

ВИКТОР ВАЙСКОПФ

НАУКА И УДИВИТЕЛЬНОЕ

КАК ЧЕЛОВЕК ПОНИМАЕТ ПРИРОДУ

Перевод с английского
А. С. КОМПАНЕЙЦА



ИЗДАТЕЛЬСТВО «НАУКА»
ГЛАВНАЯ РЕДАКЦИЯ
ФИЗИКО-МАТЕМАТИЧЕСКОЙ ЛИТЕРАТУРЫ
МОСКВА 1965

5

B 14

УДК 501

VICTOR F. WEISSKOPF

KNOWLEDGE
AND WONDER

THE NATURAL WORLD AS MAN
KNOWS IT

DOUBLEDAY & COMPANY, INC.

GARDEN CITY, NEW YORK

1962

ОГЛАВЛЕНИЕ

Предисловие переводчика	5
Предисловие автора	7
Глава I. Наше место в пространстве	9
<p>Расстояния до Луны, Солнца и планет (10). Расстояния до звезд (14). Распределение звезд в пространстве (18). Другие галактики (21). Расширяющаяся Вселенная (23). Лестница расстояний (27).</p>	
Глава II. Наше место во времени	30
<p>Возраст ландшафта (30). Радиоактивность—часы Вселенной (32). Возраст материи (34). Давность событий в истории Земли (37). Возраст Земли и планет (40). Возраст звезд (41).</p>	
Глава III. Две силы природы	44
<p>Тяготение на Земле и в небе (45). Всеобщность закона тяготения (48). Свет (51). Почему свет—это волна? (53). Электричество (57). Магнетизм (60). Электрические и магнитные поля (61). Электромагнитные волны (63). Что такое свет? (64).</p>	
Глава IV. Атомы	67
<p>Естественные единицы материи (67). Тепло (71). Молекулы и атомы (73). Строение атомов (77). Важнейшие проблемы строения атома (81).</p>	
Глава V. Квант	86
<p>Квантовые состояния атома (87). Волновая природа атомных частиц (94). Световые кванты (106). Дополнительность корпускулярной и волновой картин (110).</p>	
Глава VI. Химия	116
<p>Химическая связь (116). Молекулы (118). Химическая энергия, химическое горение (125). Агрегатные состояния (131).</p>	

Глава VII. Квантовая лестница	134
Размер и устойчивость (134). Строение ядер (135). Изотопы, радиоактивность (143) Ядерная энергия, ядерное горение (147). «Квантовая лестница» (152). Элементарные частицы (157).	
Глава VIII. Жизнь	164
Молекулы жизни (167). Химический процесс жизни (172). Генеральный план, управляющий жизнью (175). Вирус и человек (179). Источники питания (183).	
Глава IX. Эволюция	187
Что происходило вначале? (187). Эволюция звезд (190). Создание Земли (196). Развитие жизни (200). Игра случая (205)	
Эпилог	226

ПРЕДИСЛОВИЕ ПЕРЕВОДЧИКА

За последние десятилетия знания человека о природе возросли во много раз. В науке простое описание природы все больше вытесняется открытием перво-причины вещей. Успехи физики общеизвестны: на заре XX века учебники даже об атоме сообщали как о чем-то гипотетическом. В настоящее время нет ни одного не объясненного явления атомной физики. Передний фронт науки проходит глубоко внутри области атомного ядра: современная физика изучает строение и взаимодействие элементарных частиц. Столь же поразительные успехи сделала и биология, нашедшая, наконец, ответ на исконный вопрос: что такое жизнь? чем живая материя отличается от неживой?

Казалось бы, невозможно в одной небольшой популярной книге так осветить все основные разделы современного естествознания, чтобы их понял читатель, лишенный всякой специальной подготовки. И однако Вайскопфу удалось сделать это. Ему помогло как раз то, что отличает нынешнюю науку от науки прошлого — знание конкретной взаимосвязи всех явлений природы. То, что давно высказывалось в общей форме, ныне приняло форму конкретного знания.

Поэтому автор сумел атаковать в лоб любую проблему, будь то волновые свойства электрона или программа жизни клетки в ДНК. Чем лучше известна сущность явления, тем легче объяснить его другому, даже тогда, когда объяснение связано с вещами, