрения размеров среди таких объектов могут быть как «красные карлики», так и «красные гиганты» (красные — потому, что спектр их излучения сдвинут в красную сторону, что соответствует относительно низким температурам). Все зависит от исходной массы флуктуации.

В дальнейшем протозвезда под действием гравитационных сил продолжает сжиматься. Ее размеры уменьшаются, поверхностная температура растет. То есть протозвезда «приходит» на главную последовательность. В этот период температура и плотность недр звезды становятся достаточными для начала термоядерной реакции. Давление и температура внутри звезды возрастают, гравитационные силы и силы внутреннего давления становятся равными, газовый шар перестает сжиматься. Протозвезда становится звездой.

Чтобы пройти эту самую раннюю стадию эволюции, протозвездам необходимо сравнительно немного времени. Все зависит от начальной массы. Если масса протозвезды больше массы Солнца, для этого нужно всего лишь несколько миллионов лет, если меньше — несколько сотен миллионов лет.

Оказавшись на главной последовательности и перестав сжиматься, звезда в течение значительного времени излучает, не меняя положения на диаграмме «спектр—светимость» (табл. 12.1). Ее излучение поддерживают термоядерные реакции в центральных областях, а размер — противодействие гравитационных сил и сил внутреннего давления.

Таким образом, главная последовательность представляет собой такую область на диаграмме «спектр—светимость», где звезда может длительно и устойчиво излучать благодаря термоядерным реакциям.

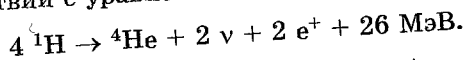
Таблица 12.1

Связь массы и светимости звезды
со временем ее пребывания на главной последовательности

Спектральный класс	Масса (в массах Солнца)	Светимость (в солнечных единицах)	Время пребывания на главной последовательности (миллионов лет)
B0	17	30 000	8
A0	3,2	100	400
F0	1,5	5	4000
G0	1,02	1,2	11 000
G2 (Солнце)	1,00	1,00	13 000
K0	0,74	0,32	28 000

Масса звезды определяет место и время пребывания звезды на главной последовательности. Если масса велика, излучение звезды имеет огромную мощность и она достаточно быстро расходует запасы водорода. Так, например, звезды главной последовательности с массой, превышающую солнечную в десятки раз (горячие голубые гиганты спектрального класса O), могут устойчиво излучать, находясь на главной последовательности всего лишь несколько миллионов лет. В то же время звезды с массой, близкой к массе Солнца, находятся на главной последовательности несколько миллиардов лет — в тысячи раз дольше.

Превращение, «выгорание», водорода в гелий при термоядерной реакции происходит в центральных областях звезды, в условиях высоких температур и давлений, в соответствии с уравнением



При такой термоядерной реакции из 4 ядер водорода образуется одно ядро гелия, два нейтрино ν и два позитрона e^+ . И, что самое важное для нас, выделяется энергия 26 МэВ (миллионов электрон-вольт). Среднее время реакции при температурах порядка 13 миллионов кельвин и плотности водорода 100 г/см³ около 10¹⁰ лет (в центре Солнца). То есть вероятность слияния данных четы-

рех ядер водорода — величина, обратная этому времени, — ничтожно мала. Однако таких ядер огромное число, и в условиях центра звезды возможна эффективная реакция термоядерного синтеза указанного типа. В земных условиях, в термоядерной бомбе, при разработке устройств управляемого термоядерного синтеза реализуются реакции синтеза других ядер (дейтерия, трития, их комбинаций с литием).

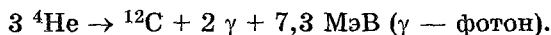
В наружных областях звезды водород не «выгорает» из-за низких значений температуры и давления. Так как количество водорода в центральных областях звезды ограничено, рано или поздно (в зависимости от массы звезды) он практически весь «выгорит». При этом процессе масса и радиус центральной области звезды уменьшаются и звезда перемещается на диаграмме «спектр-светимость» вправо.

Что же произойдет со звездой, когда весь (или почти весь) водород в ее центральных областях «выгорит»? Температура в центральных областях уменьшается. Уменьшается и давление ионизированного газа, противодействующее силам гравитационного сжатия. Ясно, что звезда сжимается, давление в ее центре растет. При сжатии температура центральных областей увеличивается.

То есть звезда представляет собой саморегулирующуюся систему. При этом в центральной области звезды будет уже не только водород, но и гелий (в который превратился водород при термоядерной реакции). Расчеты показывают, что термоядерная реакция будет протекать на периферии ядра, в области, достаточно насыщенной водородом. При этом размеры звезды и ее светимость начнут расти. Звезда сходит с главной последовательности, переходя в область «красных гигантов». То есть при сжатии ядра ее оболочка раздувается, и, несмотря на рост температуры, светимость звезды падает.

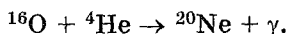
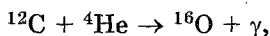
Солнце перейдет в разряд «красных гигантов» примерно через 8 миллиардов лет.

После того как вследствие термоядерной реакции температура ядра красного гиганта достигнет 100–150 млн К, а его плотность будет достаточно велика, в ядре начнется новая термоядерная реакция:



После начала этой ядерной реакции звезда перемещается влево по диаграмме «спектр–светимость», растет ее температура, размер остается примерно постоянным.

Далее возможны реакции



В этом состоит механизм нуклеосинтеза, образования тяжелых элементов из легких. (Предпосылка формирования всех форм жизни!)

Что произойдет, когда реакция «гелий–углерод» исчерпает себя, выгорит весь гелий, а также прекратится ядерная реакция «водород–гелий» в тонкой оболочке ядра?

Оказывается, что на этом этапе эволюции звезды с массами до 1,4 масс Солнца «сбрасывают» наружную разреженную оболочку (рис. 12.2). Через несколько десятков тысяч лет, мгновение в космических масштабах, оболочка рассеивается и остается небольшая, очень горячая и плотная звезда. Медленно остывая, она превращается в «белого карлика» (белый — то есть очень горячий).

«Белые карлики» как бы «вызревают» в недрах «красных гигантов». «Белые карлики», в которых весь водород выгорел и ядерные реакции прекратились, представляют собой, видимо, последний этап эволюции звезды. Постепенно остывая, они излучают все меньше и меньше энергии, светимость падает, гравитационные силы сжимают вещество. «Белые карлики» постепенно переходят в разряд «черных» карликов — холодных звезд огромной плотности и небольшого размера (порядка

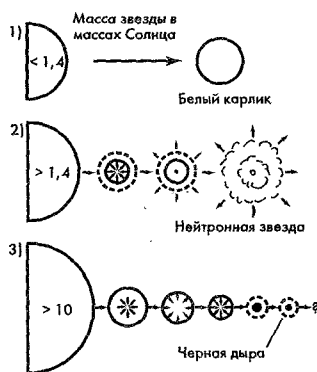


Рис. 12.2
Иллюстрация эволюции звезды в зависимости от ее начальной массы

земного при массе порядка солнечной). Этот процесс длится сотни миллионов лет.

Так прекращает свое существование большинство звезд. Однако финал жизни звезд, массы которых превышают солнечную, может быть иным. Некоторые звезды на определенном этапе своей эволюции взрываются. В этих случаях говорят о вспышке «сверхновой». От «сверхновых» следует отличать обычные «новые» звезды.

Вспыхивают новые звезды достаточно часто — в Галактике до 100 в год. «Новые» звезды — это тесные двойные системы, и присутствие соседки мешает нормальной эволюции звезды, в частности — переходу ее в стадию «красного гиганта». Возникающая неустойчивость ведет к периодически повторяющимся вспышкам. Светимость в этот период резко возрастает, но она в тысячи раз меньше, чем у сверхновых.

В отличие от вспышек «новых» звезд, вспышка «сверхновой» — весьма редкое явление. В больших звездных системах, подобных нашей Галактике, вспышки «сверхновых» происходят в среднем раз в сто лет.

Известны описания вспышек «сверхновых» звезд в Галактике. Так, по китайским хроникам, в июле 1054 года на небе появилась звезда, видимая даже днем. При этом по своему блеску она превосходила Венеру. Но через несколько месяцев исчезла. Уже в наше время было выяснено, что на месте этой звезды находится Крабовидная туманность.

В конце февраля 1987 года в одном из ближайших спутников Галактики — Большом Магеллановом Облаке — вспыхнула сверхновая. В момент обнаружения вспышки блеск звезды был +4,5 звездной величины и постепенно нарастал. Это весьма близкая к нам «сверхновая» — расстояние до нее 55 000 пс, весьма близко по внегалактическим масштабам. Обнаруженная вспышка произошла всего на 180 000 лет до момента наблюдения. Впервые удалось не только зафиксировать явление взрыва, но и получить информацию о состоянии звезды до взрыва.

Существует несколько гипотез о причине взрывов звезд, наблюдаемых как «сверхновые». Единой точки зрения нет. Возможный вариант — катастрофически

быстрое выделение потенциальной энергии гравитационных сил при резком сокращении размеров ядра.

Если звезды с массой меньше 1,4 массы Солнца могут преодолеть этап эволюции от протозвезды к «красному гиганту» и «белому карлику», то звезды, у которых масса составляет от 1,4 до 2,5 масс Солнца, не могут перейти в устойчивое состояние «белого карлика». После сброса оболочки они катастрофически быстро сжимаются до размеров порядка 10 км. При этом скорость вращения должна резко возрастать (вспомните фигуриста, прижимающего руки к телу во время вращения). Теоретические расчеты показывают, что такие звезды состоят из вещества плотностью до 10^{15} г/см³. Это уже «плотно упакованные» нейтроны, образующие нейтронные звезды (рис. 12.2).

Первоначальная температура поверхности нейтронной звезды — сотни миллионов градусов (до миллиарда). Однако звезда быстро остывает. Даже в случае высокой температуры поверхности нейтронная звезда является очень сложным объектом для наблюдения из-за малых размеров. То есть пытаться обнаружить нейтронные звезды по тепловому и электромагнитному излучению бесполезно.

В 1967 году на небе был обнаружен необычный объект, излучающий кратковременные радиоимпульсы с периодом 1,33 с. Позже было обнаружено еще несколько таких источников. Это сразу привело к мысли о внеземных цивилизациях, данные о наблюдениях были засекречены, в течение полугода об этих наблюдениях никто не знал. Но достаточно быстро нашлось объяснение наблюдаемому явлению — мощное импульсное радиоизлучение связано с быстрым вращением звездообразных объектов. Эти объекты получили название пульсара. Известен пульсар с периодом 0,033 с. Так быстро вращаться может только очень маленький объект. Оказалось, что пульсар — не что иное, как нейтронная звезда. При тщательных наблюдениях был обнаружен и еще один факт: период вращения возрастает, то есть скорость пульсара уменьшается.

Если в ядре звезды «выгорел» весь водород, то давление газа в ядре не может уравновесить гравитационные силы при массе звезды, превышающей некоторый предел (по разным оценкам от 2,5 до 10 масс Солнца).

Что может произойти с такой звездой? Она начнет сжиматься с огромной скоростью, плотность вещества начнет резко расти. Через весьма короткое время (секунды!) звезда может превратиться в сверхплотную точку, будет раздавлена своей собственной массой — гравитационный коллапс.

Возможно ли такое сжатие звезды?

Вспомним о так называемой второй космической скорости. Это скорость, которую должно иметь тело, чтобы покинуть поверхность планеты или звезды и выйти на параболическую траекторию. Для Земли вторая космическая скорость — 11,18 км/с. Для Солнца — 700 км/с. Если наше Солнце сожмется до радиуса 3 км, то вторая космическая скорость станет равной скорости света — 300 000 км/с. Тут вступают в действие законы общей теории относительности. Замедляется течение времени, из такого объекта не может выйти никаких излучений и частиц. То есть этот объект для внешнего мира будет замечен только по очень сильному гравитационному полю. Такой объект называют *гравитационной могилой*, или *черной дырой*.

Именно с черными дырами связаны гипотетические модели многосвязных Вселенных, гипотезы о том, что черные дыры — входы в другие миры. Возможно, что ядро нашей Галактики — черная дыра.

Есть ли способы обнаружения черной дыры? Ведь ее невозможно увидеть. Зато возможно, наблюдая за движением звезд, выявить (по «смещению» спектра излучения) направления и величины их скоростей. Сегодня известно несколько точек во Вселенной, к которым сходятся вектора скоростей окружающих звезд. Возможно, в этих точках находятся черные дыры.

Отметим, что одиночная звезда не может накопить массу, превышающую 100 солнечных масс. При таких массах звезды радиационное давление изнутри звезды приведет к взрыву. Непосредственными наблюдениями звезды с массами более 75 масс Солнца не обнаружены. Звезды с массами более чем 25 масс Солнца неустойчивы и теряют газ под действием радиационного давления или при взрывных процессах.

В 1963 году были обнаружены объекты еще одного типа, «квазары» (англ. *quasar, quasi-stellar radiosource* — квазизвездный источник радиоизлучения). Эти объекты имеют звездообразный вид, являются источниками мощного радиоизлучения и удаляются от нашей Галактики со скоростями до 200 000 км/с. Они находятся на периферии Вселенной, дальше самых удаленных галактик. Мы можем их увидеть, это говорит о том, что их светимости превосходят светимости не просто звезд, а целых галактик. В то же время размеры квазаров в миллионы раз меньше размеров галактик. И если происхождение пульсаров было достаточно быстро понято, то природа квазаров до сегодняшнего дня неясна.

Подчеркнем, что средняя интенсивность тепловыделения в типичных звездных термоядерных реакциях по земным масштабам ничтожна. Так, для Солнца на 1 г массы за 1 с выделяется 2×10^{-7} Дж, что гораздо меньше энерговыделения в живом организме в процессе обмена веществ. Однако этот поток энергии поддерживается в течение 3–4 миллиардов лет, то есть общее энерговыделение в миллионы раз больше, чем при любом известном химическом процессе. Кроме того, вследствие огромной массы Солнца полная излучаемая им энергия чрезвычайно велика (она соответствует ежесекундному уменьшению массы Солнца приблизительно на 4 миллиона тонн).

ВОПРОСЫ ДЛЯ САМОПРОВЕРКИ

1. Каковы причины появления неоднородностей межзвездной среды?
2. Какие фундаментальные взаимодействия ответственны за формирование и развитие звезды?
3. На диаграмме «спектр–светимость» нарисуйте траекторию движения звезды от момента формирования протозвезды до «белого карлика».
4. Как вы понимаете название «черная дыра»? Почему ее можно назвать «гравитационной могилой»?
5. Каковы источники энергии звезды на разных этапах ее эволюции?

СОЛНЦЕ — САМАЯ ДОРОГАЯ НАМ ЗВЕЗДА

Солнцу обязана своим существованием жизнь на Земле. Все земные источники энергии (кроме ядерного распада, термоядерного синтеза и тепла недр) имеют в своей основе солнечную энергию. Солнце — «желтый карлик» класса G2. Сравнительное изучение Солнца и звезд солнечного типа показало, что Солнце уникально. Не обнаружено ни одной звезды, основные физические характеристики которой полностью бы совпадали с параметрами Солнца.

Удивительно положение Солнца в Галактике. На рис. 10.3 видно положение Солнца относительно ядра Галактики. На рис. 13.1 траектория движения Солнца в Галактике показана в иной проекции — сверху.

Солнце (см. табл. 13.1) движется по так называемой траектории коротации (англ. co-rotation — со-вращение). Это особая траектория радиусом около 8000 пс, в узкой окрестности которой (не более 10% радиуса) отсутствует активное звездообразование, мала вероятность вспышек сверхновых звезд. На этой траектории скорость движения

Рис. 13.1
Спиральные рукава
Галактики и современное
положение Солнечной
системы между рукавами
Стрельца и Персея

Сплошной окружностью показана траектория Солнца.

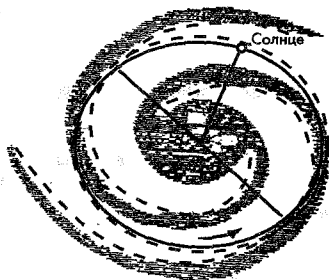


Таблица 13.1

Основные характеристики Солнца

Характеристика	Значение
Наименьшее расстояние от Земли, км	146 100 000
Наибольшее расстояние от Земли, км	152 100 000
Радиус Солнца, км	696 000
Масса Солнца, кг	$2 \cdot 10^{30}$
Температура в центре, К	16 000 000
Температура поверхности, К	5800
Температура в солнечных пятнах, К	4500
Температура короны, К	1 000 000
Типичный размер солнечного пятна, км	2000
Поток энергии, Дж/сек	$4 \cdot 10^{26}$

звезды (300 км/с) близка к скорости движения межзвездного вещества. Возраст Земли (около 5 миллиардов лет) меньше времени нахождения Солнца между рукавами. Один галактический год — время полного оборота Солнца вокруг центра Галактики, близок к 250 миллионам лет.

Оценить *массу Солнца* достаточно просто. Так как нам известны расстояние до Солнца и время полного оборота Земли вокруг Солнца, мы можем рассчитать скорость, с которой Земля движется по орбите (около 30 км/с). То есть оценить ускорение, с которым Земля движется к Солнцу (в простейшем случае полагая орбиту окружностью). Тогда из второго закона Ньютона и выражения для закона всемирного тяготения можно получить значение массы Солнца.

Радиус Солнца измерить также просто. Для этого надо просто измерить угол, под которым Солнце видно с Земли ($0,5^\circ$). Так как расстояние до Солнца известно, очень просто рассчитать радиус — 696 000 км.

Если считать Солнце шаром, то средняя *плотность солнечного вещества* составляет $1,4 \text{ г/см}^3$. Солнце содержит 71% водорода, 27% — гелия и 2% — иных химических элементов.

Температура поверхности Солнца может быть оценена из зависимости интенсивности излучения от его длины волны (лекция 11, рис. 11.1). Максимум излучения приходится на длину волны 500 нм (желто-оранжевая часть видимого спектра). Температура поверхности в среднем не более 6000 К.

Мы знаем количество энергии, падающей на 1 м^2 поверхности Земли за 1 с (эта характеристика называется *освещенностью*). Освещенность, создаваемая Солнцем на поверхности Земли, *солнечная постоянная*, $E_0 = 1370 \text{ Вт/м}^2$. Тогда легко узнать полную мощность Солнца. Действительно, если 1 м^2 поверхности, находящейся на расстоянии $R = 150$ миллионов км от Солнца, получает в секунду энергию E_0 , то на всю поверхность сферы радиуса R за 1 с падает энергия

$$E = E_0 \times 4\pi R^2. \quad (13.1)$$

Светимость Солнца $E = 4 \times 10^{26} \text{ Вт}$. Каждый квадратный метр поверхности Солнца в энергетическом отношении можно сравнить с электростанцией мощностью 0,1 МВт. На долю Земли приходится менее одной миллиардной части этой энергии.

Такое энерговыделение остается практически неизменным в течение 3–4 миллиардов лет. Откуда нам это известно? Если бы за время существования Земли светимость Солнца изменилась, то жизнь не смогла бы сформироваться. Жидкая вода, являющаяся, по современным представлениям, основой зарождения и существования жизни, превратилась бы в лед или, наоборот, испарилась. А интервал температур, в котором вода существует в жидком состоянии, крайне узок. Поэтому, если даже Солнце и изменяло светимость, то это были крайне малые изменения (в пределах единиц процентов).

Все указанные характеристики получены из наблюдений и относятся к поверхности Солнца.

Но как оценить состояние внутренних областей Солнца? За счет чего энергия, выделяемая при термоядерной реакции в ядре Солнца, передается наружу?

Грубые оценки показывают, что на расстоянии, отстоящем от поверхности на половину радиуса, температура

составляет 10 миллионов градусов, а давление превышает 500 миллионов атмосфер.

Перенос энергии от нагретых внутренних областей Солнца наружу происходит преимущественно за счет излучения. Нагретый слой передает энергию лежащему выше более холодному слою. Тот поглощает ее и вновь излучает при чуть более низкой температуре. И так слой за слоем.

В самых верхних слоях атмосферы Солнца играет определенную роль теплообмен за счет перемешивания горячих и холодных слоев. Около поверхности Солнца есть конвективная зона, занимающая около 15% радиуса. Именно в этой области энергия переносится не излучением, а интенсивным перемешиванием всплывающих и опускающихся масс ионизированного газа.

Поскольку Солнце довольно старая звезда и перемешивание вещества в нем происходит достаточно медленно, то водорода в его центральной части, по-видимому, меньше (примерно на 50%), чем в наружных областях. Температура в центре близка к 15 миллионам кельвин, а плотность вещества достигает 130 г/см^3 .

Поверхность Солнца имеет сложную структуру и состоит из нескольких слоев. Самый нижний, доступный для наблюдений и содержащий достаточно плотный газ — *фотосфера*. Фотосфера простирается примерно на 300–500 км выше наблюдаемого края Солнца. Газы фотосферы сливаются с газами *хромосферы*, нижняя хромосфера простирается до высоты порядка 4000 км. Здесь начинается верхняя хромосфера и *корона*. Фотосферу, хромосферу и, особенно, корону достаточно просто наблюдать при солнечных затмениях.

Солнечная активность связана со множеством явлений, наблюдаемых на поверхности Солнца. Это и солнечные пятна, и хромосферные вспышки, и выбросы вещества — протуберанцы.

С 1750 года ведутся систематические наблюдения за группами темных образований на поверхности Солнца — *пятнами*. Солнечные пятна кажутся темными, так как их температура меньше температуры фотосферы (табл. 13.1). Число и распределение пятен изменяют-

ся приблизительно периодически. Пятна появляются обязательно парами, имеют разные размеры и длительность существования. Типичный диаметр пятна около 2000 км, а время жизни порядка суток. Однако наблюдали и пятна, живущие до 70 суток и превращающиеся в области, размером превосходящие Землю.

Причина образования солнечных пятен — конвекция и магнитное поле Солнца. Можно предположить, что под поверхностными слоями Солнца существует неоднородное магнитное поле, мешающее нормальному конвективному теплообмену между поверхностью и нижними слоями фотосферы. В результате в пятне температура падает, оно становится темным. Из-за магнитного поля пятна являются источниками заряженных частиц, выбрасываемых на далекое расстояние от Солнца, — так называемого солнечного ветра.

Наблюдения за солнечными пятнами позволили оценить период вращения Солнца. Группа пятен существует относительно долго. Поэтому, наблюдая за ее перемещением по диску Солнца, можно оценить период его вращения. На экваторе период вращения равен 24,96 суток, а на широте 35° — 26,83 суток. Вращение совершается в том же направлении, что и орбитальное движение планет.

Часто рядом с солнечными пятнами возникают ослепительно белые вспышки (не более часа), видимые невооруженным глазом, — *хромосферные вспышки*. Наблюдения показывают, что при вспышке область, излучающая энергию, выбрасывается с поверхности фотосферы со скоростью до 700 км/с и достигает высот до 60 000 км. Хромосферные вспышки оказывают влияние на ионосферу и магнитное поле Земли.

Над краем Солнца всегда можно наблюдать выбросы раскаленной разреженной плазмы — протуберанцы. Температура протуберанца при увеличении расстояния от Солнца падает, то есть уменьшается и его светимость. Тем не менее, известны наблюдения протуберанцев до расстояний порядка 1 500 000 км над фотосферой. Облака ионизированных разреженных газов, движущихся под давлением солнечного излучения, приводят к возмущениям

магнитного поля Земли, полярным сияниям. Выброс длится несколько минут, свет от него достигает Земли через 8 минут, потоки ионизированных частиц — за 1–2 суток.

Бывают периоды, когда вспышки следуют одна за другой: периоды повышенной солнечной активности (рис. 13.2). Мерой активности Солнца можно считать количество вспышек за месяц или год. Удобнее измерять активность Солнца по числу солнечных пятен (f) и числу групп пятен (g), наблюдающихся в данный момент на Солнце. Комбинация этих чисел

$$W = f + 10g \quad (13.2)$$

носит название числа Вольфа (по имени швейцарского астронома, предложившего такую меру в середине XIX века). Числа Вольфа подсчитывают ежедневно, затем усредняют за месяц или год (рис. 13.3).

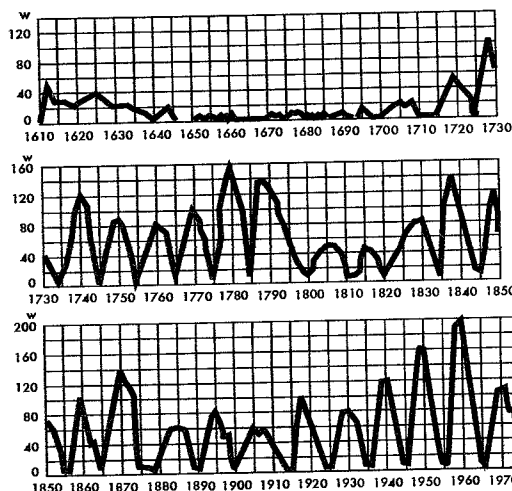


Рис. 13.2
Изменение числа
солнечных пятен
за весь период
наблюдений

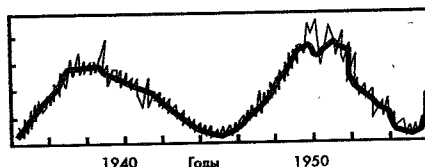


Рис. 13.3
Изменение
числа солнечных
пятен за период
1936–1956 гг.

Видно, как производится усреднение за месяцы и годы.

Длительные наблюдения за пятнами позволили выявить два цикла максимальной активности Солнца — 11-летний и, вероятно, 90-летний. Амплитуда 11-летнего цикла меняется от цикла к циклу: 3–4 сильных максимума, затем примерно столько же слабых. В течение XX века период цикла был ближе к 10 годам. На протяжении 70 лет с 1645 по 1715 год солнечных пятен практически не наблюдали (рис. 13.2). Подобный продолжительный минимум был, по-видимому, в XV веке. Отметим, что однозначного объяснения этим эффектам сегодня нет.

Солнечно-земные связи. Почти все виды энергии, используемой человеком, можно свести к солнечной энергии. Исключение составляют лишь радиоактивный распад и тепло недр Земли. Пища, по существу, является солнечным светом, собранным, накопленным и преобразованным в углеводы посредством фотосинтеза в листьях зеленых растений. Уголь, нефть, газ — солнечный свет, накопленный и законсервированный миллионы лет тому назад. Энергия воды и ветра — результат воздействия солнечного излучения на атмосферу и гидросферу.

При изменении активности Солнца солнечная постоянная на орбите Земли не испытывает изменений, превышающих, вероятно, 1%. В то же время есть данные о заметном (до 6%) изменении прозрачности атмосферы в ходе солнечного 11-летнего цикла. Эти явления могут быть связаны с изменением плотности потока космических частиц.

При этом возрастает доля ультрафиолетового излучения в общем потоке излучения. Ионизация верхних слоев атмосферы связана с интенсивностью ультрафиолетового излучения. Поэтому можно ожидать, что именно увеличение количества ультрафиолета в излучении Солнца вызывает изменения свойств ионосферы.

Действие солнечных пятен и других солнечных явлений на Землю является по своему характеру электрическим или магнитным и достоверно определено. На Земле наблюдаются замирание радиоволн, всплески шумового радиоизлучения, магнитные бури, полярные сияния и т. п.

Известен ряд явлений, связанных с изменениями погоды, скоростью роста растений и животных, самочувствием человека и имеющих косвенное отношение к циклу солнечных пятен.

Ясно, что погода в широком смысле этого слова связана с Солнцем и вращением Земли вокруг оси (лекции 13, 19–21). Однако проследить за изменениями погоды в связи с изменениями солнечной активности чрезвычайно трудно — дополнительные влияния так переплетаются между собой, что однозначных выводов сделать нельзя.

Это утверждение применимо и к попыткам связать рост растений и животных с солнечным циклом. Известно явление изменения ширины древесных колец. Д. И. Менделеева, в частности, привлекала идея извлечения информации, накапливаемой деревьями, с целью обобщения «...бесценногоклада, ускользающего от научного сознания...». Позже, при исследовании тысяч деревьев, главным образом в юго-западных штатах США, астроном А. Е. Дуглас обнаружил чередование узких и широких колец, указывающих на замедленный или ускоренный рост деревьев. По годичным кольцам секвойи он датировал древние постройки индейцев племени пуэбло, сравнивая кривые роста деревьев с известной датой вырубки с теми, из которых были построены жилища.

Позже было показано, что в любом районе Земли система расположения колец одинакова. Поэтому удалось сопоставить данные для молодых и старых деревьев, а также для ископаемых древесных останков. В итоге — продолжить древесный календарь на 3000 лет назад. На основе этого обильного материала получены четко выраженные циклы роста — 7, 11 лет и 23 года. В 1878 году было замечено, что количество и качество производимого в Германии вина таинственным образом связано с пятнами на Солнце.

Выдающийся русский ученый А. Л. Чижевский в 1924 году опубликовал итоги статистического анализа истории более чем 50 государств и народов всех континентов с 500 года до нашей эры до 1914 года. Исследование выявило циклические колебания числа массовых событий со средним периодом 11 лет. Чижевский одно-

значно связывал эти циклы с циклами солнечной активности, объясняя ими рост интенсивности психической деятельности людей, степень их возбудимости, агрессивности, готовность следовать за вождями.

Вряд ли можно столь прямолинейно объяснять исторический процесс активностью Солнца. Это было бы упрощением. Слишком сложны экономические и социально-политические факторы, роль которых постоянно нарастает и реализуется через динамику цивилизаций. Да и на 11-летние циклы накладываются циклы большей длительности. Корреляции между социальными потрясениями и солнечным циклом, скорее всего, случайны.

Влияет ли Солнце на живые организмы? Безусловно. Искажают ли потоки заряженных частиц магнитное поле Земли? Конечно (лекция 16). Но можем ли мы предсказывать на несколько дней или даже месяцев возмущения магнитного поля Земли, особенности атмосферного давления и т. п.? Вряд ли. Ведь солнечные вспышки — явление случайное, их невозможно предсказать (хотя можно оценить вероятность их появления). «Эффективность» газетных предсказаний имеет, скорее, психологическую природу.

ВОПРОСЫ ДЛЯ САМОПРОВЕРКИ

1. Каков источник энергии Солнца?
 2. Чем замечательно положение Солнца в Галактике?
 3. Опишите современные представления о структуре Солнца.
 4. Что такое «солнечное пятно»?
 5. В чем состоит сущность современных представлений о солнечно-земных связях?
-

СОЛНЕЧНАЯ СИСТЕМА

Мы можем достаточно много сказать об эволюции звезд на основании огромного количества наблюдений за объектами звездного неба, находящимися на разных стадиях развития. В то же время мы практически ничего не знаем об основных этапах формирования планет, и это, несмотря на то что у нас есть возможность подробно изучать планету, на которой живем, — Землю. Причина этого достаточно проста: наша планета — единственно доступный для подробного изучения объект.

Что-то мы можем узнать о планетах Солнечной системы. Наличие планетных систем около иных звезд можно выявить только по особенностям движения звезды или по особенностям ее излучения.

Мы наблюдаем 9 планет Солнечной системы и их спутники (табл. 14.1). Первая планета, открытая с помощью телескопа, — Уран (1781 год, Гершель). В 1846 году по отклонению орбиты Урана было теоретически предсказано существование планеты Нептун. В 1930 году по возмущениям в движении Урана была обнаружена планета Плутон. Наблюдения за планетами позволили выявить следующие закономерности.

Возраст Земли около 5 миллиардов лет. Максимальный возраст у метеоритов — объектов, приходящих к нам из Солнечной системы, — 7 миллиардов лет.

Планеты движутся вокруг Солнца по эллиптическим орбитам, при этом характеристики эллипсов (большая и малая полуоси) за 5–7 миллиардов лет мало изменились. В таблице 14.1 приведены значения эксцентриситета

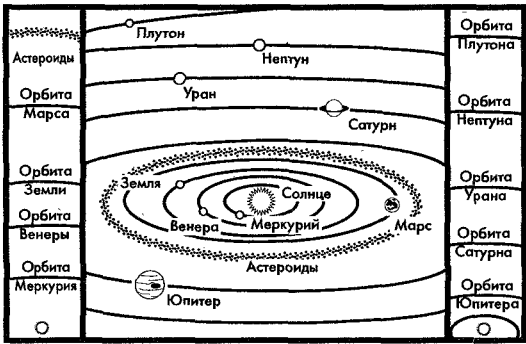


Рис. 14.1

Схематическое изображение солнечной системы

На вставке слева — планеты земной группы, справа — внешние планеты.

Таблица 14.1

Характеристики планет Солнечной системы
(масса и радиус Земли приняты за 1)

Планета	Период обращения вокруг Солнца, лет	Масса	Радиус	Средняя плотность, кг/м ³	Сутки	Наклонение экватора к плоскости орбиты, град.	Спутники	Эксцентриситет орбиты	Наклонение орбиты к плоскости эклиптики, град.
Мер- курий	0,24	0,06	0,38	5400	56,7 дня	0	0	0,21	7
Вене- ра	0,62	0,82	0,95	5200	243 дня	-2	0	0,01	3,4
Земля	1	1	1	5500	1 день, 23,93 часа	23,5	1	0,02	0
Марс	1,88	0,11	0,53	3900	24,6 часа	25	2	0,09	1,85
Юпи- тер	11,86	317,8	11,2	1300	9,8 часов	3	16	0,05	1,30
Са- турн	29,46	95,1	9,42	700	10,7 часа	27	20?	0,06	2,49
Уран	84,01	14,5	4,10	1300	17,24 часа	98	15	0,05	0,77
Неп- тун	164,8	17,2	3,88	1700	16,1 часа	27	8	0,01	1,77
Плу- тон	247,7	0,002	0,18	2000	6,4 дня	-58	1	0,25	17,2

орбиты, характеризующего отклонение орбиты от окружности. Для окружности эксцентриситет равен нулю. Видно, у всех планет, за исключением Меркурия и Плутона, орбиты весьма близки к окружности. Орбита Плутона вытянута настолько сильно, что в 1979–1999 годах он находился ближе к Солнцу, чем Нептун. Через самую ближнюю к Солнцу точку орбиты — перигелий — Плутон прошел в 1989 году.

Плоскости эллиптических орбит всех планет лежат почти в одной плоскости (плоскости *эклиптики*). Наибольшее отклонение плоскости орбиты от эклиптики опять же у Меркурия и Плутона.

Все планеты обращаются вокруг Солнца в одном и том же направлении. Все планеты и Солнце вращаются в одном направлении вокруг своих осей.

У всех планет и Солнца экватор наклонен к плоскостям орбит. У Урана ось вращения фактически лежит в плоскости эклиптики. Планета как бы «катится» по орбите. Почти в таком же положении движется Плутон. Знак «минус» в таблице 14.1 означает, что орбита наклонена в сторону, противоположную наклону орбиты Земли.

Орбиты большинства спутников планет круговые. Большинство спутников и кольцо Сатурна обращаются вокруг своих планет в том же направлении, в котором планеты обращаются вокруг Солнца.

В настоящее время известен ряд гипотез образования Солнечной системы, основанных на этих данных.

Одна из первых — *гипотеза Канта-Лапласа*. По этой гипотезе предполагается образование планет в результате эволюции холодной (И. Кант) или горячей (П. Лаплас) пылевой туманности, быстро вращающейся вокруг центра масс. Эти гипотезы, при своем резком отличии, выдвигают общее представление о возникновении Солнечной системы в результате закономерного развития пылевой туманности. В то же время эти гипотезы не соответствуют *закону сохранения момента импульса*.

Если мы имеем систему тел, вращающихся вокруг некоторой оси, то в этой системе должен сохраняться момент импульса — произведение массы на скорость и расстояние до оси вращения. (Пример действия закона

сохранения момента импульса — зависимость скорости вращения фигуриста от изменения положения рук). Изменение размеров вращающегося тела влияет на его угловая скорость. Таким образом, если полагать (как это делается в большинстве гипотез формирования Солнечной системы), что Солнечная система сформировалась при конденсации вращающегося газового облака, то сохранение момента импульса определяет верность гипотезы.

Суммарная масса всех планет составляет всего лишь 1/700 часть массы Солнца. Однако, учитывая, с одной стороны, большие расстояния от Солнца до планет и с другой — малую скорость вращения Солнца вокруг своей оси (2 км/с на экваторе), мы обнаружим, что 98% момента импульса Солнечной системы связаны с орбитальным движением планет и только 2% — с вращением Солнца вокруг оси. Основной вклад в момент импульса Солнечной системы определяется орбитальным движением планет-гигантов Юпитера и Сатурна.

В начале XX века появилась *гипотеза Д. Х. Джинса*. Исходный материал, из которого в дальнейшем образовались планеты, выброшен Солнцем (на ступени эволюции, близкой к существующей) при случайном прохождении вблизи некоторой звезды. Звезда прошла очень близко, почти столкнувшись с Солнцем. При этом из поверхностных слоев Солнца была выброшена струя газа, конденсация которой привела к образованию планет. Оценки, основанные на знании расстояний между звездами и скоростей их движения, показывают, что за последние 5 миллиардов лет таких прохождений могло быть не более 10 (лекция 10). То есть планетных систем в Галактике было бы крайне мало. Это вряд ли соответствует действительности. То есть, и гипотеза Джинса не выдерживает критики.

В современных моделях формирования планетных систем обращают на себя внимание два факта: звезды, спектральные классы которых более поздние, чем F5, потеряли весь свой вращательный момент; звезды с массами, превышающими 1,4 массы Солнца, вращаются со скоростями около 100 км/с. Объяснение этих фактов требует создания новых гипотез. В частности — представлений

о взаимодействии межзвездного магнитного поля с ионизированным газом при формировании первоначального газового диска, из которого впоследствии формируются планеты.

Одна из современных гипотез формирования Солнечной системы предполагает, что первоначальная масса материала, из которого образованы планеты, составляла около 1% массы Солнца и была выброшена из него в тот момент, когда Солнце теряло вращательную устойчивость. Этот выброс с течением времени сформировался в протопланетный диск. Из него впоследствии и сконденсировались планеты. Не исключено, что планеты образовались не одновременно, а при разных выбросах вещества из Солнца. В частности, планеты-гиганты Юпитер и Сатурн образовались позже Урана, Нептуна, планет земной группы.

Недавно вероятные планетарные объекты были обнаружены у нескольких звезд главной последовательности. Эти объекты (которые могут быть «коричневыми карликами») имеют массы не более половины массы Юпитера. Их орбиты относятся к пригодной для существования жизни зоне (на планете может присутствовать жидкая вода).

Наличие у звезд газопылевых оболочек подтверждается наблюдениями. Есть основания полагать, что большинство звезд класса F, еще не достигших главной последовательности, имеют такие оболочки. Наблюдать их достаточно сложно. При наблюдениях за инфракрасным излучением звезд обнаружено, что тепловое излучение ряда звезд не соответствует температуре их поверхности.

Действительно, звезда должна испускать излучение, характерное для тела с температурой в несколько тысяч градусов. Однако оказалось, что некоторые звезды (в частности, Вега) излучают так, будто состоят из двух источников излучения. Один из них имеет температуру 9700 К (что соответствует температуре поверхности звезды), другой — температуру 85 К (определяющий избыток инфракрасного излучения). Простым объяснением этого факта является существование оболочки из мелких частиц, располагающейся на некотором расстоянии

(для Веги — около 80 астрономических единиц) от звезды. Другое дело, не ясно, что это — формирующаяся планетная система или остатки существовавшей планетной системы.

Малые планеты. В 1596 году великий астроном И. Кеплер предсказал существование планеты между орбитами Марса и Юпитера. В 1766 году И. Д. Тициус и в 1772 году И. Э. Боде выявили закономерность в расстояниях известных в то время планет от Солнца. Если принять расстояние от Земли до Солнца за 1, то расстояния до других планет можно найти прибавлением числа 0,4 (расстояние до Меркурия) к произведению $(0,3 \times 2^n)$. Для Венеры $n = 0$.

Именно этот факт послужил одним из стимулов для поиска новых планет. На расстоянии 2,8 а. е. нет никаких больших планет. Однако в 1801 году Пиацци, директор обсерватории в Палермо, на этом расстоянии обнаружил очень маленький объект и показал, что он относится к Солнечной системе. Обнаруженную малую планету называли Церерой. В 1802 году была открыта еще одна малая планета — Паллада, двигающаяся на таком же расстоянии от Солнца. Позже был обнаружен еще ряд малых планет, это позволило немецкому астроному и врачу Г. Ольберсу в 1804 году высказать гипотезу о том, что малые планеты произошли в результате разрыва на куски одной большой планеты, радиус орбиты которой некогда лежал на расстоянии 2,8 а. е. от Солнца (табл. 14.2).

Астероиды — небольшие каменные объекты, находящиеся, прежде всего, между орбитами Марса и Юпитера. Наблюдения более чем 7000 астероидов в двух или более позициях позволили точно определить их орбиты. Астероиды меньше любой из девяти главных планет Солнечной системы. Около 30 имеют диаметр, превышающий 200 км. Церера, самая крупная малая планета, имеет диаметр около 935 км. Паллада, вторая по размеру, — до 535 км. Приблизительно 250 астероидов имеют диаметр, по крайней мере, 100 км. Миллионы астероидов — не больше валуна. Именно они падают на поверхность Земли в виде метеоритов.

Таблица 14.2

Правило Тициуса–Боде для планет Солнечной системы

<i>Планета</i>	<i>Расстояние до Солнца в астрономических единицах</i>
Меркурий	0,4
Венера	0,7
Земля	1
Марс	1,6
<i>Пояс астероидов</i>	2,8
Юпитер	5,2
Сатурн	10,0
Уран	19,6
Нептун	38,8
Плутон	77,2

Форма самых больших астероидов близка к сферической. Это утверждение основывается на постоянстве их яркости (при движении тел иной формы яркость, то есть количество отраженного солнечного света, должна изменяться). Меньшие астероиды имеют широкий диапазон форм. Икар, например, является почти сферическим, диаметром только 2 км. Эрос похож на плиту размерами $10 \times 15 \times 30$ км³.

В 1993–1994 годах космический корабль «Галилео», проходя через пояс астероидов на пути к Юпитеру, получил изображение астероида с наибольшим размером 56 км, имеющего собственный крошечный спутник размером около 1,5 км, расположенный на расстоянии 100 км. Это самый маленький известный естественный спутник в Солнечной системе.

Какова возможная причина формирования пояса астероидов? Современные данные показывают, что гипотеза о разрыве большой планеты не подтверждается. Вряд ли они могли когда-либо составлять одно тело. Одна из гипотез образования пояса астероидов полагает, что он — «заготовка» для планеты, не сформировавшейся из-за гравитационного воздействия Юпитера.

С существованием пояса астероидов связана опасность, которой подвергается Земля. Крупные астероиды могут вследствие тех или иных причин выйти из пояса астероидов и пересечь орбиту Земли, в том числе — и упасть на Землю. Сейчас известно около 600 астероидов, которые приближаются к Земле или орбиты которых пересекают орбиту Земли. Оценки показывают, что таких тел с массой более 100 кг может быть около 100 тысяч.

Оценки показывают, что астероид диаметром 1 км может столкнуться с Землей один раз за 1 миллион лет. В результате столкновения произойдет взрыв силой в несколько водородных бомб, образуется кратер диаметром около 13 км. Некоторые исследователи полагают, что исчезновение динозавров и многих других животных приблизительно 65 миллионов лет назад было вызвано падением на севере полуострова Юкатан астероида диаметром до 10 км.

Современные астрономические исследования показывают возможность существования пояса малых планет, расположенных между орбитами Урана и Нептуна

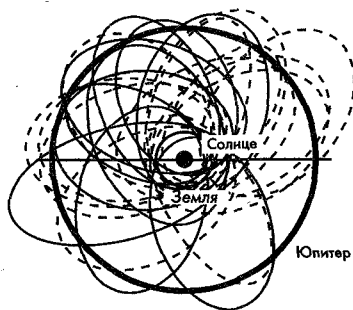
Кометы. Всякая комета состоит из твердой части (ядра) и газопылевой атмосферы. Ядро кометы имеет диаметр 1–2 км, наблюдать ядро нельзя и лишь косвенные наблюдения дают возможность оценить его массу (около миллиарда тонн). Ядро кометы — рыхлое образование, смесь сконденсировавшихся водяного пара, аммиака, метана.

Орбиты комет — очень вытянутые эллипсы, периоды обращения — более 100 лет. Только четвертая часть известных комет имеет периоды менее 7 лет. И каждый

Рис. 14.2.

Траектории комет, имеющих малые периоды обращения вокруг Солнца

Видно, что все они происходят из окрестностей Юпитера.



год на смену старым кометам приходят новые, ранее не известные.

Существует ряд гипотез происхождения комет. По гипотезе голландского астронома Я. Х. Оорта, ядра комет — остатки того протопланетного облака, из которого когда-то возникла планетная система. Из этих областей, расположенных за орбитой Плутона, и приходят кометы.

По гипотезе С. К. Всехвятского, ядра комет — своеобразные вулканические бомбы, выброшенные при извержениях с поверхностей главным образом планет-гигантов и их спутников. Действительно, есть основания полагать, что самые далекие от Солнца точки орбит комет группируются вблизи орбит Юпитера и других планет (рис. 14.2).

Окончательного объяснения происхождению комет на сегодня не существует.

Кометы имеют различные периоды жизни от 3,3 года для кометы Енк до 2000 лет для кометы Донати. Всего известно более 200 комет, периодически проходящих к Солнцу.

Кометы с короткими периодами (от 3 до 9 лет) образуются в области Юпитера. Кометы с периодами в десятки лет образуются в области Нептуна. Так, комета Галлея имеет период 76 лет. Известны и кометы с периодами в тысячи лет.

ВОПРОСЫ ДЛЯ САМОПРОВЕРКИ

1. Почему Венеру можно наблюдать непосредственно перед восходом или сразу после захода Солнца?
2. В чем состоит правило Бодде?
3. Как был обнаружен пояс астероидов?
4. Приведите гипотезы образования пояса астероидов.
5. Что такое малые планеты?
6. Что такое комета? Какие гипотезы образования комет вам известны?
7. Какова классификация комет по времени оборота вокруг Солнца?

СТРОЕНИЕ ЗЕМЛИ. ФОРМА ЗЕМЛИ

Представления о форме Земли люди имели давно. Еще в VI веке до нашей эры Пифагор утверждал, что Земля имеет форму шара и свободно и неподвижно висит в центре Вселенной. Вокруг нее движутся имеющие форму шара планеты и Солнце, окруженные небесной сферой с рассыпанными на ней звездами. Однако уже тогда Филолай (пифагореец V века до нашей эры) впервые сформулировал предположение о том, что Земля не есть центр Вселенной.

Первые четкие доказательства шарообразности Земли сформулированы Аристотелем. Обратив внимание на форму Луны в различных фазах, Аристотель утверждал, что с Земли такую картину можно видеть только в том случае, если Луна — шар. Но если Луна шар, то из естественных соображений надо предположить, что и Земля — шар.

Второе доказательство шарообразности Земли Аристотель связывал с лунными затмениями. Справедливо полагая, что лунное затмение — это прохождение тени Земли по лунному диску, он обратил внимание на форму тени, соответствующую телу шарообразной формы.

Известно и еще одно рассуждение Аристотеля о шарообразности Земли. Путешественники, возвратившиеся с востока (имеется в виду из Индии) и с запада (из Африки), рассказывали, что и там и там есть слоны. Но слоны могут быть только в одной стране. Значит, Земля — шар, идя на восток или на запад, мы достигаем страну, в которой живут слоны.

Современные представления о форме и размерах Земли состоят в следующем. В качестве математически удобной и достаточно близкой к реальной фигуре Земли принимается *эллипсоид вращения* — пространственная фигура, получаемая вращением эллипса вокруг одной из его осей (для Земли — малой оси). Именно на этот эллипсоид проецируют все измерения, выполненные на реальной Земле. Еще более близким к реальной поверхности Земли считают *геоид*. Это фигура, которую образовала бы поверхность Мирового океана, будь она свободна от всяческих возмущений (приливов, неоднородностей атмосферного давления и т. п.). Сила тяжести в любой точке перпендикулярна гипотетической поверхности геоида. Представить такую поверхность можно, продлив поверхность океана под континенты. Геоид и эллипсоид вращения, описывающие поверхность Земли, достаточно близки друг другу.

Приведем основные характеристики земного эллипсоида. Большая полуось (радиус экватора) эллипсоида — 6 378 160 м, малая полуось (половина расстояния между полюсами) — 6 356 912 м (рис. 15.1).

Французский астроном К. Фламмарин (1842–1925) в книге «Живописная астрономия» (1880) писал: «Большое число лиц и все дети думают, что земной шар зани-

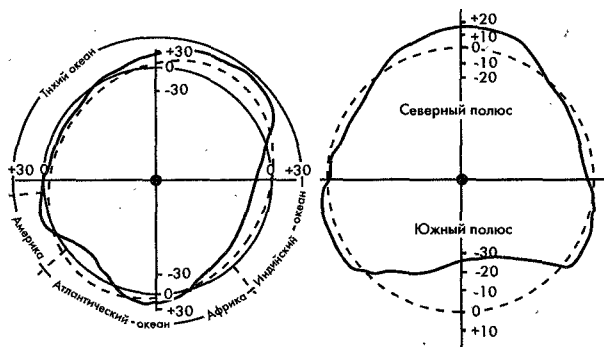


Рис. 15.1

Условные сечения Земли по нулевому (Гринвичскому) меридиану и экватору

Пунктир — эллипсоид. Сплошная линия на первом сечении — геоид. На шкалах показаны отклонения физической поверхности Земли от геоида в километрах.

мает беспредельное место в пространстве. Исходя из этого, они составляют ложное представление о размерах Земли как по отношению к другим светилам, которые мы знаем, так и по отношению к нам самим и предметам, которые нас окружают. Мы все думаем, и основательно, что Земля очень большой шар, между тем в действительности она меньше, чем некоторые себе представляют... Рабочие и служащие, обыкновенные чиновники, если принять, что их квартира в двух километрах от конторы, ежедневно проходят 8 километров и примерно 2000 километров в год. К концу 20 лет административной службы эти просидевшие не один стул чиновники, а некоторые, более того, никогда не выходившие из родного города, прошли путь в 40 миллионов метров. Это именно длина земного меридиана, то есть большой окружности, проведенной вокруг Земли через оба полюса».

Каждый обошел земной шар и не заметил этого!

Движение Земли во Вселенной достаточно сложно. Мы уже говорили о траектории Солнца в Галактике (лекция 13).

Земля движется вокруг Солнца с орбитальной скоростью около 30 км/с. При этом Земля вращается вокруг своей оси. Скорость движения точки на поверхности зависит от широты, в средних широтах она близка к 250 м/с.

Но и ось вращения Земли не является неподвижной. Из-за влияния Луны и жидких оболочек она описывает в пространстве коническую поверхность. Ось конуса перпендикулярна плоскости эклиптики. Это движение называется *прецессией*. Оно знакомо каждому, кто когда-либо запускал детский волчок. Период прецессии около 24 тысяч лет. Вследствие прецессии ось вращения Земли в разные эпохи направлена на разные звезды.

Полярная — самая яркая звезда близ теперешнего северного полюса мира — не всегда будет указывать на полюс. Примерно через 12 тысяч лет вблизи полюса будет находиться звезда Вега. Ежегодно направление земной оси отклоняется на 50 угловых секунд.

Но и это еще не все. Во время прецессии земная ось «кивает» с амплитудой около 9 угловых секунд. Период этого процесса (*нутаии*) около 19 лет.

Масса Земли 6×10^{24} кг, средняя плотность составляет 5500 кг/м³. Это значение существенно превышает среднюю плотность пород, образующих доступную для исследований кору Земли. То есть плотность земных недр существенно выше средней плотности.

Что на сегодняшний день известно о строении Земли? При исследовании Вселенной мы имеем один универсальный инструмент — электромагнитное излучение. Для исследования недр Земли этот инструмент непригоден. С помощью бурения достигнуты глубины около 15 км. Именно с этой глубины у геологов есть образцы пород (причем таких глубоких скважин единицы).

Однако появляется новый инструмент — звук, акустические колебания.

При землетрясениях и взрывах возникают упругие волны двух типов: продольные (разрежения и сжатия, звуковые волны в газе) и поперечные (сдвиговые, распространяющиеся только в твердых телах). Эти волны распространяются в упругой среде и могут быть зафиксированы с помощью приборов. Скорость продольных волн около 8 км/с, поперечных — 4 км/с. Чем плотнее среда, тем больше скорость распространения упругих волн, тем слабее они затухают с расстоянием.

Если бы недра Земли были однородны, то порожденные взрывом или землетрясением продольные и поперечные волны должны были бы, слегка ослабнув, дойти до любой точки поверхности Земли. Этого не происходит.

Результаты наблюдений показывают, что Земля неоднородна и состоит из слоев разной плотности, причем через внутренние слои упругие поперечные волны не про-

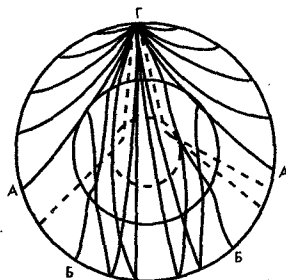


Рис. 15.2

Схема распространения упругих волн в недрах Земли

В точке Г произошло землетрясение. Продольные волны (сплошные линии) проходят через все оболочки (испытывая искажения) и наблюдаются в точках А и Б. Поперечные волны (пунктир) не могут пройти через жидкое ядро и не наблюдаются в точках Б.

ходят. Следовательно, внутри Земли есть жидкие оболочки (рис. 15.2).

Современные представления о внутреннем строении Земли состоят в следующем (рис. 15.3).

На глубину в среднем 35 км простирается кора (под материками толщина коры до 70 км, под океанами 5–10 км). То есть 15-километровая скважина — слабый укол поверхностных слоев.

На глубинах до 400 км находится верхняя мантия. На расстоянии около 2900 км от поверхности начинается нижняя мантия, а на глубине 4000 км — внешнее ядро.

Согласно современным геофизическим данным, внешнее ядро жидкое. Именно оно не пропускает поперечные упругие волны, пропуская продольные. Давления на этой глубине превышают 500 000 атмосфер, температуры — несколько тысяч градусов. Внешнее ядро состоит, по-видимому, из жидкого железа с примесью кремния и никеля и их соединений с серой и кислородом (рис. 15.4, табл. 15.1).

На глубинах, превышающих 5000 км, находится твердое ядро. Состав его близок к составу внешнего ядра. Твердое ядро «плавает» в жидкой оболочке!

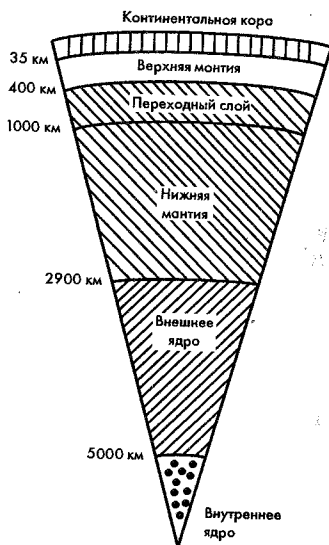


Рис. 15.3
Внутренние оболочки Земли

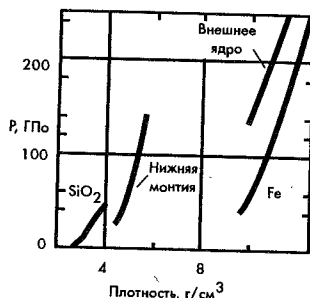


Рис. 15.4
Зависимость плотности железа и двуокиси кремния и средней плотности нижней мантии и внешнего ядра от давления

Внешнее ядро примерно на 10% менее плотное, чем железо при соответствующих давлениях. Это позволяет утверждать, что ядро содержит расплавленные элементы, такие как сера и кислород.

Таблица 15.1

Химический состав геосфер и оболочек Земли

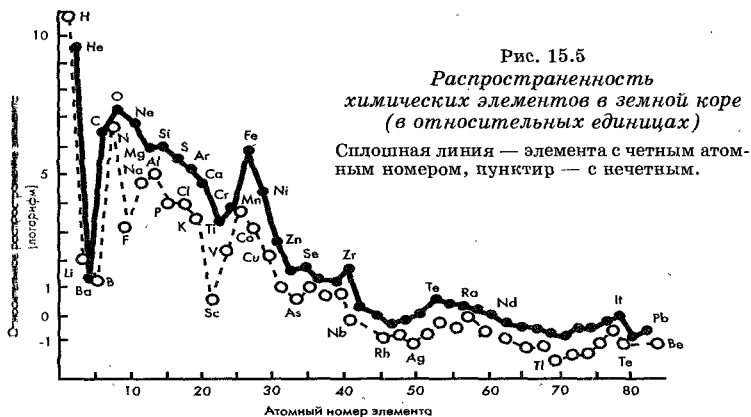
Оболочка, геосфера	Содержание (в весовых процентах)					
	Азот	Водород	Углерод	Кислород	Сера	Металлы
Ядро	—	следы	—	следы	следы	99
Мантия	—	следы	следы	40,0	16,0	43,0
Земная кора	—	0,14	0,15	46,7	27,7	24,5
Гидросфера	следы	10,7	0,28	86,0	следы	1,28
Атмосфера	74,5	0,14	0,01	24,1	—	—
Биосфера	2,2	9,1	14,0	73,0	следы	1,0

На рис 15.5 показана связь распространенности химического элемента в коре Земли с его атомным номером. Видно, что с ростом номера распространенность убывает неравномерно, элементы с четным атомным номером более распространены, чем с нечетным. Особенно это относится к элементам с массовым числом, кратным 4 (He, C, O, Ne, Mg, Si, S, Ar, Ca).

Удивительно, но точно такая же кривая отвечает распространенности химических элементов во Вселенной! Ряд максимумов соответствует элементам с ядрами, у которых число протонов и нейтронов равно 2, 8, 20, 50, 82, 126. Этим «магическим числам» соответствуют устойчивые ядра. По этому поводу американские химики Г. Юри и Г. Зюсс писали так: «Представляется, что распространенность элементов и их изотопов определяется ядерными свойствами и что окружающее нас вещество похоже на золу космического ядерного пожара, в котором оно было создано».

Земля оказывает влияние и на окружающее пространство. Радиус гравитационной сферы влияния Земли может быть представлен либо как расстояние, на котором могут двигаться объекты, оставаясь спутниками Земли (1 500 000 км), либо как радиус сферы, в которой земное притяжение больше притяжения Солнца (2 600 000 км).

Как любое нагретое тело, Земля имеет собственное тепловое излучение (приходящееся на инфракрасный



диапазон длин волн). Нагрев Земли связан с внешними (солнечное излучение, космическое излучение, приливное трение) и внутренними (теплопередача от нагретых недр, радиоактивный распад в глубинах Земли, хозяйственная деятельность человека) источниками. Вследствие радиоактивного распада в недрах Земля выделяет до $0,02 \text{ Вт/м}^2$. За счет тепловых потоков из недр Земля теряет около до $0,002 \text{ Вт/м}^2$.

Радиоактивность является существенным фактором теплового баланса Земли. По словам В. И. Вернадского, «...количество создаваемой радиоактивным процессом тепловой энергии не только достаточно для того, чтобы объяснить потерю Землею тепла и все динамические и морфологические воздействия внутренней энергии планеты на ее поверхность — земную кору, но и для того, чтобы поднять ее температуру...».

В 1958 году было обнаружено, что верхние слои атмосферы Земли (высоты от 100 до 300 км) излучают избыточную энергию в инфракрасном (тепловом) диапазоне длин волн. Исследования показали, что это излучение связано со сложными процессами взаимодействия коротковолнового (ультрафиолетового и рентгеновского) излучения Солнца с молекулами газов (в основном азота и кислорода). В настоящее время инфракрасному излучению верхних слоев атмосферы отводится важное место в проблеме влияния солнечной активности на погоду.

С одной стороны, изменение потока солнечной энергии в периоды солнечной активности незначительно по сравнению с солнечной постоянной (лекция 13). Однако в течение короткого времени в отдельные районы Земли (полярные области, магнитные аномалии) в верхнюю атмосферу через радиационные пояса могут поступать дополнительные потоки энергии.

При среднем по величине всплеске солнечной активности на площади $1\,000\,000\text{ км}^2$ в течение суток выделится энергия около 10^{17} Дж. Это не так много, примерно в сто раз меньше энергии обычного циклона. Но почти вся эта энергия переходит в инфракрасное (тепловое) излучение, достигающее нижних слоев атмосферы. Происходит слабый нагрев атмосферы на высотах 10–30 км, вызывающий незначительное изменение давления. Перепад давлений приводит к появлению ветра со скоростью до 0,1 м/с и направлением с севера на юг. Это очень слабый ветерок, но на огромной территории он взаимодействует с обычным широтным переносом воздушных масс (с запада на восток). Именно такое взаимодействие является одним из факторов — спусковых механизмов — возникновения неустойчивостей в атмосфере (циклонов и антициклонов).

ВОПРОСЫ ДЛЯ САМОПРОВЕРКИ

1. По каким причинам физическая поверхность Земли отклоняется от эллипсоида вращения и геоида? Приведите характерные величины этих отклонений.
2. Оцените скорость движения точки на поверхности Земли в средних широтах и на экваторе. Почему запускать космические аппараты выгоднее всего на экваторе?
3. В чем состоят современные представления о строении внутренних оболочек (сфер) Земли? Какие методы позволяют сделать выводы о строении Земли?
4. Что такое сферы влияния Земли? Приведите их характеристики.

МАГНИТНОЕ И ЭЛЕКТРИЧЕСКОЕ ПОЛЯ ЗЕМЛИ

С Землей связано магнитное поле (рис. 16.1), сходное с полем, создаваемым плоским магнитом, ось которого проходила бы через центр Земли, но была бы наклонена примерно на 20° к оси вращения. Наличие магнитного поля у Земли не есть что-то необычное для Вселенной — и звезды, и планеты, и галактики имеют магнитные поля. Причем они могут быть и сильнее, и слабее земного. У. Гильберт первый обнаружил магнитное поле примерно в 1600 году, хотя земной магнетизм использовался намного раньше в примитивных компасах.

Магнитное поле Земли имеет сложную структуру, на его форму серьезное влияние оказывает солнечный ветер — поток заряженных частиц, выбрасываемых Солнцем (рис. 16.2). Поток частиц, составляющих солнечный ветер, уже на расстоянии около 10 земных радиусов от поверхности Земли попадает в достаточно сильное магнитное поле. Частицы обтекают условную поверхность, называемую границей магнитосферы. Магнитное поле планеты под действием солнечного ветра становится несимметричным, вытягиваясь в сторону, противоположную Солнцу. К Солнцу оно простирается на 70–80 тысяч километров, от него — на многие миллионы километров.

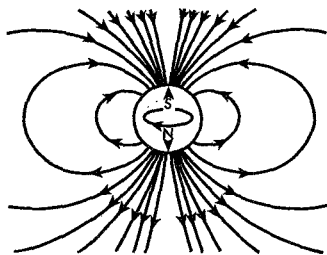


Рис. 16.1

Схематическое изображение
силовых линий магнитного
поля Земли

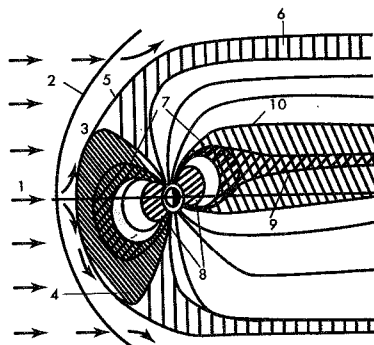


Рис. 16.2

*Схематическое изображение
магнитных оболочек Земли*

Оболочки сформированы за счет взаимодействия набегающих потоков (1) элементарных частиц (солнечного ветра) с магнитосферой Земли. Образуется ударная волна (2). Возникает сложная структура магнитного поля (3 — магнитная полость, 4 — магнитопауза, 5 — полярная магнитосферная щель). Формируются радиационные пояса (7, 8), за Землей тянется «хвост» ионизированного газа (6, 9, 10).

Магнитное поле Земли весьма слабое. У поверхности Земли магнитное поле составляет около 0,5 эрстед, на границе магнитосферы — в тысячи раз меньше. Это много меньше, чем магнитное поле, создаваемое бытовой магнитной защелкой. Наблюдая за стрелкой компаса, легко обнаружить, что проходящий в сотнях метров трамвай или электропоезд приводит к ее резким колебаниям, то есть большой электрический ток создает магнитное поле, превышающее земное.

Между границей магнитосферы и регулярным магнитным полем Земли находится область, называемая магнитопаузой. В ней магнитное поле слабое, нерегулярно изменчивое и случайно направленное.

Магнетизм Земли — результат скорее динамических процессов, чем некоторых стационарных состояний (которые имели бы место, если бы ядро Земли состояло из намагниченного твердого материала, например, железа). Железо перестает быть магнитным материалом при температурах более чем 540°C. Температура в центре Земли может быть выше 6500°C.

Теория динамо предполагает, что конвективные потоки в пределах жидкого внешнего ядра ведут себя подобно проводам в динамо-машине, создавая огромное магнитное поле. Твердое внутреннее ядро вращается медленнее внешнего ядра, что ведет к вековым смещениям магнитного поля.

Магнитные полюса Земли не совпадают с географическими. Положения магнитных полюсов не постоянны и заметно изменяются из года в год (рис. 16.3). Это перио-

дические (секулярные, вековые) смещения полюсов с периодом около 960 лет. Существуют ежегодные, и даже суточные, изменения положения полюсов. Однако они могут быть зафиксированы с помощью очень чувствительных приборов. Периодические (секулярные) изменения направления магнитного поля показывают, что магнитное поле имеет тенденцию дрейфовать на запад на расстояние от 19 до 24 км в год.

Изучение древних вулканических камней, лавы, показывает, что при охлаждении они «заморозили» направление магнитного поля, существовавшего в то время. Измерения намагниченности таких минералов показывают, что через определенное геологическое время

Рис. 16.3
«Блуждание» Северного
полюса в период 1941–
1947 гг.

Эту сложную кривую можно
разложить на две круговые
составляющие с периодами 12
и 14 месяцев.

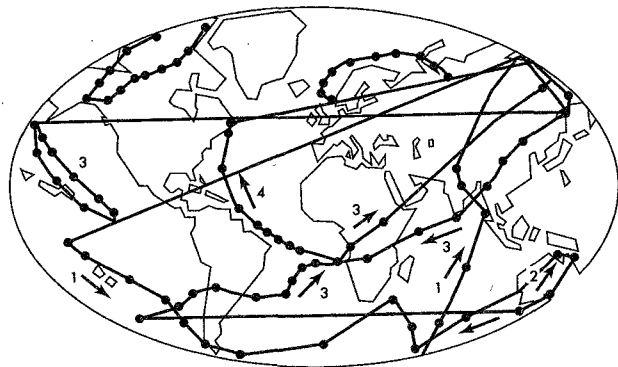
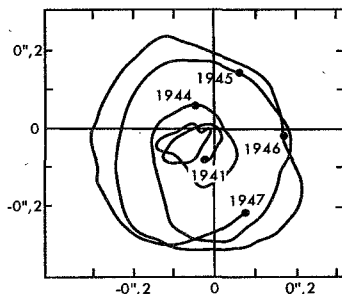


Рис. 16.4

Пример движения геомагнитного полюса

Скорость движения 10–15 см за тысячу лет (Channell J. E. T., Lehman B. Nature. 1997. V. 389).

ориентация магнитного поля существенно изменилась, тогда как ось вращения Земли переместилась значительно меньше (рис. 16.4).

Северный магнитный полюс 500 миллионов лет назад, например, был южнее Гавайев. Изучение остаточного магнетизма в вулканических породах, магнитных аномалий на дне океанов показало, что магнитное поле Земли полностью меняло полярность, по крайней мере, 170 раз за последние 100 миллионов лет. Измерения палеомагнетизма пород из разных точек поверхности Земли позволили обосновать гипотезу дрейфа континентов (лекция 17).

На магнитное поле Земли в данной точке значительное влияние оказывает и состав горных пород. Залегающие породы могут значительно изменить как его величину, так и направление. Так, в газете «Новое время» от 22 апреля 1898 года появилось сообщение: «Помощник председателя Императорского Русского географического общества А. А. Тилло получил извещение от профессора Э. Е. Лейста, производившего исследования по земному магнетизму в Курской губернии, что в деревне Кочетовка им открыто место, в котором наклонение магнитной стрелки равняется 900. Следовательно, в Кочетовке обнаружен северный магнитный полюс».

Атмосферное электричество (исключая связанное с зарядами внутри облаков и вызывающее электрический разряд — молнию) определяется ионизацией атмосферы солнечной радиацией и движением ионов, несомых атмосферными потоками. Атмосферные потоки определяются гравитационным притяжением Солнца и Луны и, подобно океанским течениям, находятся в постоянном установившемся движении. Ионизация воздуха (и, следовательно, электрическая проводимость) атмосферы около поверхности Земли мала, но быстро растет с увеличением высоты. На высотах от 40 до 400 км имеется очень хорошо проводящий слой, отражающий электромагнитные волны в радиодиапазоне (ионосфера). Ионизация атмосферы зависит от высоты, широты местности, времени суток.

Поверхностные токи образуют всемирную систему из восьми петель, достаточно симметрично расположен-

ных с обеих сторон экватора, а также ряд меньших петель около полюсов. Эта система токов связана с ежедневными изменениями в атмосферном электричестве. Однако происхождение системы является более сложным, и определяется, видимо, эффектом динамо в ядре Земли.

Поверхность Земли имеет отрицательный электрический заряд. Проводимость воздуха около поверхности мала, однако воздух не является совершенным изолятором, и заряд должен был бы постепенно исчезать. Этого не происходит из-за взаимодействия с атмосферой.

ВОПРОСЫ ДЛЯ САМОПРОВЕРКИ

1. Почему Э. Е. Лейст сделал вывод об обнаружении северного магнитного полюса в деревне Кочетовка Курской губернии?
 2. Каковы причины существования магнитного поля Земли?
 3. Каким образом показано, что магнитные полюса Земли перемещаются по поверхности?
-

ЛЕКЦИЯ СЕМНАДЦАТАЯ

ЗЕМНАЯ КОРА

Оболочка Земли, лежащая выше границы, обнаруженной югославским сейсмологом А. Мохоровичичем, носит название коры (литосферы). Граница Мохоровичича — это поверхность так называемого сейсмического раздела. На этой границе скорость распространения продольных упругих (сейсмических) волн при прохождении от поверхности Земли увеличивается от 6300 м/с до 7800 м/с, а поперечных — от 3700 м/с до 4300 м/с. Средняя толщина коры 33 км. Под океанами она тоньше (5–15 км), под материками — толще (20–75 км) (лекция 15).

Материковая кора сложена в основном из гранитов. Океаническая — из базальтов. Граниты содержат больше двуокиси кремния (SiO_2) и меньше железа и магния, чем базальты. Информация о составе земной коры может быть получена различными методами. Анализируются керны извлеченных с помощью глубинного бурения пород (таблица 17.1), изливающаяся при землетрясениях магма.

В таблице 17.2 приведены данные о химическом составе коры Земли и Луны, а также метеоритов.

Породы земной коры по происхождению делятся на три типа: *изверженные*, образованные при застывании магмы; *осадочные*, возникшие при осаждении частиц, разрушенных ветром и водой; *метаморфические*, сформированные из изверженных и осадочных пород.

— Все три типа пород образуют слоистую структуру земной коры (рис. 17.1).

Таблица 17.1

Характеристики некоторых глубоких и сверхглубоких скважин

Название	Регион	Преобладающие породы	Достигнутая глубина, м	Температура в забое, °C
Берта Роджерс	Оклахома (США)	Осадочные	9583	260
Кольская	Кольский полуостров (Россия)	Магматические и метаморфические	12 261	212
Саатлинская	Курильская впадина (Азербайджан)	Осадочные и вулканические	8324	148
Криворожская	Кривой Рог (Украина)	Метаморфические	5382	85
Воротилоская	Поволжье (Россия)	Породы ударного метаморфизма (метеорит)	5374	96
Тырныаузская	Северный Кавказ (Россия)	Граниты	4001	223
Уральская	Средний Урал (Россия)	Осадочные и вулканические	5355 (бурение продолжается)	81
Тимано-Печорская	Северо-восток европейской части России	Осадочные	6904	129
Тюменская	Западная Сибирь (Россия)	Осадочные и вулканические	7502	230
КТБ-Оберпфальц	Бавария (Германия)	Осадочные и метаморфические	9901	300

Таблица 17.2

Сравнение химических составов земной и лунной коры и метеоритов (в весовых процентах)

Элемент	Земная кора	Лунная кора	Метеориты (в среднем)
O	46,6	42,0	33,0
Si	27,7	21,0	17,0
Al	8,1	4,8	1,1
Fe	5,0	13,0	28,6
Mg	2,1	4,8	13,8
Ca	3,6	6,8	1,4
Na	2,8	0,4	0,7
K	2,6	0,2	0,1
Ti	0,4	6,0	0,1
Ni	0,01	0,02	1,7

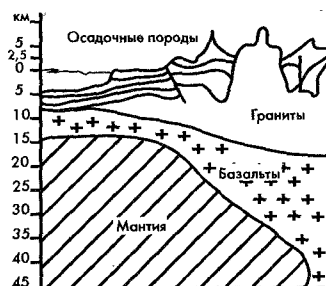


Рис. 17.1
Строение земной коры

Выделяют три основных слоя: осадочный, гранитный и базальтовый. Постоянные движения литосферы в вертикальном и горизонтальном направлениях делают эту слоистость достаточно условной.

Осадочная оболочка прерывиста, покрывает не всю поверхность. Толщина ее достигает 10–15 км. Ниже залегает слой, сложенный гранитами,

базальтом, метаморфическими породами. Излияния базальта через глубокие разломы земной коры послужили основанием для утверждения о том, что под гранитным слоем залегает слой, состоящий из более тяжелой, чем гранит, базальтовой породы.

Гранитный слой отсутствует на большой площади в центральной части Тихого океана и в отдельных наиболее глубоких областях Атлантического океана. Здесь на поверхность океанического дна выходит непосредственно базальтовый слой. Мощность этого слоя под материками колеблется от 10 до 40 км.

Изверженные, или магматические, породы составляют около 50% общей массы горных пород. В основе их классификации лежит содержание двуокиси кремния (кремнезема SiO_2). К ним относятся так называемые ультраосновные (менее 45%), основные (45–55%), средние (55–65%) и кислые (более 65%) породы. К основным относятся базальты, к кислым — граниты.

Осадочные породы делятся на четыре группы:

- 1) обломочные, образованные из продуктов разрушения любых горных пород (к ним относятся галька, щебень и т. п.);
- 2) глинистые (морские, озерные, речные, ледниковые), составляющие до 70% всех осадочных пород;
- 3) химические осадки, выпадающие из растворов или образующиеся на суше при химическом выветривании;
- 4) органогенные осадочные породы, обязанные происхождением жизнедеятельности организмов.

Породы последних двух групп практически неразличимы, так как их образование связано, чаще всего, с жизнедеятельностью живых организмов. К этим группам относятся такие породы, как известняки, бокситы и др. Особо отметим группу органогенных минералов: торф, бурый и каменный уголь, нефть, асфальт и ряд других.

Метаморфические породы образуются в глубинных слоях литосферы при перекристаллизации, изменении первоначального состава магматических и осадочных пород в условиях высоких температур и давлений с участием газов и растворов. К этим породам относятся кварциты, мрамор и др. Горные породы содержат различное количество радиоактивных элементов и вносят разный вклад в тепловое поле Земли (табл. 17.3).

Земная кора находится в постоянном движении как в горизонтальном, так и вертикальном направлениях. Оценки показывают, что средние скорости смещения в зонах повышенной сейсмической активности достигают 0,3 мм в год, в спокойных — 0,05 мм в год. Горизонтальные движения земной коры осуществляются крупными блоками. В середине XIX века Снайдер выдвинул *гипотезу дрейфа континентов*, получившую развитие уже в наше время.

Издавна сходство очертаний западного берега Африки и восточного берега Южной Америки считали свидетельством разделения единого материка. Еще в 1620 году Ф. Бэкон объяснял это совпадение возможной связью двух континентов в далеком прошлом. Кроме того, сходство не только очертаний, но и ископаемых растений и месторождений угля, непрерывность реликтовых горных хребтов дало основание для гипотезы образования Атлантики вследствие раскола праматерика и раздвижения осколков.

Таблица 17.3

Радиоактивные изотопы в земной коре

Породы	Содержание, весовых %			Выделяемая энергия, микроватт на кубометр
	Уран	Торий	Калий	
Осадочные породы	0,00025	0,0001	2,0	1,3
Граниты	0,00035	0,0014	2,8	2,1
Базальты	0,00009	0,0004	1,0	0,6



Рис. 17.2
Литосферные
плиты
и направления
их движения

Современные данные позволили сформулировать гипотезу, что в истории Земли континенты не менее пяти раз объединялись в суперконтиненты, образуя поочередно Лаурентию (1,9 миллиарда лет назад), безымянный (1,5 миллиарда лет назад), Роднию (1 миллиард лет назад), Гондвану (650 миллионов лет назад) и Пангею (250 миллионов лет назад).

Под влиянием данных об изменении направления магнитного поля Земли (лекция 16) и сведений о строении океанического дна гипотеза дрейфа континентов получила новое развитие. Карта районов землетрясений показывает, что они образуют узкие длинные зоны, разделяющие сейсмически активный верхний слой Земли на стабильные участки — *литосферные плиты* (рис. 17.2).

Внутри плит землетрясений не бывает. Зоны, ограничивающие плиты, образованы срединно-океаническими хребтами и глубокими океаническими желобами. По этим зонам расположено большинство действующих вулканов. Длина таких цепей вулканов составляет около 37 тысяч километров. На каждом километре за 1 миллион лет извергается до 40 кубических километров нового силикатного материала.

Сегодня принято, что земная кора состоит примерно из 15 жестких плит. Из них 6–7 — крупные, сталкивающиеся, погружающиеся и надвигающиеся одна на другую. Эти плиты, имеющие толщину 75–150 км, «плавают» на мантии. Вместе с плитами перемещаются континенты.

В последнее время появилась возможность измерить мельчайшие колебания поверхности Земли, изменение скорости ее обращения вокруг оси. Из двух удаленных

друг от друга точек поверхности Земли наблюдают за одним и тем же источником во Вселенной. Этот источник должен быть неподвижен для наблюдателя. В качестве источника в последних исследованиях используют квазары (очень яркие источники электромагнитного излучения, находящиеся на самом краю видимой Вселенной, лекция 12). Наблюдения ведутся с двух радиотелескопов, расположенных в тысячах километров друг от друга.

По этим и другим данным установлено, что Красное море расширяется со скоростью 1 см в год, Хребет Петра Великого на Памире движется в сторону Гиссарского хребта со скоростью около 2 см в год. По палеомагнитным данным Великобритании за последние 200 миллионов лет развернулась по часовой стрелке примерно на 30° и сместилась к северу.

В современном строении земной коры запечатлены результаты сложной и длительной геологической истории, в течение которой происходили закономерные изменения внутреннего строения и состава земной коры, рельефа поверхности, органического мира и его влияния на кору.

В соответствии с геохронологической шкалой, принятой в 1881 году, для определения относительного возраста пород введены термины *эра* (чрезвычайно продолжительный промежуток времени, сотни миллионов лет), *период*, *эпоха*, *век*, *время*.

Древнейшие времена в истории Земли, начинающиеся образованием первых осадочных пород, называют *архейской эрой* (гр. *arhaios* — первоначальный, древний). В образованиях архейской эры присутствуют углерод в виде графита и мощные слои известняка, скорее всего, образовавшиеся из органического известкового ила. Это дает основания считать, что во второй период (верхний по геологической терминологии) уже появилась жизнь. Начало архейской эры отстоит от нас не менее чем на 2 миллиарда лет. Именно в это время началось формирование жизни на Земле.

Следующий отрезок времени, в течение которого образовались осадочные породы, не так сильно измененные, как архейские, и содержащие уже явные остатки

растений и животных, называют *протерозойской* (ранней) *эрой* (от гр. *proteros* — более ранний, *зое* — жизнь). Эта эра имела продолжительность не менее 600 миллионов лет.

После протерозойской эры начинается *палеозойская эра*, эра древней жизни (от гр. *palaios* — древний), уже содержащая многочисленные остатки разнообразной и быстро развивающейся жизни. Они позволяют делить эту эру на периоды: кембрийский, силурийский, девонский, каменноугольный и пермский.

В кембрийском периоде жизнь сосредотачивалась в воде, суша представляла собой пустыни. Появились разнообразные, из растений господствовали водоросли.

Силурийский период заканчивает господство морской жизни. Появляются первые сухопутные животные (скорпионы) и растения.

Девонский период отличается значительным распространением наземных растений.

Во время каменноугольного периода возникло необычайное разнообразие наземных растений, образовались огромные леса, создавшие мощные и многочисленные пласты каменного угля.

Пермский период, в противоположность каменноугольному, характеризуется сухим и холодным климатом, вызвавшим обширное оледенение в южном полушарии, развитие пустынь, сокращение морей, образование мощных отложений солей в северном полушарии.

Палеозойская эра имела продолжительность не менее 300 миллионов лет.

Следующая эра — *мезозойская* (от гр. *mesos* — средний, промежуточный) — делится на периоды: триасовый, юрский и меловой. Она отличается сильным развитием пресмыкающихся, моллюсков, хвойных растений.

Триасовый период был временем относительного спокойствия земной коры. В конце периода появились первые млекопитающие.

Юрский период характеризуется развитием горообразовательных процессов, распространением земной флоры. По запасам угля он стоит на втором месте после каменноугольного. Пресмыкающиеся достигли господства на суше и в морях. Появились первые птицы.

Меловой период характерен дальнейшим усилением горообразования. Появились первые лиственные деревья.

Мезозойская эра имеет продолжительность не менее 100 миллионов лет.

За ней следует *кайнозойская эра* (от гр. kainos — новый), или эра новой жизни, начавшаяся около 70 миллионов лет назад. Она делится на два периода: третичный и четвертичный.

В течение этой эры земная поверхность, распределение материков и океанов, возвышенностей и низменностей дошли до современного состояния. Место пресмыкающихся, господствовавших в мезозойской эре, заняли млекопитающие и птицы. В конце эры появился человек.

Во время третичного периода рельеф Земли приблизился к современному виду. К этому времени относят первую эпоху оледенения.

Четвертичный период, продолжающийся и в настоящее время, характеризуется сменами похолодания и потепления (три ледниковых эпохи). В середине четвертичного периода появился человек.

Эволюция земной коры и эволюция живого на ней взаимосвязаны и взаимозависимы. На весь ход миграции химических элементов, структуру коры все сильнее влияло живое вещество.

ВОПРОСЫ ДЛЯ САМОПРОВЕРКИ

1. Каковы критерии определения границ земной коры? Отличается ли кора под материками от коры под океанами?
2. Сравните химический состав земной коры, коры Луны, состав метеоритов. Какие выводы можно сделать?
3. Из каких пород построена литосфера?
4. Почему естественный радиационный фон в кирпичных и деревянных домах ниже, чем в каменных?
5. В чем состоит гипотеза дрейфа континентов? Какие данные дают основание предполагать ее обоснованность?
6. Что такое эра, период, эпоха, век, время в геохронологической шкале? Дайте определение сегодняшнего этапа истории Земли по геохронологической шкале.

ПОЧВА. СТРОЕНИЕ И РЕГУЛИРУЮЩИЕ ФУНКЦИИ

Верхней границей литосферы, граничащей с атмосферой, является почва — особое образование, сформировавшееся из продуктов жизнедеятельности и разложения организмов, изменения под действием живых организмов, солнечного тепла, ветра и воды, горных пород.

Почву можно изучать с точки зрения геологии как инертный неорганический материал, не подверженный изменениям. И только в 1870 году основоположник учения о почвах В. В. Докучаев (1857–1903) доказал, что почва постоянно изменяется и развивается, в ее активной зоне идут физические, химические и биологические процессы. Образование почвы и развитие растительного покрова и животного мира неразрывны и взаимообусловлены.

Почва — самостоятельное природное тело, образующееся из поверхностных («дневных») слоев разнообразных горных пород под совместным влиянием воды, воздуха, различных организмов (живых и мертвых). Докучаев выделил пять главных почвообразующих факторов: климат, геологическая основа (материнская горная порода), топография (рельеф местности), биологические факторы (главным образом растительность и микроорганизмы) и время (продолжительность процесса почвообразования).

Основное и специфическое свойство, отличающее почву от горной породы, — *плодородие*. Почва обеспечивает необходимыми условиями произрастающие на ней растения и обитающих в ней животных. Естественное плодородие

дие почвы определяют природные запасы минеральных и питательных органических веществ и естественный гидротермический режим. Искусственное плодородие почвы определяется внесением удобрений и проведением комплекса агротехнических мероприятий. Эффективное плодородие определяется как совокупность естественного и искусственного, реализуемого при получении урожая. Эффективное плодородие зависит от уровня развития науки и техники.

В состав почвы входят четыре важных компонента: минеральная основа (до 60% общего состава почвы), органическое вещество (до 10%), воздух (до 25%) и вода (до 35%). Кроме того, есть и биотический компонент — организмы, населяющие почву.

Минеральный скелет почвы образовался из материнской породы в результате ее выветривания. В соответствии с международной классификацией, классы почв различаются по размеру частиц (табл. 18.1).

Таблица 18.1

Глина	Ил	Мелкий песок	Крупный песок	Гравий
0,002 мм	0,02 мм	0,2 мм	2 мм	

Площадь поверхности одного грамма глинистых минералов достигает 100 м^2 . Именно на этой поверхности сосредоточены основные запасы питательных веществ.

Идеальная почва должна содержать приблизительно равные количества песка и глины в сочетании с частицами промежуточных размеров. В этом случае образуется пористая структура (суглинков). С хозяйственной точки зрения почвы иногда относят к тяжелым (глины) и легким (пески). Это отражает усилия, необходимые для обработки почвы сельскохозяйственными орудиями.

Органическое вещество почвы образуется в результате жизнедеятельности живых организмов. Частично разложившиеся органические остатки носят название подстилки, конечный продукт разложения получил название гумуса.

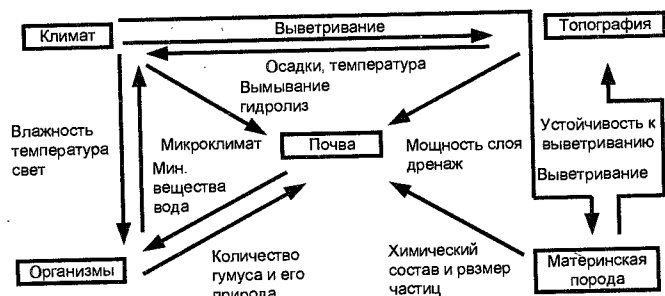


Рис. 18.1
Факторы почвообразования

Почвенный воздух и почвенная вода находятся в порах между частицами почвы и определяют жизнедеятельность почвенных частей растений и микроорганизмов. Газ и вода в почве — антагонисты. Состав газовой среды почвы сильно отличается от состава атмосферы. Содержание углекислого газа больше на один-два порядка, кислород может почти отсутствовать (до 1%). Из почвы постоянно выделяются двуокись углерода, метан, водород, соединения азота, летучие органические соединения.

Рассмотрим факторы образования почвы (рис. 18.1).

Климат и выветривание. Физическое и химическое разрушение материнской породы под влиянием климата и, в меньшей степени, живых организмов называется выветриванием. Наиболее важные факторы, вызывающие выветривание, — вода и температурные колебания.

Суточные колебания температуры ведут к изменению линейных размеров горных пород и их разрушению. Если в трещинах камней есть вода, то, замерзая, она создает огромные усилия, разрушающие породу. Перемещение ветром, водой, льдом мелких частиц ведет к эрозии незащищенных поверхностей.

Химическое выветривание связано с действием биологических и климатических факторов. Оно обычно ускоряется при повышении температуры. Вода действует как растворитель и реагент в процессе разложения некоторых минералов. Особенно подвержены эрозии породы,

слабо растворимые в воде (мел, известняк, состоящие из карбоната кальция). Эффективность воды как растворителя возрастает при растворении в ней двуокиси углерода и образовании слабого раствора угольной кислоты.

Некоторые растения (в частности, лишайники), способные расти на скальных поверхностях, вносят свой вклад в разрушение поверхности.

Температурный режим и осадки являются важнейшими климатическими факторами, приводящими к выветриванию. Если количество выпадающих осадков превышает испарение, в почве может идти процесс выщелачивания и заболачивания. В противном случае происходит иссушение почвы, питательные вещества поднимаются в растворе на поверхность, скудеет растительный покров. Это ведет к уменьшению образования гумуса и падению плодородия почвы.

Материнская порода определяет процессы почвообразования. Из гранитов и базальтов при выветривании формируются силикаты и глины. Осадочные породы приводят к формированию песчаников, мела и известняка. Метаморфические породы наиболее слабо подвержены выветриванию.

Топография. Влияние топографии связано с тем, что на разной высоте, при различной крутизне и экспозиции (ориентации на части света) склонов условия различны. Рельеф местности влияет на местный климат и дренаж. Дренаж обычно лучше на склонах, а по направлению к низине или дну долины он постепенно ухудшается. В случае постоянного переувлажнения там может образовываться торф. Со склонов часть воды стекает, смывая продукты выветривания. Поэтому слой почвы на склонах тоньше. Кроме того, почва медленно сползает вниз под действием силы тяжести. Рельеф местности, влияя на такие климатические факторы, как выпадение осадков и температура, косвенно сказывается и на процессе почвообразования. На солнечных склонах температура выше (1° наклона к югу соответствует перемещению на юг примерно на 100 км). Поэтому они суше, здесь быстрее развивается почва. Наветренные склоны обычно влажнее подветренных.

Организмы. Живые организмы участвуют в непосредственном формировании подстилки и гумуса. Микроорганизмы определяют процессы разложения в почве. Живые организмы (черви) улучшают аэрацию почвы, ее структуру, облегчают рост корневой системы растений.

Особо остановимся на деятельности человека. Хрупкое динамическое равновесие зрелой почвы может быть нарушено при использовании ее для сельскохозяйственных нужд. Происходит разрушение структуры почвы, истощение запасов питательных веществ, эрозия. Структура почвы особенно легко разрушается при обработке тяжелыми машинами и выпасе скота. При этом уменьшаются размеры почвенных пор, ухудшается аэрация и дренаж. Распашка почвы может привести к ветровой и водной эрозии. Точно такие же последствия могут быть и при вырубке лесов, особенно это опасно для тропических лесов с очень тонким слоем почвы. Например, в некоторых районах бассейна Амазонки началась массовая эрозия почв, сопровождающаяся заилением рек.

Глобальные функции почвенного покрова (педосферы). Формирование почвенного покрова Земли связано с существенным изменением поверхностных слоев, гидросферы и атмосферы. Поэтому можно говорить о глобальных функциях почвенного покрова.

Преобразовательная функция почвы проявляется в образовании органических кислот, взаимодействие которых с материнскими породами литосферы ведет к быстрому разрушению последних. Эта функция распространяется и на атмосферу. Разные почвы по-разному отражают и поглощают солнечное излучение. Бурые суглинки отражают не более 20%, свежераспаханные черноземы — до 7%, солончаки — до 35% солнечной радиации.

Вещество Земли находится в постоянном круговороте. Можно выделить два основных типа таких круговоротов — геологический и биологический, различающиеся темпами протекающих процессов. На фоне медленных, протекающих сотни миллионов лет, геологических преобразований выделяются быстрые биологические процессы. При этом почва является связующим звеном меж-

Поставляющая функция педосферы связана с преобразованием материнских пород, формированием осадочных пород в морях и океанах. От почвы зависит, какая часть атмосферных осадков поступит в реки. Чем более структурирована почва, тем меньше поверхностный сток.

Поступление твердого вещества и микроорганизмов в атмосферу связано с ветровой эрозией. Попадающие в атмосферу почвенные частицы поглощают солнечную радиацию, ухудшают качество воздуха. Источником большей части бактерий, присутствующих в атмосфере, служит почва. Восходящие потоки воздуха могут поднимать микроорганизмы до озонового пояса и переносить частицы на тысячи километров. В приземных слоях воздуха отмечено около 1200 видов бактерий, 40 000 видов спор грибов, 100 000 видов пыльцы цветковых растений.

О силе проявления почвенной функции как аккумулятора и источника вещества и энергии для организмов суши можно судить по затратам энергии на процесс почвообразования и накопления ее в растительном веществе. В таблице 18.2 приведена эффективность преобразования энергии (коэффициент полезного действия), рассчитанная как отношение затраченной и аккумулированной энергии. Видно, что наибольшая эффективность преобразования энергии наблюдается в зоне влажных тропиков и субтропиков.

Таблица 18.2

Затраты энергии на почвообразование и энергия, накопленная в растительном веществе

Природная зона	Затраты энергии	Накопленная энергия	Коэффициент полезного действия, %
	(кДж/см ² в год)		
Тундры и пустыни	200–1150	1–14	0,5–1,2
Черноземные степи	3500–7500	35–90	1–1,2
Влажные субтропики	10 000–14 000	150–400	1,5–3
Влажные тропики	14 000–18 000	400–900	3–5

Основной источник вещества и энергии для организмов суши — *гумус*. Его количество в педосфере оценивается в 2500 миллиарда тонн. Освоение почвенного покрова человеком и усиление эрозии (12 мая 1934 года США во время урагана за один день потеряли около 300 000 000 т почвы с площади более 4 000 000 га) приводят к сокращению запасов гумуса. За последнее столетие потери составляют 400 миллиардов тонн (около 3000 т с 1 км² поверхности Земли, включая океаны и полюса).

Передающая функция почвы состоит в том, что почва, являясь границей между литосферой и атмосферой, участвует в передаче вещества и энергии между ними. В процессе почвообразования происходит поглощение газов, перевод их в нерастворимые соединения и формирование осадочных пород. Почвенный покров, связывая газы, ограничивает уход в космос водорода, азота, кислорода. Перевод азота в литосферу осуществляется некоторыми бактериями.

Защитная функция педосферы. До 25 миллиардов тонн поверхностного слоя в год, в том числе из-за деятельности человека около 10 миллиардов тонн, переносятся ветром и водой в океан. Почва и растительный покров замедляют этот процесс. Огромная поверхность частиц почвы в состоянии связывать многие вредные соединения при их миграции в водоемы. Сорбционная способность почв огромна. Для ряда химических элементов (рубидия, цезия и др.) это фактически единственный механизм природной концентрации. Однако интенсивные выбросы промышленных предприятий приводят к отравлению почв и формированию огромных территорий промышленного загрязнения.

Целостный почвенный покров в физическом и химическом планах выступает как защитный барьер и условие нормального функционирования всех оболочек Земли.

Регулирующая функция педосферы определяется, как и предыдущие, особым ее положением как границы между литосферой и атмосферой. В структуре глобального круговорота Земли особое место занимают процессы локального испарения с поверхности почвы. На европейской части России осадки, выпадающие за счет местного испа-

рения, составляют до 12%. Почва способствует росту общего количества водяного пара, поступающего в атмосферу, и выравнивает процесс обеспечения влагой конкретных территорий.

Прямое участие почвы в регулировании газового состава атмосферы связано с деятельностью почвенных микроорганизмов. Потребление кислорода одним гектаром почвы достигает 4000 литров в час. Примерно столько же выделяется углекислого газа. Влажность почвы значительно влияет на газообмен.

Почва является ресурсом, необходимым для производства продуктов питания. Исследования показали, что на земном шаре имеется самое большее 3,2 миллиарда гектаров, потенциально пригодных для ведения сельского хозяйства. На сегодняшний день примерно половина, причем самая богатая и доступная, уже возделывается. Для подготовки оставшихся земель к производству продуктов питания требуются огромные капитальные затраты. По оценкам, стоимость освоения гектара новых земель колеблется от 200 до 6000 долларов США.

ВОПРОСЫ ДЛЯ САМОПРОВЕРКИ

1. Что такое почва? Почему почва занимает особое место в оболочках Земли?
 2. Какие почвообразующие факторы выделил В. В. Докучаев?
 3. Какова роль живых организмов в формировании почвы?
 4. Перечислите глобальные функции почвенного покрова.
 5. Почему во влажных субтропиках наблюдается наиболее интенсивное преобразование энергии Солнца? Как это связано с мощностью почвенного покрова?
-

ВОДА. ГИДРОСФЕРА. ВОДА И ЖИЗНЬ

Великое множество вещей
возникает из воды
и возвращается в воду.

Фалес

Воду еще с древних времен рассматривали как основу жизни. У Аристотеля она входила в число четырех «начал» и ее соединение с другими «началами» (землей, огнем, воздухом) порождало все многообразие мира (лекция 2).

Изучение молекулярной структуры вещества привело к пониманию исключительности воды как растворителя, способного образовывать связи с частицами практически всех веществ. Уникальные свойства воды связаны с малым размером молекулы и ее полярностью (неравномерным распределением электрического заряда в молекуле), наличием слабых водородных связей.

Удивительное свойство воды, способность при нормальных условиях быть жидкостью, определяет наличие жизни на Земле. Действительно, ближайшие, более тяжелые химические аналоги воды, гидриды серы (H_2S) и селена (H_2Se), являются газами при комнатной температуре и атмосферном давлении. Вода должна была существовать в жидком виде в интервале от $-80^\circ C$ до $-95^\circ C$. Но это не так.

Твердая вода (лед) легче жидкой. Это свойство тоже уникально. Впервые на него обратил внимание еще Галилей. Именно эта особенность отвечает за сохранение жизни в водоемах зимой.

Тепловые свойства воды оказались уникальными для обеспечения жизни. Испарение воды требует значительных затрат энергии, по сравнению с другими веществами скрытая теплота испарения воды необычайно велика.

Велика и скрытая теплота кристаллизации. Это обеспечивает возможность стабилизации температуры в условиях, близких к благоприятным для живых организмов.

Из-за большой теплоемкости требуется значительная энергия для небольшого изменения температуры воды. Моря и океаны являются гигантскими термостатами, сглаживающими суточные и сезонные колебания температуры. Причем не только такие большие массы воды, как моря, способны сглаживать эти колебания. Резкие суточные колебания температуры в районах великих пустынь связаны с отсутствием водяного пара в воздухе. Одно и то же количество солнечной энергии повышает температуру песка в 5 раз больше, чем температуру такого же количества сухого воздуха. Сухой воздух лишен водяного пара, способного сдерживать быстрое ночное охлаждение песка.

Высокое поверхностное натяжение воды обеспечивает не только жизнь микроорганизмов на поверхности, но и способность движения растворов по мелким сосудам в живых организмах.

Вода как растворитель играет основную роль в существовании жизни. Более 90% массы живой клетки приходится на долю молекул воды. Действительно, основная часть реакций в живой клетке идет в растворе, где ионы и молекулы получают возможность относительно свободного движения. Вода участвует в транспортировке вещества по живому организму, обеспечивает стабильные условия для обитания многих клеток и организмов.

Вода является участником процессов обмена веществ (*метаболизма*). При фотосинтезе она служит источником водорода и участвует в реакциях гидролиза. Она одновременно и среда, в которой протекают все биохимические процессы, и их участник. Вода — слабый электролит. Даже в сверхчистой воде одна молекула из 5 миллиардов (2×10^{-10}) диссоциирует на катион водорода H^+ и анион OH^- .

Земля непрестанно получает энергию от Солнца. Одновременно она излучает энергию в космическое пространство. Если оценить разницу этих двух процессов, то получится следующее. В Северном полушарии (между

38 параллелью и полюсом) излучение энергии обычно больше поглощения энергии, приходящей от Солнца. В районе экватора ситуация меняется. Выравнивание температуры происходит исключительно благодаря круговороту воды.

Удельная теплоемкость воды больше, чем у любого другого вещества. Поэтому за счет циркуляции воздушных масс в атмосфере и морских течений избыточная солнечная энергия переносится из теплых зон в холодные. Важную роль играют полюса, на которых вследствие таяния льда поглощается избыточная энергия.

Общая масса снега и льда на Земле составляет 0,0004% от массы всей Земли. Этого достаточно для того, чтобы покрыть всю поверхность планеты слоем 53 м. Если эта масса растает, то уровень океана поднимется на 64 метра. 99% этой массы находится в Антарктиде и Гренландии. Снег (лед) имеет очень высокую отражательную способность. Она превышает среднюю для земной поверхности на 30%. Именно поэтому на полюсах разность между поглощаемой и излучаемой энергией всегда отрицательна. То есть поглощенная поверхностью энергия меньше испущенной. В результате происходит терморегуляция планеты.

Общая масса воды составляет около $1/4000$ массы Земли (около $1,5 \times 10^{15}$ т). При этом вода находится в жидком, твердом и газообразном состояниях (таблица 19.1).

Значительная часть воды — соленая, сосредоточена в Мировом океане (условно разграниченном на четыре океана — Атлантический, Тихий, Индийский и Северный Ледовитый). Океан — в космогонии древних греков протекающая землю река, из которой ежедневно на востоке встает Солнце и в нее же опускается на западе.

Таблица 19.1

Вода на Земле

Фазовое состояние	% от общей массы
Жидкая вода	98,85
Твердая вода (лед)	2,15
Водяные пары атмосферы	$85 \cdot 10^{-4}$

Таблица 19.2

Основные характеристики океанов

Океан	% общей массы воды	Площадь, тысяч кв. км	Средняя глубина, м	Средняя температура, °С	Подъем уровня воды, мм в год
Тихий	52,8	178684	4028	19,4	1,5
Атлантический	24,7	91655	3627	16,5	1,7
Индийский	21,3	76174	3897	17,0	0,9
Северный Ледовитый	1,2	14699	1296	-0,8	—

Большую часть Земли занимают моря и океаны (таблица 19.2). Их площадь составляет 71% поверхности планеты. Средняя глубина Мирового океана 3795 м, глубины от 3000 до 6000 м занимают до 76% площади морского дна. Менее 1% приходится на пресную жидкую воду. Вся вода на Земле образует единую систему, находящуюся в непрерывном круговороте (рис. 19.1).

Изменение соотношений между составными частями круговорота приводит к периодам оледенения и потепления, изменению уровня Мирового океана. В настоящее время годовая водный баланс складывается следующим образом (в тысячах кубических километров): расход — испарение воды с поверхности суши и Мирового океана — 505; приход — осадки — 458; речной сток — 47.

К соленым водам относятся все моря и океаны и отдельные типы континентальных водоемов (вулканические озера, соленые озера пустынь, изолированные остатки древних морей и т. д.). Среднее содержание солей около 3,5% (35 г/л).

Для обеспечения теплового режима Земли крайне важно взаимодействие воздушных масс атмосферы и вод

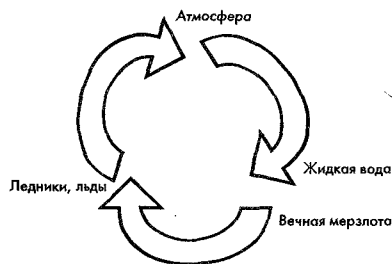


Рис. 19.1
Круговорот воды в природе

Мирового океана. Вода имеет очень высокую теплоемкость, благодаря чему Мировой океан является хранилищем солнечной энергии. Слой воды толщиной 1 см поглощает 94% падающей на поверхность солнечной энергии. Суточные изменения температуры над поверхностью океана не превышают 1°C, годовые не достигают 10°C. С глубиной температура понижается и на глубине от 100 до 700 м находится слой с резким перепадом температуры — главный термоклин. Придонные слои имеют температуру 1–3°C. В полярных областях — от 0 до 1,5°C.

Если охладить Мировой океан на глубину до 200 м на полградуса, то температура воздуха над Европой нагреется на 10°C на высоту до 4000 м. При охлаждении 1 см³ воды на 1 К выделяется тепло, достаточное для нагрева на 1 К 3134 см³ воздуха.

Современный уровень океана установился около 7000 лет назад. Колебания уровня за последние 200 миллионов лет по данным геологических исследований не превышали ± 100 м относительно современного.

В верхнем слое Мирового океана в одном литре воды растворено 50 мл углекислого газа, 13 мл азота, до 8 мл кислорода.

Средняя продуктивность океана соизмерима с продуктивностью пустыни. Высокой продуктивностью отличаются только 17% поверхности. В основном это литоральные зоны (зоны, в которых солнечные лучи достигают дна, глубина не более 500 м), коралловые рифы, мелководные банки. 35% поверхности имеют незначительную продуктивность. Около половины поверхности Мирового океана — биологическая пустыня. Более 2/3 биомассы живых организмов сосредоточено на глубинах до 500 м.

Самая жесткая пресная вода содержит солей не более 0,5 г/л (0,005%). Существуют проточные и стоячие водоемы. По экспертным оценкам, жизнь реки существенно зависит от состояния берегов. Основной запас пресной воды содержится в подземных водах. По оценкам, их около 28,5 миллиардов кубических километров, почти 15 раз больше, чем в Мировом океане. Можно утверждать, что именно подземные воды являются основным резервуаром, пополняющим все поверхностные моря и океаны.

Подземная гидросфера может быть разбита на 5 зон.

1. Криозона. Область льдов. Глубины, до которых простираются льды, неизвестны. Существует зона, где внутреннее тепло Земли может расплавить лед. Плавления льда при достаточно высоких давлениях и низких температурах не происходит (точка зрения, что лед плавится под действием давления, ошибочна). Зона охватывает полярные районы. В нее входят и жидкие рассолы. Именно они, вероятно, ответственны за образование вечной мерзлоты и, растекаясь в глубине, охлаждают поверхностные слои. Толщина этой зоны до 1 км.

2. «Жидкая» вода. Охватывает практически всю земную кору.

3. Зона парообразной воды ограничена слоями с температурами 450–700°C. Глубины до 160 км, давления до 5 ГПа.

4. Зона мономерных молекул воды. Охватывает слои с диапазоном температур 700–1000°C и давлениями до 10 ГПа. Граница находится на глубинах до 270 км.

5. Зона плотной воды. Простирается до глубин 3000 км и охватывает всю мантию. Температуры от 1000 до 4000°C. Давления до 120 ГПа. Вода полностью диссоциирована на ионы водорода и кислорода. В обычном смысле, конечно, отсутствует.

ВОПРОСЫ ДЛЯ САМОПРОВЕРКИ

1. Как осуществляется круговорот воды?
2. Почему вода ответственна за терморегуляцию планеты?
3. Какие свойства воды определяют существование жизни на Земле?
4. Перечислите основные характеристики соленых вод.
5. В чем различие соленых и пресных вод?
6. Какова роль подземных вод?

АТМОСФЕРА. КЛИМАТ

Земной шар окутан невидимой оболочкой — *атмосферой*. Первой известной книгой об атмосферных явлениях была «Метеорология» Аристотеля.

Масса атмосферы около 5×10^{18} кг, причем половина воздуха сосредоточена на высотах ниже 6 км. По оценкам, возраст воздушной оболочки несколько миллиардов лет.

Условная верхняя граница атмосферы располагается там, где плотность оказывается равной плотности газов межпланетного пространства, — около 1000–1200 км (где еще наблюдаются полярные сияния). Вместе с тем следы земной атмосферы обнаружены межпланетными станциями на расстояниях более 20 000 км от Земли. При этом стоит помнить, что легкие газы покидают атмосферу — так за Землей по ее орбите тянется гелиево-водородный шлейф. Исследования с помощью спутников показывают, что на высотах более 500 км в атмосфере преобладает гелий, еще дальше от поверхности Земли атмосфера практически полностью состоит из водорода.

В 1962 году Всемирная метеорологическая организация пришла к выводу, что в качестве параметра, определяющего структуру атмосферы, может быть принята температура воздуха (для верхних, сильно разреженных слоев атмосферы — температура как мера энергии частиц). На этом основании атмосфера в достаточной мере условно разделена на 5 сфер: тропосферу — до 11 000–20 000 м; стратосферу — до 50 000–55 000 м; мезосферу — до 80 000–85 000 м; термосферу — до 800 000 м; экзосферу — выше 800 000 м.

Название нижнего слоя, *тропосферы*, происходит от греческого слова «тропос» — вращение, перемешивание. Высота тропосферы зависит от географической широты, времени года и других причин. В умеренных широтах толщина тропосферы 9–12 км, около полюсов — 8–10 км, около экватора — 16–18 км. Воздух в тропосфере постоянно перемешивается, именно здесь сосредоточены основные массы водяного пара. Именно процессы в тропосфере ответственны за климат и погоду. С высотой температура воздуха в тропосфере убывает — примерно на 1 К на каждые 200 м высоты. На верхней границе тропосферы средняя годовая температура $-50-70^{\circ}\text{C}$.

Тропосферу и стратосферу разделяет относительно узкий слой, характеризующийся мощными узкими потоками воздуха (до 300 км/ч) и имеющий толщину 1–2 км — тропопауза.

В лежащей выше *стратосфере* температура воздуха медленно растет и на верхней границе достигает 0°C . При этом о температуре уже можно говорить только как о мере энергии частиц: концентрация молекул в стратосфере, по крайней мере, в 100 раз меньше, чем у поверхности Земли (и уменьшается с ростом высоты). Водяного пара в стратосфере нет. Однако в стратосфере, как и в тропосфере, происходит интенсивное перемешивание воздушных масс. Здесь же, на высотах от 20 до 30 км, лежит насыщенный озоном O_3 слой.

Следующий слой — *мезосфера*. При увеличении высоты температура падает до $-70-80^{\circ}\text{C}$. Выше 80 км, в *термосфере*, температура газа повышается и достигает постоянного значения до 1500°C в *экзосфере*. Энергия ионизированных частиц верхних слоев атмосферы зависит от солнечной активности, времени года.

С точки зрения физических процессов, атмосфера условно разделяется на *хемисферу* (ниже 80 км), в которой существенную роль играют химические процессы, и *ионосферу* (выше 80 км), ионизированный газ которой определяет особенности электрических процессов (отражение радиоволн, полярные сияния и др.).

Атмосфера Земли содержит (в весовых процентах) 78% азота, 21% кислорода, чуть менее 1% аргона, 0,03%

углекислого газа. Водород — самый распространенный элемент Вселенной — в атмосфере Земли почти отсутствует.

Атмосферы других планет существенно отличаются от атмосферы Земли. Так, по данным исследований с использованием космических аппаратов, атмосфера Венеры на 97% состоит из углекислого газа.

Углекислый газ, являясь причиной возникновения парникового эффекта, играет огромную роль в регулировании тепловых потоков между поверхностью Земли и космосом (лекция 21).

Озоновый слой. Проблема «озоновой дыры», уменьшения концентрации озона O_3 в атмосфере, является одной из наиболее обсуждаемых сегодня. Озон — химически активный газ, сильный окислитель. Но в то же время он нестойкий, легко разлагается на молекулу и атом кислорода. Образуется при электрическом разряде в воздухе, при действии ультрафиолетового излучения на атомы кислорода. Свежесть воздуха после грозы связана с повышением концентрации озона (обычно в воздухе в приземных слоях — не более одной стотысячной доли процента озона). Озон применяют для дезинфекции воды, воздуха, отбеливания тканей и т. п. Характерный неприятный запах сопровождающий работу копировальных аппаратов и медицинских стерилизующих ламп вызван повышением концентрации озона из-за ионизации окружающего воздуха.

В верхних слоях атмосферы (высоты от 10 до 50 км) находится слой, в котором концентрация озона существенно выше, чем в приземных слоях. Озон верхних слоев атмосферы поглощает основную долю коротковолнового ультрафиолетового (с длиной волны около 250 нм) излучения Солнца. Увеличение интенсивности этой части излучения Солнца ведет к росту заболеваний кожи (немеланомный рак), глаз, иммунной системы. Снижается продуктивность животноводства, урожайность сельскохозяйственных культур. При уменьшении содержания озона на 10% интенсивность ультрафиолетового излучения с длиной волны 290 нм возрастает в 50 раз.

Общее количество озона в атмосфере мало, при нормальном давлении и температуре 0°C он распределится бы по земной поверхности слоем 2–3 мм.

Как показали измерения, содержание озона в атмосфере зависит от времени года и от широты местности. Самое низкое содержание озона — в экваториальном слое, от 28° северной широты до 28° южной широты (почти половина поверхности земного шара). В поясе умеренных широт ($35-70^\circ$) северной широты количество озона самое большое. Сезонные колебания совпадают с сезонными колебаниями солнечной энергии. В арктическом поясе озона сравнительно мало.

Содержание озона в атмосфере тесно связано с солнечной активностью. В поясе умеренных широт в годы максимальной активности Солнца содержание озона повышается. В тропических областях в годы активного Солнца количество озона уменьшается по сравнению со спокойными годами.

Весной 1985 года при тщательных измерениях концентрации озона с использованием спутников было обнаружено, что над Антарктидой существует зона, в которой концентрация озона ниже, чем в других точках над поверхностью планеты. Причем количество озона имеет тенденцию к уменьшению. Появился термин «озоновая дыра». В начальный период наблюдений (1985–1987 гг.) площадь озоновой дыры возрастала. В дальнейшем характер ее изменения стал менее определенным, ясности в динамике поведения «озоновой дыры» нет и по сей день.

Поиск причин возникновения озоновой дыры привел к точке зрения, что это явление связано с деятельностью человека — полетами самолетов, запусками ракет. И особенно — с использованием негорючих, взрывобезопасных, химически инертных газов типа хладона (фреона). Именно эти газы являлись общеупотребительными в холодильной технике, пожаротушении промышленных объектов, косметике. Мировое производство хладонов на конец 80-х гг. составляло около 800 тысяч тонн в год. Сегодня производство этих газов фактически уничтожено.

В 1985 г. была принята Венская конвенция по защите озонового слоя, в 1987 г. — Монреальский протокол, согласно которому страны, его подписавшие, обязываются резко сократить выпуск фреонов и других разрушающих озон веществ.

Но никто не доказал, что именно эти газы являются причиной возникновения озоновых дыр. Механизм образования озоновых дыр неизвестен. Однако точно известно, что «фреоновая» версия выгодна мировым производителям химических продуктов, в частности — корпорации Дюпона. Этот пример показывает, как результаты лабораторных исследований дают аргументы для завоевания экономических рынков и вытеснения конкурентов.

Понятие *климата* (от греч. klima — наклон) ввел древнегреческий астроном Гиппарх из Никеи (190–120 годов до нашей эры), разделивший Землю на пять широтных зон — полярные, умеренные и тропическую, отличавшиеся наклоном солнечных лучей, то есть высотой Солнца над горизонтом. А. Гумбольдт (1769–1859) добавил к этому «наклону» влияние подстилающей поверхности океана и суши на атмосферу.

Под климатом понимают усредненные за сто лет характеристики (температуру, давление, освещенность, количество осадков и т. п.). Оказалось, что такое усреднение весьма точно характеризует условия, существующие как в отдельных зонах, так и на планете в целом. Именно поэтому климат является глобальной характеристикой. На протяжении жизни отдельного человека климат остается практически неизменным, погода рассматривается как нечто колеблющееся около некоторых средних значений. Заметить изменчивость климата удается только при научных исследованиях.

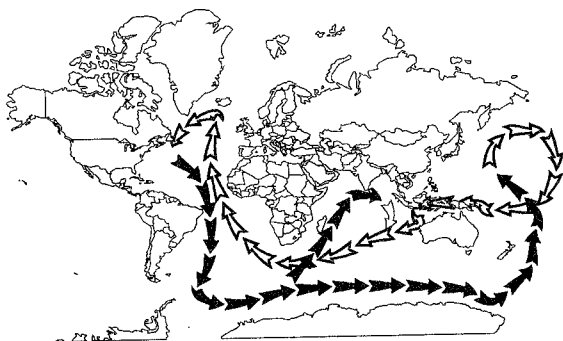
Основными климатообразующими процессами являются теплообмен, влагообмен и циркуляция атмосферы. Все эти процессы имеют один источник энергии — Солнце.

Теплообмен складывается из процессов поглощения солнечной энергии поверхностью суши и океаном; испарения воды (в том числе — растениями); теплоотдачи от поверхности океана и суши в атмосферу; таяния и кристаллизации воды.

Интенсивность теплового потока от океана примерно в 3 раза меньше, чем от суши, и достигает максимума в тропических поясах. Толщина океанического слоя, в котором проявляются сезонные колебания, составляет 240 м, а у суши — 10 м. Океан играет в климатической

Рис. 20.1
Океанический
пояс

Холодные потоки, циркулирующие вокруг Антарктики, перемещают в Тихий и Индийские океаны охлажденную воду. Там она нагревается и поднимается к поверхности. Вслед за этим нагретые воды движутся к Югу. Совершается круговорот энергии.



системе роль инерционного звена, именно он отвечает за изменения климата и долгосрочные аномалии погоды.

Влагообмен проявляется в испарении воды с поверхности суши, переносе водных масс течениями в морях и океанах, конденсации и выпадении осадков.

Годовое количество осадков на океанах в 1,5 раза больше, чем в среднем на суше. Разница отсутствует в тропическом поясе.

Циркуляция атмосферы складывается из горизонтальных и вертикальных воздушных течений. Постоянное существование разности температур между экватором и полярными районами является причиной устойчивых потоков воздуха в атмосфере. Воздушные потоки перераспределяют влагу над поверхностью Земли. В процессе планетарного влагообмена в тропосферу над сушей поступает тепло с океанов, достаточное для испарения годового стока воды с суши в океан.

Климат классифицируют по различным признакам.

По объему территорий, охватываемых анализом указанных выше взаимосвязей. Макроклимат — от планеты до крупных географических районов; мезоклимат — для крупного объекта географического ландшафта (лес, город и т. п.); микроклимат — для небольшой территории или отдельных небольших объектов (склон, улица, нора и т. д.).

По географическим зонам — климат тундры, тайги, пустыни, саванны, тропического леса и т. п.

По связи атмосферы с поверхностью Земли — климат приземного слоя, климат высоких слоев атмосферы.

По нахождению воздушных масс над сушей или океаном — океанический, морской, континентальный.

По степени насыщенности водяными парами — аридный (сухой), семиаридный, гумидный (влажный).

Основными географическими факторами, обуславливающими пространственные различия климата, являются: географическая широта местности; подстилающая поверхность (пустыня, лес, тундра, степь и т. п.); близость к океану; высота над уровнем моря.

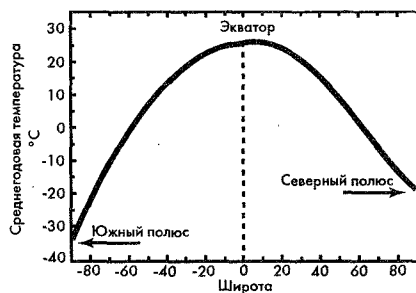
Географическая широта оказывает ведущее влияние на взаимосвязь процессов тепло- и влагообмена, циркуляцию воздушных масс. Интенсивность и режим солнечного излучения, отклоняющая сила вращения Земли (силы Кориолиса), перенос влаги, выпадение осадков непосредственно связаны с широтой местности. Поэтому и возникло понятие зонального климата.

Температура воздуха вблизи поверхности Земли повышается при движении от полюса к экватору (рис. 20.2). Среднегодовая температура на Южном полюсе (-35°C) ниже, чем на Северном (-19°C). Самая высокая среднегодовая температура отнюдь не на экваторе, а несколько смещена в сторону Северного полюса. В Северном полушарии температура увеличивается примерно на $0,5^{\circ}\text{C}$ при приближении к экватору. В южном полушарии она меняется быстрее, увеличиваясь на $0,7^{\circ}\text{C}$. Это связано с разными условиями теплового режима полушарий.

Действительно, в Северном полушарии на сушу приходится 39% поверхности, а в Южном — 19%. Различны и характеристики полярных областей. Северная полярная область занята океаном, и за счет связи с Мировым океа-

Рис. 20.2
Связь среднегодовой температуры с широтой местности

Видно, что максимальная среднегодовая температура наблюдается примерно на 20° Северной широты. Южное полушарие холоднее Северного.



ном получает заметное количество тепла. Южная полярная область занята материком, и приток энергии к ней возможен только за счет атмосферных процессов и излучения Солнца. Стационарные области высокого давления (антициклоны) изолируют внутренние области Антарктиды от переносов тепла. Отражающая способность поверхности антарктических льдов (альbedo) составляет 90% (т. е. только 10% падающего излучения поглощается поверхностью). В то же время альbedo в Арктике равно 70%. То есть 30% падающей энергии поглощается льдами и водой.

Климат определяется и осадками, зависящими от влажности (количество водяного пара в единице объема воздуха). Из-за разной температуры воздуха на разных широтах различна и влажность воздуха. На экваторе она велика и обеспечивает выпадение осадков до 2000 мм в год. В приполярных районах оно в 10 раз меньше.

ВОПРОСЫ ДЛЯ САМОПРОВЕРКИ

1. Каковы принципы деления атмосферы на отдельные зоны (сферы)?
2. Прокомментируйте высказывание: «Температура газа в экзосфере достигает 1500 К».
3. Что такое «озоновая дыра»? Можете ли Вы привести примеры использования данных естественных наук для манипулирования населением?
4. Почему климат — глобальная характеристика?
5. В чем разница между климатом и погодой?
6. Что такое микроклимат?
7. Какие основные климатообразующие процессы на Земле?
8. Почему мы утверждаем, что Мировой океан определяет глобальный климат планеты?
9. Какие причины обуславливают пространственную дифференциацию климата?
10. С чем связана широтная зависимость среднегодовой температуры?
11. Почему средняя годовая температура в Северном полушарии выше, чем в Южном?

ГЛОБАЛЬНОЕ ИЗМЕНЕНИЕ КЛИМАТА. ЧЕЛОВЕК И ИЗМЕНЕНИЕ КЛИМАТА

Предполагается, что планеты земной группы (Меркурий, Венера, Земля и Марс) когда-то были похожи друг на друга. Они состояли из почти одинаковых пород, имели сходную по составу атмосферу, имели способность удерживать около себя атмосферу и воду на поверхности. Разница в климате возникла из-за разного круговорота углекислого газа при обмене им между корой, океаном и атмосферой.

Марс потерял возможность возвращать углекислый газ в атмосферу, поэтому он «заморожен». На Венере, наоборот, нет механизмов снижения концентрации углекислого газа в атмосфере. Меркурий совсем не способен удерживать атмосферу, и Солнце полностью определяет температуру его поверхности.

Как и водяной пар, углекислый газ является *парниковым газом*. Это значит, что он, хорошо пропуская солнечное излучение в видимой части спектра, сильно поглощает инфракрасное — тепловое — излучение. Это излучение идет от поверхности Земли. То есть углекислый газ играет роль оболочки, поглощающей тепловое излучение планеты и, за счет процессов в атмосфере, возвращающей ее назад.

Расчеты показали, что существующий климат Земли обязан происхождением особенностям механизма газового обмена. При остывании планеты количество углекислого газа в атмосфере возрастает, при нагревании — увеличивается.

При своем развитии Солнце изменяло светимость, эволюцию звезды мы рассматривали в лекции 13. Известно, что 4 миллиарда лет назад радиус Солнца был меньше на

7%, а температура поверхности — ниже на 4%. То есть светимость была на 27% меньше нынешней. Поэтому, по оценкам, если бы атмосфера Земли 2 миллиарда лет назад соответствовала нынешней, то она должна была бы находиться в замороженном состоянии.

Однако известно, что уже тогда существовали океаны. То есть атмосфера была иной, чем сейчас. Если в первоначальной атмосфере Земли парциальное давление (доля, вносимая в общее давление) углекислого газа составляло тысячные доли атмосферы, то вода бы не могла замерзнуть. Естественно считать, что климат менялся вместе с эволюцией планет.

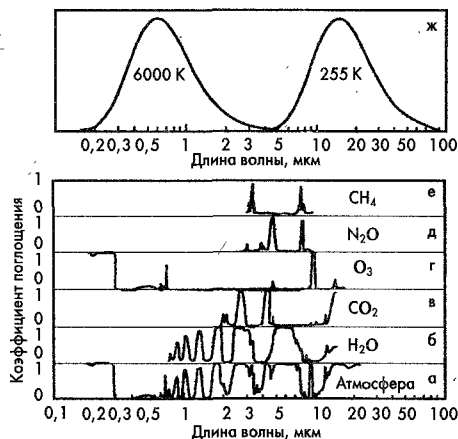
Есть основания полагать, что первоначально парниковый эффект на Земле создавался за счет аммиака и углекислого газа. Однако аммиак под действием солнечного света разлагается на азот и водород. Поэтому для поддержания постоянной концентрации аммиака необходимо было бы выделение аммиака из горных пород. Углекислый газ разрушается светом заметно медленнее и его достаточно много на Земле. Парциальное давление CO_2 в атмосфере невелико (0,0003 мм рт. ст.), однако его очень много в горных породах (достаточно для создания парциального давления 60 мм рт. ст.).

Оценки показали, что содержание углекислого газа снижалось в атмосфере со скоростью, точно компенсирующей

Рис. 21.1

К объяснению «парникового эффекта»

Верхние графики (ж) — относительные спектры излучения Солнца и нагретой Земли. Внизу — спектры поглощения атмосферы (а), водяного пара (б), углекислого газа (в), озона (г), закиси азота (д), метана (е). Видно, например, что озон поглощает коротковолновое излучение Солнца. Углекислый газ поглощает тепловое излучение Земли.



возрастание светимости Солнца. Более того, показано, что Земля находится на удивительно точном расстоянии от Солнца, необходимом для поддержания температуры за счет парникового эффекта. Если бы Земля была ближе к Солнцу всего на 5%, то атмосфера нагрелась бы настолько, что в результате прогрессирующего парникового эффекта испарились бы океаны. Если бы, наоборот, расстояние от Солнца было больше всего на 1%, то за счет подавления парникового эффекта началось бы разгоняющееся оледенение. Только в узкой полоске от 0,95 до 1,01 а. е. Земля смогла избежать этой катастрофы климата (и жизни).

Скорее всего, содержание углекислого газа менялось в соответствии с изменением температуры поверхности Земли. Этот режим саморегуляции, или *отрицательной обратной связи*, обеспечил планете устойчивость климата.

Эта обратная связь могла обеспечиваться карбонатно-силикатным геохимическим циклом, способным отвечать за 80% обмена углекислым газом между планетой и атмосферой с периодом более 500 000 лет.

Началом цикла можно считать растворение атмосферного углекислого газа в водяных капельках и образование угольной кислоты H_2CO_3 . Эта кислота вступает в реакции с горными породами. Продукты реакции поступают в грунтовые воды, океан, оседают в скелетах организмов, состоящих из карбоната кальция (CaCO_3). Из останков этих организмов формируются осадочные породы (лекции 17,18). Через многие тысячелетия эти породы попадают в земные недра, где под действием давления и температуры карбонат кальция соединяется с кремнием. При этом образуются силикатные породы и выделяется углекислый газ. Газ вновь попадает в атмосферу. Цикл завершен.

Изменения температуры земной поверхности влияет на количество углекислого газа в атмосфере и величину парникового эффекта. Пусть по некоторой причине средняя температура Земли понизилась. Тогда уменьшается испарение воды из океана, меньше выпадет дождей, уменьшается эрозия почвы, связанная с осадками. То есть скорость покидания атмосферы углекислым газом уменьшится. Но скорость регенерации и поступления его в атмосферу останется прежней. То есть в атмосфере

начинается накопление углекислого газа, развитие парникового эффекта и повышение температуры. В случае потепления отрицательная обратная связь обеспечит понижение температуры.

В круговороте CO_2 большую роль играют живые организмы. Часть CO_2 (около 20%) выводится из атмосферы растениями в результате фотосинтеза. При гниении растений и окислении в почве оказывается больше CO_2 , чем 400 миллионов лет назад, до появления растений. Поэтому превращение силикатных материалов в осадочные породы происходит быстрее, чем в начале эволюции Земли. Исчезновение растений привело бы к повышению температуры на 10°C за счет действия отрицательной обратной связи силикатно-карбонатного цикла.

Светимость Солнца растет примерно на 1% в 100 миллионов лет, то есть через 1 миллиард лет на Земле могут возникнуть условия, угрожающие существованию жизни и сохранению жидкой воды.

Климат Земли неоднократно менялся. 18 000 лет назад льдом была покрыта практически 1/3 современной суши. Уровень воды в Мировом океане был ниже на 100 м, среднегодовая температура — ниже на 5°C . Это было последнее оледенение.

В ранней истории Земли найдено минимум три оледенения за последний миллион лет. Показано, что ледниковая эпоха наступает каждые 100 миллионов лет, однако образование льда занимает значительно меньше времени, чем его таяние.

Известно несколько теорий резкого изменения климата. Одной из причин считают незначительные отклонения (циклические изменения эксцентриситета) земной орбиты, наклона земной оси к плоскости эклиптики и прецессии оси. Когда действие этих эффектов складывается, возникает «резонанс», возможно заметное изменение климата, причем не в отдельных районах, а на всей планете.

Последние исследования показывают, что переходы между ледниковыми и межледниковыми условиями представляют собой скачки между двумя устойчивыми состояниями системы «атмосфера-океан». Все ледниковые периоды совпадали с низким уровнем Мирового океана.

Для низкого уровня Мирового океана характерны оледенение, усиленная вертикальная циркуляция воды (за счет нагрева глубин земным теплом и интенсивного охлаждения на поверхности), рост биопродуктивности и активное видообразование. Континенты слабо затоплены, поэтому формирование осадочных пород за счет образования угольной кислоты уменьшается; концентрация углекислого газа в атмосфере растет; климат теплеет; льды тают, увеличивается площадь затопленных континентов; понижается циркуляция воды в океанах.

14 000 лет назад наша планета стала летом нагреваться в северном полушарии сильнее, чем в Южном. Сейчас, кроме «астрономических» факторов, появился новый — человек. В атмосферу выбрасывается все больше парниковых газов, в частности — углекислого. Какова возможная реакция климата на эти воздействия? Резкие изменения климата могут катастрофически сказаться на развитии цивилизации.

Анализ изменений климата за 1000 лет показал, что имеется общая тенденция к его потеплению. Модели, на основе которых строятся предсказания изменений климата, очень сложные, многопараметрические. И результаты их имеют достаточно низкую предсказательную силу. Достоверно известен лишь факт общего потепления климата на $0,5^{\circ}\text{C}$ за столетие.

При этом ясно, что даже фоновые колебания температуры на $1-2^{\circ}\text{C}$, непрерывно происходящие в природе, сказываются на урожаях. Кроме того, изменение средних температур происходит преимущественно за счет приполярных областей. Многолетние наблюдения показывают, что средние температуры на экваторе остаются практически неизменными. Понижение средней температуры на $0,5^{\circ}\text{C}$ ведет к понижению ее у полюсов на $2-3^{\circ}\text{C}$. Как результат — растут площадь и толщина льдов.

А что произойдет при потеплении? Уменьшается перепад температур между полюсами и экватором. То есть снижается интенсивность циркуляции атмосферы, ослабевает перенос энергии от экватора к полюсам, засушливые зоны становятся еще более засушливыми, продуктивность живого вещества падает.

Еще в прошлом веке известный климатолог, геофизик А. И. Воейков сформулировал построенный на многолетних наблюдениях закон: «Тепло на Севере — сухо на Юге». Всякий раз, когда в ходе циклического изменения средних температур на Севере начинает теплеть, в Заволжье, Казахстане, других районах юго-востока Евразии, увеличивается количество засушливых лет. Особенно чутко откликается на изменение количества осадков растительность пустынь и полупустынь. Достаточно на Севере средней температуре вырасти не более чем 1°C , как растительность Приаралья становится значительно беднее.

Рассмотрим возможные воздействия на климат катастрофических явлений на Земле (извержений вулканов, пожаров, ядерных взрывов).

Наиболее сильное извержение на памяти человечества — взрывы вулкана Тамбора в Индонезии в 1815 году. При этом на высоту тропопаузы (границы между тропосферой и стратосферой) было выброшено около 100 км^3 пыли. Частицы пыли размером менее 4 мкм могут находиться в атмосфере более года, поглощая солнечное излучение. Дошедшие рассказы очевидцев свидетельствуют не только о красивых закатах, но и необычно холодном и дождливом лете в Европе. Однако климатические изменения, связанные с этим явлением природы, вряд ли превосходили фоновые колебания климата.

Иная ситуация возникает при огромных пожарах. При этом в атмосферу попадет не только огромное количество пыли, но и сажи. При этом инициировать гигантский пожар может как природное явление, так и, скорее всего, человек. Не так давно во время конфликта между Ираком и Кувейтом возникли гигантские пожары на нефтяных приисках. Такой «спичкой» может быть ядерный взрыв.

В результате ядерного взрыва пожар может вспыхнуть не только в лесах, но и в городах, где плотность горючих материалов в 5–8 раз больше, чем в лесу. В случае ядерной войны даже при применении только 10% боевого ядерного потенциала в костер превратится 1 миллион квадратных километров леса. В результате этого в атмосферу будет выброшено около 4 миллиардов тонн сажи (примерно столько же по массе, сколько было выброшено

вулканом Тамбора). Однако это уже сажа, и она понизит количество энергии, поступающей к поверхности, по меньшей мере, в два раза. Более того, в этом случае облака сажи над городами будут много плотнее, чем над лесами. Углерод во много раз интенсивнее любой пыли поглощает солнечное излучение. Следовательно, нагревается и поднимается в стратосферу. Нагревает ее и увеличивает испарение окружающих облаков. То есть увеличивается количество осадков. (В Хиросиме и Нагасаки после ядерных взрывов шел черный дождь, однако сажа долго держалась в воздухе.)

Общее длительное (несколько месяцев) снижение температуры планеты может в результате этого составить 20–40°C. Отсюда и название — «ядерная зима». Это привело бы к исчезновению практически всех форм жизни, кроме насекомых.

Таким образом, неразумные действия политиков могут привести к таким глобальным последствиям, которые не способны вызвать ни одно локальное катастрофическое природное явление.

Процесс экономического развития является, по существу, процессом увеличения потребления энергии для обеспечения большей производительности и эффективности труда человека. Оценки показывают, что мировое потребление энергии на душу населения увеличивается с темпом 1,3% в год. Тогда при учете скорости роста населения суммарное увеличение потребления энергии составляет 3,4% в год. При этом 97% энергетических потребностей человечества удовлетворяется за счет сжигания ископаемого топлива. Выделение углекислого газа в атмосферу при этом составляет почти 20 миллиардов тонн. За счет этого обеспечивается рост концентрации CO_2 на 0,2% (причем это число экспоненциально возрастает). Примерно половина выделяемого CO_2 поглощается океаном. Оценки показывают, что с середины XIX века до начала XXI века концентрация CO_2 в атмосфере выросла на 31%.

Существует и еще один побочный эффект, связанный с использованием энергоресурсов, не зависящий от типа используемого топлива. В соответствии с законами термодинамики, вся используемая энергия, в конце концов, рас-

сеивается в виде тепла. Если энергоресурс отличается от естественной солнечной энергии, то это тепло будет выделяться в атмосферу, приводя к ее потеплению. Известно, что избыточный нагрев воды нарушает жизненный баланс водных организмов. Скопление тепловых отходов около городов приводит к образованию вокруг них «тепловых островов» со многими метеорологическими аномалиями.

Так, выход неиспользованной тепловой энергии в воздушный бассейн над Лос-Анджелесом, занимающим площадь более 6000 км², в 1972 году составлял 5% от общего притока солнечной энергии, поглощаемой этой поверхностью. В настоящее время в промышленных зонах выход избыточного тепла достигает 18% от потока солнечной энергии.

Если термальное загрязнение достигнет величины, заметной по сравнению с получаемой от Солнца и поглощаемой естественным образом Землей, оно сможет оказать весьма значительное влияние на глобальный климат планеты.

ВОПРОСЫ ДЛЯ САМОКОНТРОЛЯ

1. Какие глобальные эффекты влияют на климат Земли?
2. Объясните понятие «обратная связь». Приведите примеры известных вам обратных связей в природе и технике.
3. Круговорот каких веществ определяет основные условия формирования и поддержания климата?
4. Какова роль океана в формировании климата Земли?
5. Объясните понятие «парниковый эффект». В чем роль парникового эффекта для формирования климата Земли?
6. Проанализируйте график на рис. 21.1. Какие газы поглощают тепловое излучение Земли? В каких диапазонах длин волн поглощают излучение природный газ, вода, закись азота?
7. Почему мы считаем, что человек оказывает влияние на глобальный климат планеты? Парниковый эффект и человек. Какова связь?
8. Что мы понимаем под глобальным равновесием климата? Может ли быть нарушено это равновесие в результате деятельности человека?

БИОСФЕРА КАК ГЕОЛОГИЧЕСКАЯ ОБОЛОЧКА ЗЕМЛИ

Живое отличается от неживого. Культура древнего мира не признавала деления на живое и мертвое. С точки зрения древних (носящей название анимизма), все существующее в мире и доступное наблюдению представлялось живым. С накоплением опыта общения с природой наблюдения и экспериментирования сформировались представления о границе между живым и неживым.

Существует несколько подходов к определению признаков живого вещества. Один из них состоит в том, что живая материя имеет следующие признаки:

питание: пища необходима как источник нужных веществ, энергии и информации;

дыхание: является одним из источников химической энергии, относится к процессам обмена вещества и энергии;

выделение: способ выведения из организма продуктов обмена веществ;

подвижность и рост: движение в пространстве и движение внутри единиц жизни;

размножение: передача эстафеты жизни от одного поколения к другому;

раздражимость: реакция всех живых существ на изменения внешней и внутренней среды;

гомеостаз: способность поддержания внутреннего химического состава и протекания всех физиологических процессов при непрерывно изменяющихся внешних условиях; одно из ведущих отличий живого от неживого;

дискретность: жизнь проявляется в дискретных формах

В современном понимании **биология** — совокупность наук о живой природе, об огромном многообразии вымерших и ныне населяющих Землю живых существ, их строении и функциях, происхождении, распространении и развитии, связях друг с другом и с неживой природой.

Растения и животные существуют в тесной связи с окружающей неживой природой и другими организмами. В процессе исторического развития и естественного отбора на Земле сформировались группы организмов — сообщества, тесно связанные с определенными природными зонами и поясами. Они носят название *биом*.

Самый высокий уровень организации жизни на Земле — **биосфера**. Этот термин появился в конце XIX века и характеризует область активной жизни, охватывающую нижнюю часть атмосферы, гидросферу и верхнюю часть литосферы. В. И. Вернадский создал учение о биосфере как об активной оболочке Земли, в которой совокупная деятельность живых организмов, включая человека, является геохимическим фактором планетарного масштаба и значения. Он выделял в биосфере *косное* (солнечная энергия, почва и т. д.) и *биокосное* (органическое) вещества.

В атмосфере наиболее заселен слой толщиной до 50 метров. Вынос микроорганизмов на высоты более 15 км возможен конвекционными потоками. За верхнюю границу биосферы условно принимается озоновый слой (около 10–15 км), выше него мощный поток ультрафиолетового излучения убивает, вероятно, все живое. Однако исследования показывают, что защитить живые клетки от воздействия излучения и потоков ионизирующих частиц достаточно просто. Такую защиту может, в частности, обеспечить железный метеорит диаметром менее 6 мкм и стенками толщиной не более 0,1 мкм.

Нижняя граница распространения живых организмов в литосфере определяется температурой. По современным представлениям, они могут жить при температурах до 100°C (лекция 23). Обнаружение грибов в ядерных реакторах говорит о возможности живого переносить огромные потоки ионизирующего излучения. Известны организмы, не нуждающиеся в кислороде. Границы жизни определены весьма приблизительно (таблица 22.1).

Таблица 22.1

Средняя толщина биосферы, км

Широтные пояса	Континентальная область	Океаническая область
Полярный	12	13
Среднеширотный	14	15
Тропический	21	22

Наиболее всеобъемлющей является **биогеохимическая концепция биосферы**, сформулированная В. И. Вернадским. В этой концепции основу биосферы как геологической оболочки составляет *живое вещество, понимаемое как совокупность химических элементов, сосредоточенных во всех живых организмах, вместе взятых.*

Три основных биогеохимических принципа эволюции биосферы как целостного образования, сформулированные В. И. Вернадским, состоят в следующем.

Первый принцип вытекает из факта *устойчивости геологических процессов* в ходе исторического времени и состоит в том, что *биогенная миграция химических элементов в биосфере всегда стремится к максимальному значению.*

Вовлекая неорганическое вещество в биотический круговорот, живое способно со временем проникать в ранее недоступные области и увеличивать перерабатывающую активность. Освоение новых областей осуществляется за счет увеличения разнообразия форм живых организмов. Другим проявлением этого принципа можно считать постоянство среднего химического состава живого вещества с момента формирования по настоящее время, таким образом можно его назвать *правилом постоянства химической основы эволюционных процессов органического мира.*

Второй принцип связывает воедино эволюцию в целом биосферы и отдельных видов. Он состоит в том, что *эволюция видов, приводящая в ходе геологического развития к созданию форм жизни, устойчивых в биосфере, идет в направлении, увеличивающем биогенную миграцию составляющих биосферы.* Этот принцип задает *правило направ-*

ленности эволюционных изменений органического мира. Появление человека есть закономерный процесс, так как выделение его из животного мира связано с резким ростом процесса переработки окружающей среды.

Третий биогеохимический принцип основывается на геометрической прогрессии размножения живых организмов. В соответствии с ним *в течение всего геологического времени заселение планеты должно быть максимально возможным для всего живого вещества.*

Процесс заселения планеты есть одно из следствий геометрической прогрессии размножения живых организмов и размеров планеты. В. И. Вернадский предложил рассматривать скорость заселения земной поверхности тем или иным видом как характеристику его геохимической функции. Чем больше скорость заселения, тем сильнее вид перерабатывает окружающую среду. Учитывая исключительно высокие темпы размножения живых организмов, этот принцип можно интерпретировать как *правило полной заселенности Земли в любое геологическое время.*

Живые организмы характеризуются определенной массой. По оценкам, она близка к 5×10^{13} т. Существуют две противоположные точки зрения на вопрос о постоянстве этой массы.

Одна из них, базируясь на предположении о неизменности солнечной энергии, получаемой Землей, считает, что масса живого вещества постоянна (при возможных кратковременных, по геологическим масштабам, отклонениях). Другая утверждает, что масса живого вещества на Земле непрерывно возрастает. Этот процесс связывают с увеличением разнообразия жизни в ходе геологического времени.

По мнению В. И. Вернадского, для данного геологического периода количество живого вещества биосферы постоянно.

Живое вещество характеризуется огромной энергией, которая может быть использована для совершения работы. Это — солнечная энергия, превращенная в энергию химических связей в процессе фотосинтеза зеленых растений и распространяющаяся по поверхности Земли

благодаря способности живого регулировать проявления собственных процессов. Живое вещество оказывает непрерывное, постоянное воздействие на окружающий мир. Оценки показывают, что скорость распространения (распространения) живого вещества по поверхности меняется в зависимости от размеров организма и достигает 300 м/с для бактерий (близко к скорости звука в воздухе, звуковая волна способна переносить живое вещество).

Живое вещество производит на Земле непрерывную, непрекращающуюся ни на мгновение работу по переработке своего окружения, по его изменению.

Эта функция живого вещества ставит биосферу в особое положение в структуре геологических оболочек. В механизме формирования земной коры она выступает активным началом, изменяющим газовый состав атмосферы, минеральный состав литосферы, почву, гидросферу. Глобальные геохимические функции живого вещества осуществляются через питание (концентрационная функция), дыхание (газовая функция) и размножение (транспортная функция) особей всех видов живых организмов на всех этапах развития жизни на Земле.

Человек, являясь частью живого вещества, также участвует в реализации геохимической функции живого вещества.

ВОПРОСЫ ДЛЯ САМОПРОВЕРКИ

1. Что такое биосфера?
2. Какие признаки живого вам известны?
3. Поясните термин «гомеостаз».
4. В чем состоит геохимическая функция биосферы?
5. Перечислите основные характеристики живого вещества.
6. В чем состоит роль питания, размножения и дыхания в осуществлении геохимической функции живого вещества?

БИОСФЕРА КАК ЭКОЛОГИЧЕСКАЯ СИСТЕМА

Любое природное тело, процесс, явление могут быть представлены как совокупность взаимосвязанных и взаимозависимых частей, элементов, иначе говоря, — в виде системы. То есть организованность — важнейшее свойство окружающего нас мира, реализующееся в виде структурных различий составляющих частей. Эти различия проявляются в виде соподчиненных или структурных иерархических уровней.

В зависимости от выделяемых частей природный объект может быть представлен в виде физических, химических, биологических и иных систем. Однако представление природного объекта в виде какой-либо одной системы всегда неполно, отражает только отдельные его стороны.

Термин *экология* (от гр. *oikos* — жилище, место обитания, *logos* — наука) предложил Э. Геккель в 1866 году для обозначения науки, изучающей взаимоотношения животных с органической и неорганической средами. Возможны и иные определения понятия «экология». Вот некоторые из них. «Экология — наука, исследующая закономерности жизнедеятельности организмов (в любых ее проявлениях, на всех уровнях интеграции) в их естественной среде обитания с учетом изменений, вносимых в среду деятельностью человека». «В глобальной экологии центральное место заняло влияние совокупной человеческой деятельности на природу в целом и на ее отдельные элементы». «Экология — наука, изучающая взаимодействие организмов с окружающей средой».

Представление объекта в виде *экологической системы* возможно только при выполнении единственного условия — хотя бы одна из частей системы должна быть какой-либо формой живого. При этом не особенно важно, каковы характеристики живого. Это могут быть биомасса, количество видов, количество хлорофилла и т. п.

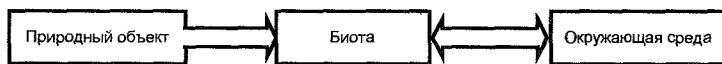
Принципиально только одно: и мир в целом, и отдельные образования рассматриваются как единство живого и неживого, его окружения. Живое является полноправным компонентом мироздания. В этом главная особенность и уникальность представления природных тел, процессов, явлений в виде экологической системы.

В самом общем виде под экологической системой следует понимать модель взаимосвязей между живыми организмами и неживой природой (окружающей средой).

При решении практических проблем выделение взаимосвязей между живыми организмами и окружающей средой, выбор показателей, характеризующих живое и среду, будет всегда свой для каждой конкретной задачи. Сколько задач — столько и экологических систем.

Поэтому биосфера как область распространения жизни, включающая наряду с живыми организмами и среду их обитания, является по определению экологической системой.

На основе общих представлений о живом и его окружении экологическая система, включающая любой природный объект, может быть представлена в виде:



Стрелки демонстрируют внутренние связи. Наполнение этих связей конкретным содержанием зависит от конкретной задачи.

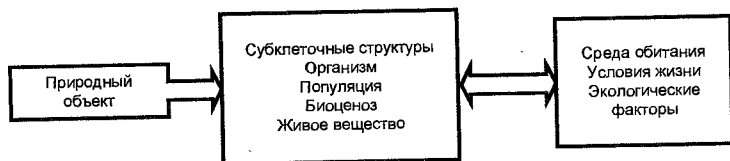
Можно выделить несколько наиболее часто используемых вариантов.

Биота представлена в виде всего органического мира и близка понятию «живое вещество». При этом понятно, что понятие «органический мир» шире, так как содержит все органические молекулы, в том числе и вне живого. Однако эта связь подчеркивает, что органические и

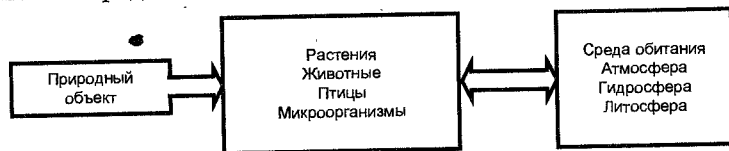
неорганические соединения сосуществуют в природе, обеспечивают существование друг друга, изменяются, переходя друг в друга.



Второй вариант связан с представлениями об уровнях организации живой материи. Главная проблема состоит в том, что нет однозначного мнения о разделении живой материи на некие уровни. Подходы могут быть многообразны и разносторонни.

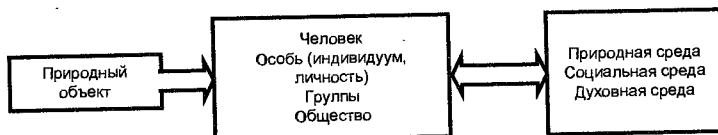


Следующий вариант может учитывать связь организмов со средой обитания.



Ясно, что в зависимости от среды обитания конкретных видов живого будут меняться их взаимоотношения с неживым, взаимное влияние будет иметь разные скорости, последствия.

Четвертый вариант имеет особое значение, так как в нем появляется человек. При этом взаимоотношения человека с окружающим миром сводятся не только к эксплуатации природы, но и к освоению ее наукой, философией, религией, искусством.



Рассмотрение человека как элемента биоты приводит к следующим заключениям:

1) какие бы сложные и запутанные ни были отношения человека с окружающим миром, все они, в конечном счете, экологические;

2) экологические проблемы составляют суть существования человека; они постоянны, непрерывны, сменяют друг друга.

При обсуждении проблемы взаимоотношений живых организмов с окружающей их средой применяются понятия: среда обитания, условия жизни, экологический фактор.

В термин **среда обитания** вкладывается три основных значения:

1) пространство, окружающее рассматриваемый объект, представленное в вещественной, энергетической, информационной формах;

2) природные тела и явления, с которыми живое находится в прямых или косвенных взаимоотношениях, взаимодействует прямо или косвенно;

3) совокупность физических (природных), природно-антропогенных (культурных ландшафтов, населенных мест и др.) и социальных воздействий на живые организмы.

Видно, что первое значение — наиболее общее, охватывающее все пространство, доступное данному живому объекту. Другие выступают как частные проявления пространства, окружающего и взаимодействующего с живым объектом.

Термин «среда обитания» характеризует состояние окружающей среды. Например, вода — среда обитания живых организмов, воздух — среда обитания живых организмов и т. д. В более широком смысле Земля — среда обитания живой материи.

С понятием **условия жизни** связан следующий шаг в детализации представлений об окружающей среде. Речь идет о функциональных особенностях окружающего пространства и направленности его действия. Это могут быть аэробные и анаэробные, почвенные, климатические, социальные, физические, химические, экстремальные, комфортные и прочие условия жизни.

Таблица 23.1

Температурный режим активной жизни на Земле, °C

Среда обитания	Максимум	Минимум	Годовой перепад
Суша	55	-70	125
Мировой океан	35,6	-3,3	38,9
Пресные воды	93	0	93

Так, например, та или иная среда обитания обеспечивает разные условия жизни. В таблице 23.1 приведены диапазоны активной жизни в разных средах (обеспечиваемые природными факторами). Верхним пределом жизни являются, по-видимому, температуры 50–60°C, при которых разрушаются ферменты и свертываются белки (кроме упомянутых выше случаев микроорганизмов). Однако известны водоросли, живущие в горячих (до 80°C) источниках. В горячих источниках Калифорнии живет один вид рыб (температура 52°C).

Когда речь идет о понятии *экологический фактор*, необходимо сначала определить и понятие «фактор». Под этим понимается причина, движущая сила какого-либо процесса, явления, определяющая его характер или отдельные черты. Так, под известным понятием *фактор риска* в медицине понимается причина, способствующая развитию того или иного заболевания (курение — фактор риска по отношению к раку).

Связь тех или иных последствий взаимного влияния живой и неживой природы вряд ли может быть однозначна. Результаты, скорее, связаны вероятностным образом. Особенно — при слабых взаимных воздействиях. Существует специальный термин для описания таких связей — *корреляция* — указывающий на то, что те или иные параметры каким-то образом связаны друг с другом, однако эта зависимость не может быть точно установлена.

Так, например, говорят о связи курения с заболеванием раком, однако эта страшная болезнь наблюдается и у людей, никогда не куривших. И в то же время многие заядлые курильщики никогда не болели этой болезнью. Можно утверждать только одно — вероятность заболевания раком легких у курильщиков выше. Наблюдается

корреляция «курение—рак». Точной зависимости нет. Это и понятно: слишком сложные процессы лежат в основе.

Говоря об экологическом факторе, мы устанавливаем влияние окружающей среды на живые организмы, влияние климата на распространение растительности. И, наоборот, мы говорили о влиянии леса на климатические процессы.

Эти связи могут иметь периодические колебания. Отклик живого на изменения в неживом и обратно имеет *нелинейный характер*. Последнее означает, что, например, при слабых изменениях внешней среды живое может никак не откликаться на них. Однако при накоплении изменений могут произойти взрывные перестройки.

Анализ многообразия факторов позволяет относительно четко разделить их на три группы: абиотические, биотические и антропоические.

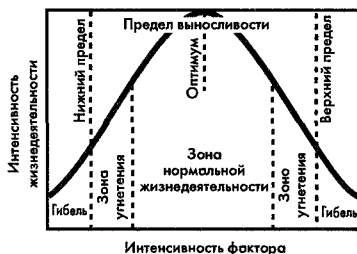
Абиотические факторы — комплекс условий неорганической среды, влияющих на организм. Они делятся на химические (состав атмосферы, вод, почвы и т. п.) и физические (давление, влажность, ветер, радиация, температура и т. п.).

Биотические факторы — совокупность влияния жизнедеятельности одних организмов на другие. При этом такие факторы влияют и на неживую природу. Так, бактерии изменяют состав почвы. Известняки формируются из скелетов умерших животных.

Антропоические факторы — совокупность воздействия деятельности человека на органический и неорганический мир. Уже фактом своего существования люди оказывают заметное влияние на окружающую среду. Например, в процессе дыхания в атмосферу ежегодно поступает $1,1 \times 10^{12}$ кг углекислого газа. Годовая потребность человечества в пище оценивается в 10^{16} Дж. Огромное влияние оказывает производственная деятельность человека. Значение этих факторов непрерывно возрастает.

Эффект воздействия экологических факторов зависит не только от их характера, но и от интенсивности. Чем больше интенсивность фактора отличается от оптимальной, тем сильнее угнетается жизнедеятельность организ-

Рис. 23.1
Связь
между интенсивностью
фактора и интенсивностью
жизнедеятельности



ма. Границы, за которыми существование организма невозможно, называются пределами выносливости (рис. 23.1).

Экологическая пластичность организмов проявляется в свойстве адаптации к тому или иному диапазону факторов среды. Чем шире диапазон колебаний экологического фактора, в пределах которого данный вид может существовать, тем больше его экологическая пластичность, шире диапазон выносливости.

Поскольку все факторы взаимосвязаны и среди них нет абсолютно безразличных для любого организма, каждая популяция и вид в целом реагируют на эти факторы, но воспринимают их по-разному. Такая избирательность обуславливает и избирательное отношение организмов к заселению той или иной территории. Фактор, препятствующий распространению одних видов, может быть благоприятен для других. Причем это приспособление происходит относительно независимым для каждого вида путем.

ВОПРОСЫ ДЛЯ САМОПРОВЕРКИ

1. Проанализируйте приведенные определения понятия «экология».
2. Определите понятие «среда обитания». Приведите примеры.
3. Как связаны среда обитания и условия жизни?
4. Что мы понимаем под термином «фактор риска»? Приведите примеры.
5. Чем обеспечивается экологическая пластичность живых организмов?

ЭНЕРГИЯ В ЭКОЛОГИЧЕСКОЙ СИСТЕМЕ

Баланс солнечной энергии на Земле. На каждый квадратный метр поверхности Земли от Солнца каждую секунду приходит энергия 1370 Дж (лекция 13). Эта энергия неравномерно распределена по спектральному диапазону (рис. 11.1).

Учитывая поглощение излучения атмосферой, можно сказать, что около дошедшего до Земли излучения 10% приходится на коротковолновый (ультрафиолетовый) диапазон, 45% — на видимую часть спектра, 45% — на инфракрасный диапазон. Ультрафиолетовое излучение с длиной волны менее 0,3 мкм практически полностью поглощается озоновым слоем.

Земля отражает часть падающей солнечной энергии. Мера этого (*альбедо*) определяется через отношение падающей и отраженной энергии. Величина альбедо зависит от характера поверхности. Чистый сухой снег отражает 90–95% падающей энергии (поэтому в горах крайне опасно находиться без солнечных очков, человек может ослепнуть — снежная слепота); сырой снег — 40–45%; сплошной поверхностный покров — 10–25%.

В среднем 30% энергии Солнца отражается, 69% идет на нагрев поверхности Земли и испарение воды, 0,2% тратится на механическую работу волн, течений, ветра и лишь 0,8% поступает в живую природу через *фотосинтез* — процесс образования (при участии энергии солнечного излучения) клетками высших растений, водорослей и некоторыми бактериями органических веществ. Основная энергия поступает в неживую природу.

При этом только около 1% падающей на растение солнечной энергии превращается в потенциальную энергию химических связей синтезированных органических веществ. Более половины этой энергии расходуется на обеспечение жизни самих растений и т. д.

Мы не будем рассматривать биохимические циклы, приводящие к этому. Для характеристик этих процессов на макроскопическом уровне можно использовать понятие *продуктивности* (скорости образования органического вещества на единицу площади или объема) живых организмов.

По оценкам, средняя чистая (за вычетом расходов на собственные нужды) продуктивность одного квадратного метра Земли составляет 0,3 кг в год. Это очень мало. При этом до 75% полной (валовой) продуктивности в высоких широтах и 40% — в низких широтах переходит в чистую продуктивность. То есть в высоких широтах эффективность фотосинтеза выше!

Низкая продуктивность биосферы есть проявление общесистемного правила — *энергетическая стоимость поддержания структуры зависит от ее размеров*. Чем больше и сложнее система, тем больше энергии необходимо тратить на внутренние потребности самой системы (дыхание, движение, поддержание температуры и т. п.). Иначе — тем меньше чистая продукция, избыточная по отношению к необходимым внутренним расходам.

Ограничителем роста системы является соотношение прихода и расхода энергии. Когда они равны, рост системы прекращается. Количество живого вещества, поддерживаемое в этих условиях, называется *максимальной емкостью среды*. По экспертным оценкам, оптимальная емкость, способная сохраняться длительное время, должна быть не более половины максимальной.

Замкнутые пути, по которым циркулируют химические элементы, носят название биогеохимических круговоротов или циклов. Только два химических элемента покидают Землю — водород и гелий. Остальные остаются в сфере влияния Земли и полностью участвуют в биогеохимических циклах.

Каждый круговорот состоит из двух основных частей.

Первая содержит сосредоточенный в геологических оболочках запас химических элементов, подверженный медленным превращениям и переходам из одних форм в другие.

Вторая — запас, находящийся в живой природе, участвующий в относительно быстрых превращениях органического мира.

Любой круговорот имеет три основных показателя: скорость (количество вещества, входящего или выходящего из цикла в единицу времени), время оборота (необходимое для полной смены всего вещества, вовлеченного в цикл), коэффициент рециркуляции (отношение возвращаемой доли по отношению к общему количеству вещества, вовлеченного в цикл).

По разным оценкам, гидросфера обновляется за период от 3000 до 2 миллионов лет, земные воды — за 5000 лет, почвенная влага — за 1 год. Углекислый газ совершает круговорот за 300 лет. Кислород оборачивается за 2000 лет.

Скорость оборота для леса может быть определена, например, по отношению сухого вещества подстилки к сухой массе опавших растений. Так, для заболоченных лесов это отношение равно 50, тундры — больше 20, тайги — до 20, степи — до 2, субтропиков — до 1, саванны — до 0,2, тропических лесов — не более 0,1. Исключительно быстрый круговорот в тропических лесах приводит к тому, что в почвах практически не происходит накопления органического вещества. Достаточно убрать лес — образуется пустыня.

Энергия Солнца используется только один раз. Она связывается зелеными растениями и далее циркулирует по пищевым цепям, проходя через травоядных, хищников и деструкторов (микроорганизмы, грибы и т. п., питающиеся мертвым органическим веществом).

В конце концов энергия Солнца высвобождается в виде тепла. Чем длиннее пищевые цепи, тем дольше солнечная энергия пребывает в структуре оборота живого вещества. Пищевые цепи не могут быть длинными, так как с одного звена на другое переходит не более 10% массы вещества, вовлеченного в кругооборот.

В любой пищевой цепи только часть энергии используется на накопление биомассы. Поэтому биомасса предшествующего звена всегда больше, чем следующего. В противном случае исчезли бы ресурсы для развития живой материи.

Данное явление было изучено Ч. Элтоном и носит название пирамиды Элтона. Пример такой пирамиды продемонстрирован модельным расчетом.

Пусть имеется поле люцерны площадью 4 га. На этом поле пасутся телята (и едят только люцерну), а телятиной питается 12-летний мальчик. Оценки показывают, что люцерна использует только 0,24% падающей на поле солнечной энергии, не более 8% которой приходится на телят. Всего 0,7% энергии накопленной телятами, расходуется на рост и развитие ребенка с 12 до 13 лет.

Правило пирамиды универсально и объективно отражает круговорот веществ и энергии в биосфере.

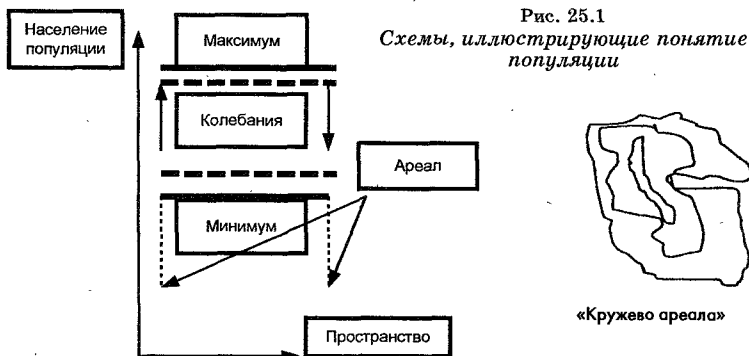
ВОПРОСЫ ДЛЯ САМОПРОВЕРКИ

1. Опишите баланс солнечной энергии на Земле.
2. Проанализируйте биогеохимический кругооборот на вашем садовом участке.
3. Почему интенсивная вырубка лесов в районе Амазонки может привести к глобальной экологической катастрофе?
4. Что такое «пищевая цепь»? Поясните понятие «пищевая пирамида». Постройте пищевую пирамиду с участием человека.

БИОЦЕНОЗ. БИОГЕОЦЕНОЗ

Исходным элементом для надорганизменного уровня организации живой материи является совокупность организмов (особей) одного вида с единым генофондом, занимающих определенную территорию, — **популяция** (фр. *population* — население).

Термин введен в 1903 году датским генетиком В. Иогансенем. Все живое существует в популяциях. Согласно правилу, сформулированному С. С. Четвериковым, любые виды живого объединены в популяции. У каждой из них есть свои количественные границы — минимальная и максимальная численности, пределы воспроизводства. Место жизнедеятельности популяции получило название ареала (лат. *area* — площадь, пространство). Границы ареала подвижны и причудливы по форме — ленточные, островные, диффузные. Существует термин «кружево ареала».



Совокупность популяций, живущих на единой территории, носит название **биоценоза** (гр. *bios* — жизнь, *koinos* — общий). Это понятие введено в 1877 году немецким биологом К. Мебиусом. Биоценоз является закрытой системой для чуждых популяций и открытой — для своих. Между последними устанавливаются разнообразные отношения — антагонизма, конкуренции, кооперации и паразитизма (рис. 25.2).

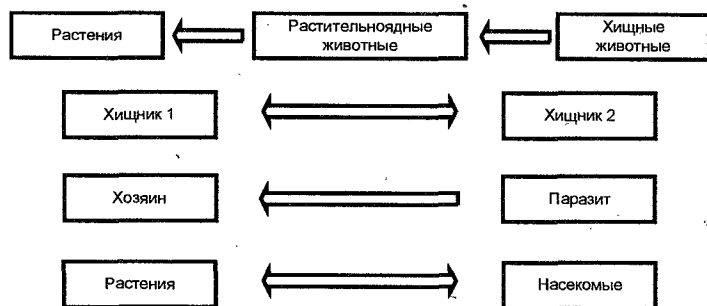


Рис. 25.2

Схемы, иллюстрирующие отношения внутри биоценоза: антагонизм (а), конкуренцию (б), паразитизм (в) и кооперацию (г)

Ясно, что биоценоз неотъемлем от окружающей его неживой природы, косной среды. Для обозначения этого единства биоценоза с неживой природой В. Н. Сукачевым в 1940 году было предложено понятие **биогеоценоза**. Под косной средой, по Вернадскому, понимается вещество, поле и энергия. В зависимости от их переработки и усвоения выделяют три вида биологических образований (рис. 25.3):

продуценты — водоросли, микроорганизмы, растения, непосредственно перерабатывающие косную материю;

консументы — растительноядные животные, для переработки использующие продуценты;

редуценты — хищники, паразиты, живущие за счет консументов.



Рис. 25.3

Круговорот вещества в биогеоценозе

Через эти три уровня проходит круговорот вещества, то есть при прямом и непосредственном участии жизни идет использование, переработка и восстановление вещественных структур, иначе — биогенная миграция атомов.

Отметим, что круговорота энергии в биогеоценозе нет. Это и понятно, энергия перерабатывается в тепло, распределяющееся в пространстве. С предшествующего уровня на последующий переходит только 10% энергии.

Эколог Ю. Одум выделил следующие основные биоценозы (таблица 25.1).

1. Моря. Огромные, наиболее густо, но неравномерно заселенные биогеоценозы.

2. Эстуарии (устья рек или заливы) и морские побережья. Полоса разнообразных биогеоценозов, лежащая между морями и континентами. Эта своеобразная переходная зона кишит жизнью. Основные особенности — интенсивная циркуляция питательных веществ, разнообразие растительных организмов и животных.

3. Ручьи и реки. Особые биогеоценозы пресных проточных вод. Эти биогеоценозы наиболее полно используются человеком.

4. Озера и пруды. Водоемы со стоячей пресной (и соленой) водой. Видовое разнообразие невелико.

5. Пресноводные болота. Характеризуются колебаниями уровня пресной воды. Если эти колебания значительны, то по своим возможностям они приближаются

Таблица 25.1

Некоторые характеристики
наземных биогеоценозов (экосистем)

Биогеоценоз (экосистема)	Площадь		Продук- тивность, т/га	Количес- тво энергии, 10 ¹⁴ Дж
	млн. км ²	%		
Леса	41	28	7	48
Обрабатываемые земли	15	10	6	15
Степи и луга	26	17	1,5	18
Пустыни	54	36	1	9
Полярные зоны	13	9	0	—
Итого	149	100		90

к эстуариям или заливам. В случае их отсутствия вытесняются древесной растительностью.

6. Пустыни. Биогеоценозы, формирующиеся в районах, где в год выпадает менее 250 мм осадков, а также в областях с очень жарким климатом и редко выпадающими осадками.

7. Тундра. Занимает положение между лесами и Ледовитым океаном, а так же в высокогорье.

8. Травянистые ландшафты. Степные биогеоценозы, формирующиеся в областях, где среднегодовое выпадение осадков лежит в пределах от 250 до 750 мм.

9. Леса. Биогеоценозы, являющиеся вторым по продуктивности, биомассе и роли в биологической регуляции на планете после морей.

Термин **вид** и понятие вида относятся к широкому кругу наук. Вид есть выражение одинаковой сущности у группы отдельных предметов (или явлений).

Определение *биологического вида* как особого явления органической природы дал в 1686 году ботаник Дж. Рей. Вид является совокупностью практически тождественных друг другу организмов, способных оставлять потомство. Еще тогда были установлены три существенные черты, присущие биологическому виду:

1) вид представлен множеством особей (организмов);
2) организмы сходны морфологически (по внешнему облику) и физиологически (по характеру обмена веществ и других функций);

3) вид самовоспроизводится в природе.

В наше время к этим существенным чертам добавлены:

- устойчивость (по отношению к внешним воздействиям);
- дискретность (в отличиях одного вида от другого);
- историчность (можно проследить развитие вида);
- экологическая и географическая определенность (виды имеют свое определенное место в биогеоценозе);
- целостность (черта, близкая к дискретности, каждый вид существенно отличается от другого, отличия внутри вида несущественны).

Внутри вида существуют свои структуры. Примером этого могут быть, в частности, популяции. Появление

нового вида связано с эволюционными изменениями. Одни виды существуют непродолжительное время и исчезают. Другие живут достаточно долго и претерпевают незначительные изменения, направленные на приспособление к изменениям окружающей среды, третьи способны дать начало новым видам.

Новая видовая форма может возникнуть по множеству причин: как результат отдаленной (межвидовой) гибридизации; на основе полиплоидии в сочетании с отдаленной гибридизацией; в результате хромосомных аберраций, уродств, симбиоза.

Судьба возникшей видовой формы зависит от направления и интенсивности отбора. Выделяют несколько видов отбора: направленный (благоприятствующий формированию новой видовой формы); стабилизирующий (поддерживающий сложившуюся ситуацию); разрывающий (формирующий устойчивую популяцию, отличную от родительской).

Еще одной составляющей процесса появления нового вида является изоляция возникшей тем или иным способом видовой формы. Известны два основных типа изоляции: пространственная, являющаяся следствием физической непреодолимости географических пространств, физико-химических и иных условий, и репродуктивная. Репродуктивная изоляция может быть абсолютной, вызванной несовпадением генетических систем, и относительной.

В последнем случае размножение невозможно по разным причинам — различное поведение, сроки размножения, размеры и структура организма.

После выделения новой видовой формы и становления нового вида наступает период устойчивости вида, и он занимает определенное положение в природе.

Главный элемент эволюции — популяция. Многооб-

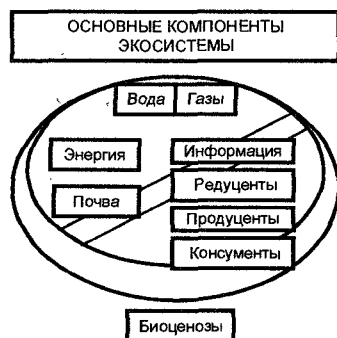


Рис. 25.4

Основные компоненты
экологической системы

разие случайных изменений и многообразие особей в популяции, их поколений, делают естественный отбор статистической закономерностью.

Зеленый краб в год приносит 4 миллиона яиц, гриб-дождевик — 700 миллиардов спор. Но число особей в популяции примерно постоянно. То есть в самой популяции отбираются особи, наиболее устойчивые в данных условиях.

На рис. 25.4. показаны основные элементы экологической системы. Все составляющие уже были упомянуты нами, кроме одного — *информации*. Существование экологической системы возможно только при наличии потока информации, пронизывающего как живую, так и косную составляющие. Без непрерывного потока информации экологическая система существовать не может.

ВОПРОСЫ ДЛЯ САМОПРОВЕРКИ

1. Определите понятия популяции, биоценоза, биогеоценоза. В чем общность и различие этих понятий?
2. Что такое «биологический вид»? Какое понятие шире — вид или популяция?
3. Какие причины могут привести к возникновению нового вида? Популяции?
5. Какова роль информации в существовании экологической системы?

ПРЕДПОСЫЛКИ ВОЗНИКНОВЕНИЯ НА ЗЕМЛЕ ОРГАНИЧЕСКОГО ВЕЩЕСТВА

Рассматривая проблему возникновения жизни, выделяют три основных этапа предположительного перехода от «неживого» к «живому»:

1) синтез исходных органических соединений из неорганических веществ в условиях первичной атмосферы и состояния поверхности Земли;

2) формирование в первичных водоемах Земли из накопившихся органических соединений биополимеров, углеводов, липоидов;

3) самоорганизация сложных органических соединений, возникновение на их основе и эволюционное совершенствование процессов обмена веществ и воспроизводства органических структур данного состава, завершающееся образованием простейшей клетки.

Не все ясно с первыми двумя этапами, а в отношении третьего признаки прояснения появились только в последние годы.

Существующие сегодня представления о происхождении жизни тесно связаны с результатами изучения геологической эволюции.

Примитивная атмосфера Земли была восстановительной, т. е. освобождающей кислород из кислородных соединений. Восстановителем был водород — главный элемент Вселенной.

По оценкам, в первичной атмосфере Земли парциальное давление водорода составляло 0,002%. Это достаточно высокое значение. Другими компонентами атмосферы были аммиак NH_3 и вода. Кроме того, по оптическим

спектрам в межзвездном пространстве обнаружены формальдегид HCHO и некоторые более сложные органические соединения.

Современная атмосфера, в отличие от первичной, содержит большое количество кислорода. Он мог возникнуть двумя путями: в результате разложения воды под действием ультрафиолетового излучения Солнца либо в результате фотосинтеза зеленых растений.

Сегодня принято считать, что атмосферный кислород имеет фотосинтетическое происхождение. То есть кислород в сегодняшней концентрации появился только после зарождения жизни.

Следовательно, растения (жизнь) должны были возникнуть на земле в восстановительной атмосфере. И это понятно — кислород просто окислял бы те химические соединения, из которых могли возникнуть биологические макромолекулы.

Дополнительным аргументом в пользу возникновения первичных органических соединений в восстановительной атмосфере служит существование анаэробных бактерий.

Органические соединения могли возникнуть в восстановительных условиях при наличии источников энергии, имеющих разную природу (см. табл. 26.1). То есть на первом этапе в насыщенной водородом и аммиаком атмосфере создавались условия для первичного синтеза сложных органических соединений.

На втором этапе возникла и развилась химическая эволюция особого типа. Органические вещества, образовавшиеся на первом этапе, скапливались в сравнительно неглубоких местах первичных водоемов, прогреваемых Солнцем. Солнечное излучение, приходящее на поверхность Земли, имело значительную ультрафиолетовую компоненту (поглощаемую сегодня озоновым слоем, возникшим позже вместе с кислородной атмосферой). Это излучение обеспечивает энергией протекание химических реакций и в то же время разрушает сложные органические соединения.

То есть накопление таких соединений возможно только в динамике и при наличии условий, обеспечивающих

Т а б л и ц а 26.1

**Вероятные источники энергии
первичной химической эволюции**

<i>Источник энергии</i>	<i>Величина доступной энергии в год, тысяч Дж/м²</i>
Солнечная радиация	10 900 000
В том числе ультрафиолетовое излучение	от 119 000 (длина волны 300 нм) до 650 (длина волны менее 150 нм)
Коронные разряды	126
Молнии	42
Естественная радиоактивность Земли	117
Ударные волны в космосе и акустические волны в атмосфере	46
Солнечный ветер и космическое излучение (корпускулярные потоки)	8
Вулканическое тепло	6

защиту от быстрого распада под действием ультрафиолета. Отметим, что эти условия можно реализовать только локально, в неких особых, случайных точках. Именно поэтому важна не только мощность потока энергии, но и многообразие источников. Условия формирования сложных органических соединений крайне далеки от равновесия и порождены случаем.

Так, одна из моделей первичного образования сложных органических соединений состоит в следующем.

Ранняя Земля была относительно холодным телом с разреженной восстановительной атмосферой (лекция 21), состоящей из смеси метана, аммиака, паров воды при общем давлении не более 10 мм рт. ст. Температура поверхности не превышала -50°C , то есть литосфера была покрыта слоем льда. Поток солнечного излучения, особенно — ультрафиолетовая часть, а также космическое излучение приводили к ионизации атмосферы, и она находилась в так называемом состоянии *холодной плазмы*. В этом состоянии сосуществуют ионизированные атомы, ионы и электроны, однако их энергии достаточно малы.

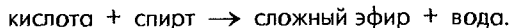
Подобную холодную плазму мы наблюдаем в газоразрядных трубках, лампах дневного света, бактерицидных лампах. Именно этот ионизированный газ и был основным источником энергии для поддержания химической эволюции органического вещества.

В ионизированном газе легко возбудить электрические разряды. Опыты показали, что из достаточно простых соединений углерода, кислорода, азота и т. п. в условиях электрического разряда быстро образуется многообразие сложных органических соединений.

Низкая температура поверхности и малая энергия частиц создавали условия для успешного протекания полимеризации ряда образовавшихся соединений. Рост массы этих полимеров приводил к их конденсации и выпадению на ледяной покров. Там они сохранялись «до лучших времен».

Радиоактивный разогрев недр Земли пробудил тектоническую деятельность. Выделение газов уплотнило атмосферу, ее нижние слои перестали быть доступными для ионизирующего ультрафиолетового излучения Солнца и высокоэнергетических космических частиц. Началось повышение температуры поверхности и образование первичных водоемов. Тут-то и проявились сложные органические соединения: макромолекулы (биополимеры), липиды, углеводы.

Липиды — сложные эфиры жирных кислот и какого-либо спирта. Сложным эфиром выступает продукт реакции между кислотой и спиртом:



Липиды образуются из жирных кислот с формулой $\text{R}-\text{COOH}$, где R — атом водорода или особый радикал типа $-\text{CH}_3$, $-\text{C}_2\text{H}_5$ и др. (см. рис. 26.1).

Углеводы (сахариды) — вещества с общей формулой $\text{C}_x(\text{H}_2\text{O})_y$, где x и y могут иметь разные значения. Многие углеводы легко окисляются и являются мощными восстановителями. Углеводы делятся на три группы — моносахариды, дисахариды и полисахариды. Моносахариды — это простые сахара, имеющие формулу $(\text{CH}_2\text{O})_n$, n может изменяться от 3 до 9. Они являются источником

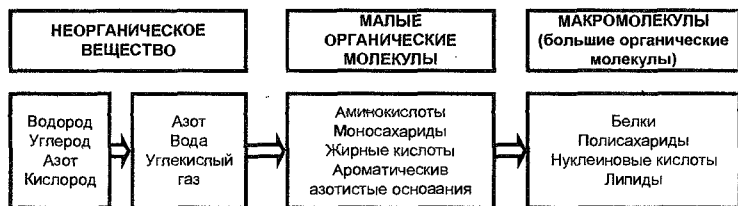


Рис. 26.1

Условная схема образования больших органических молекул, составляющих основу живых объектов

энергии и благодаря высокой химической активности и структурному разнообразию играют роль строительных блоков для синтеза более крупных молекул. Наиболее распространенные формы моносахаридов — глюкоза, галактоза и фруктоза ($C_6H_{12}O_6$). Дисахариды образуются путем соединения двух моносахаридов. Среди дисахаридов широко распространены мальтоза (глюкоза + глюкоза), лактоза (глюкоза + галактоза) и сахароза (глюкоза + фруктоза).

Полисахариды как соединения многих моносахаридов играют роль резерва энергии и строительного материала (целлюлоза). Их типичные формы — крахмал, гликоген, целлюлоза, каллоза, инулин.

Переход этих соединений в раствор резко ускорил процесс формирования более сложных соединений. Как показали эксперименты, в процессе размораживания липиды претерпевают самосборку, образуя в водоеме стабильные микросферы диаметром от 10 до 50 мкм. Такие сферы получили название коацерватных (от лат. coacervatio — накопление) капель (впервые их наблюдал А. И. Опарин, придавая важнейшее значение в переходе от неживой природы к предшественнице живой клетки). Вероятно, самосборка липидных оболочек заключенными в них биополимерами — важный шаг

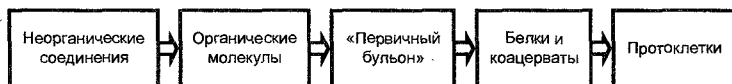


Рис. 26.2

Схема А. И. Опарина, иллюстрирующая образование протоклеток из неорганических соединений

в переходе от химических смесей к организованным системам. Именно во внутренних полостях капель, куда могли попадать только избранные молекулы, началась эволюция от химических реакций к биохимическим (рис. 26.2).

В описанном сценарии перехода от сложных органических веществ к простым живым организмам существует много белых пятен. Здесь нет даже намека на то, как возникла способность к самовоспроизведению. Но, несмотря на это, рассмотренная гипотеза остается одним из самых перспективных направлений исследований формирования жизни.

Жизнь на суше Земли началась 2,6 миллиарда лет назад, т. е. на 1,4 миллиарда лет раньше, чем ученые думали до сих пор. Уже давно известно, что первые микроорганизмы в океане появились свыше 3,8 миллиардов лет тому назад, однако время выхода жизни на сушу до сих пор оценивалось как 1,2 миллиарда лет, согласно возрасту ископаемых останков органической жизни, обнаруженных в Аризоне (США). Недавно ученым из Южной Африки и США удалось обнаружить органические останки в горных породах возрастом около 2,6 миллиардов лет. Информация о точном времени выхода жизни на сушу очень важна для ученых, так как позволяет судить о времени важнейших событий в жизни Земли — формировании защитного озонового экрана и наличии в атмосфере кислорода.

Существует достаточно много моделей «добиологической» эволюции. Однако все они являются только первыми шагами на пути познания. Академик Б. С. Соколов по этому поводу сказал следующее: «Путь, который прошел органический мир от бактерии до нас с вами, более прост, чем путь, который связал сложные, но предбиологические молекулы с биологической эволюцией, формированием первых самовоспроизводящихся прокариот (клетки без оформленного ядра. — А. Б.)...».

В какой-то период развития Земли химическая эволюция перешла в биологическую. Вся суть проблемы в промежуточном звене между двумя эволюционными линиями.

Роль катализаторов. Катализаторы — вещества, ускоряющие химические реакции, не участвуя в них сами. Одна из гипотез химической эволюции состоит в том, что в геологическом прошлом шли реакции с отбором и закреплением тех каталитических центров, которые обладали самой высокой активностью. Менее активные быстро сходили со сферы химической эволюции.

ВОПРОСЫ ДЛЯ САМОПРОВЕРКИ

1. Как связаны проблема возникновения жизни и геологическая эволюция?
 2. Каковы вероятные причины и источники возникновения сложных органических соединений?
 3. Какую роль в возникновении сложных органических соединений могли играть катализаторы?
-

ЛИТЕРАТУРА

Достаточно сложно предложить студентам список литературы, который они могли бы использовать при изучении курса «Современные концепции естествознания». Это и популярные журналы, и серьезные монографии, и учебники по физике, химии, биологии, астрономии, геологии и не только. Это могут быть книги по философии, истории, филологии, экономике. Ведь естествознание пронизывает все сферы деятельности человека.

Ниже приведены те книги и статьи, идеи и выдержки из которых использованы автором.

К первой группе относятся серьезные, объемные и хорошо написанные учебники:

Гуляев С. А., Жуковский В. М., Комов С. В. Основы естествознания. Екатеринбург: УралЭкоЦентр, 2000. 560 с.

Дубнищева Т. Я. Концепции современного естествознания. Новосибирск: ЮКЭА, 1997. 832 с.

Это, скорее, хрестоматии, книги для чтения, содержащие большой объем разносторонней информации.

Книги второй группы можно смело отнести к учебникам, содержание которых в целом соответствует программе курса и изложено в сжатой форме:

Концепции современного естествознания / Под. ред. С. М. Самыгина. Ростов-на-Дону: Феникс, 1997. 448 с. (Учебники и учебные пособия).

Горбачев В. В. Концепции современного естествознания. М.: МГУП, 2000.

Карпенков С. Х. Основные концепции естествознания. М.: Культура и спорт, ЮНИТИ, 1998. 208 с.

- Кузнецов В. И., Идлис Г. М., Гутина В. Н. Естествознание. Москва: Агар, 1996. 384 с.
- Юрлов В. Ф. Концепции современного естествознания. Киров: ВГПУ, 1997. 253 с.

Особое внимание хотелось бы обратить на книгу по естествознанию, написанную филологом:

- Гачев Г. Книга удивлений, или Естествознание глазами гуманитария, или Образы в науке. М.: Педагогика, 1991.

При написании курса лекций использованы и многие другие книги и статьи, материалы оригинальных исследований, опубликованные в научных журналах. Основные из них:

- Азимов А. Язык науки. М.: Мир, 1985.
- Бела М. Л., Левадный В. Г. Молекулярная структура воды. М.: Знание, 1987.
- Богатырева Н. А., Леоненко Е. И. Химия Земли и экология. М.: МГУ, 1997.
- Вайскопф В. Наука и удивительное. М., 1965.
- Гачев Г. Д. Воображение и мышление. М.: Вуз. книга, 1999. (Библиотечка Гачева Г. Д.).
- Гротендик А. Урожаи и посевы. Ижевск: Изд. дом «Удмуртский университет», 1999.
- Гумилев Л. Н. От Руси до России. М.: Айрис-Пресс, 2000.
- Гумилев Л. Н. Этносфера и биосфера Земли. М.: Рольф, 2001.
- Жиков В. В. Фракталы // Соросовский образовательный журнал. 1996. № 12.
- Ирхин В. Ю., Кацнельсон М. И. Уставы небес. 16 глав о науке и вере. Екатеринбург: У-Фактория, 2000.
- Калица С. П. Сколько людей жило, живет и будет жить на Земле. Очерк теории роста человечества. М., 1999.
- Карери Дж. Порядок и беспорядок в структуре материи. М.: Мир, 1985.
- Климонтович Ю. Л. Введение в физику открытых систем // Соросовский образовательный журнал. 1996. № 8.
- Комов С. В. Введение в экологию. Десять общедоступных лекций. Екатеринбург: УрГУ, 2001.
- Линдлер Г. Картины современной физики. М.: Мир, 1977.
- Липсон Г. Великие эксперименты в физике. М.: Мир, 1972.
- Медоуз Д. Х., Медоуз Д. Л., Рэндерс Й., Беренс Ш. Пределы роста: Доклад по проекту Римского клуба «Сложное положение человечества». 2-е изд. М.: МГУ, 1991.
- Моисеев Н. Н. Алгоритмы развития. М.: Наука, 1987.
- Некрасов Б. В. Основы общей химии. М.: Химия, 1969.
- Николис Г., Пригожин И. Самоорганизация в неравновесных системах. М.: Мир, 1979.

- Петрова В. Т. О строгости изложения математических курсов // Вестник РУДН. Сер. Фундаментальное естественнонаучное образование. 1996. № 2.
- Пригожин И. От существующего к возникающему. М.: Наука, 1985.
- Пригожин И. Конец определенности. Время, хаос и новые законы природы. Ижевск: Ижевская республиканская типография, 1999.
- Радкевич В. А. Экология. Минск: Выш. шк., 1997.
- Слоу Ч. П. Портреты и размышления. М.: Прогресс, 1985.
- Струве О., Линдс Б., Пилланс Э. Элементарная астрономия. М.: Наука, 1967.
- Тригг Дж. Решающие эксперименты в современной физике. М.: Мир, 1974.
- Физика микромира. М.: Сов. энциклопедия, 1980.
- Черепашук А. М. Гравитационное микролинизирование и проблема скрытой массы // СОЖ. 1998. № 3.
- Шипунов Ф. Я. Организованность биосферы. М.: Наука, 1980.
- Шкловский И. С. Вселенная, жизнь, разум. М.: Наука, 1988.
- Шредингер Э. Что такое жизнь. Физический аспект живой клетки. Ижевск: Ижевская республиканская типография, 1999.
- Фелленберг Г. Загрязнение природной среды. Введение в экологическую химию. М.: Мир, 1997.
- Обелинг В. Образование структур при необратимых процессах. М.: Мир, 1979.
- Zeh H. D. The Physical Basis of the Direction of Time. Springer-Verl., 1989, VIII, 166.

СОДЕРЖАНИЕ

Введение	5
Лекция 1. Предмет естествознания. Культура и естествознание . .	8
Лекция 2. Физическая картина мира	18
Лекция 3. Физические величины. Измерения	22
Лекция 4. Силы в природе. Фундаментальные взаимодействия .	35
Лекция 5. Пространство	43
Лекция 6. Время	49
Лекция 7. Вещество. Реальность атомов и молекул	63
Лекция 8. Зарождение представлений о двойственной природе микромира. Кванты. Волновая природа атомных частиц. Корпускулярная природа света	74
Лекция 9. Второй закон термодинамики. Порядок и беспорядок. Самоорганизация в неживой природе	85
Лекция 10. Вселенная	94
Лекция 11. Звезды. Классификация звезд	102
Лекция 12. Эволюция звезд	110
Лекция 13. Солнце — самая дорогая нам звезда	121
Лекция 14. Солнечная система	130
Лекция 15. Строение Земли. Форма Земли	139
Лекция 16. Магнитное и электрическое поля Земли	147
Лекция 17. Земная кора	152
Лекция 18. Почва. Строение и регулирующие функции	160
Лекция 19. Вода. Гидросфера. Вода и жизнь	168
Лекция 20. Атмосфера. Климат	174
Лекция 21. Глобальное изменение климата. Человек и изменение климата	182
Лекция 22. Биосфера как геологическая оболочка Земли	190
Лекция 23. Биосфера как экологическая система	195
Лекция 24. Энергия в экологической системе	202
Лекция 25. Биоценоз. Биогеоценоз	206
Лекция 26. Предпосылки возникновения на Земле органического вещества	212
Литература	21

Алексей Николаевич БАБУШКИН

СОВРЕМЕННЫЕ КОНЦЕПЦИИ ЕСТЕСТВОЗНАНИЯ

Лекции

Издание третье,
исправленное и дополненное

Генеральный директор *А. Л. Кноп*
Директор издательства *О. В. Смирнова*
Главный редактор *Ю. А. Сандулов*
Художественный редактор *С. Л. Шапиро*
Литературный редактор *У. А. Елькина*
Корректор *О. П. Панайотти*
Верстальщик *С. Ю. Малахов*
Выпускающие *Н. К. Белякова, О. В. Шилкова*

ЛР № 065466 от 21.10.97

Гигиенический сертификат 78.01.07.953.П.001665.03.02
от 18.03.2002 г., выдан ЦГСЭН в СПб

Издательство «ЛАНЬ»

lan@lpbl.spb.ru

www.lanpbl.spb.ru

193012, Санкт-Петербург, пр. Обуховской обороны, 277.

Издательство: тел./факс: (812)262-24-95, тел.: (812)262-11-78;
pbl@lpbl.spb.ru
print@lpbl.spb.ru

Торговый отдел: 193029, Санкт-Петербург, ул. Крупской, 13,
тел./факс: (812)567-54-93, тел.: (812)567-85-78, (812)567-14-45;
trade@lanpbl.spb.ru

Филиал в Москве:

109263, Москва, 7-я ул. Текстильщиков, 5,
тел.: (095)919-96-00, 787-59-47, 787-59-48;
lanmsk@gpress.ru

Филиал в Краснодаре:

350072, Краснодар, ул. Зиповская, 7, тел.: (8612)62-97-73.

Сдано в набор 22.01.02. Подписано в печать 30.06.02.
Бумага типографская. Гарнитура Школьная. Формат 84×108 1/32.
Печать офсетная. Печ. л. 7,00. Усл. п. л. 11,76. Тираж 5000 экз.

Заказ № 11.24.

Отпечатано с готовых диапозитивов
в ООО «Северо-Западный Печатный двор».
188350, Ленинградская обл., г. Гатчина, ул. Солодухина, 2.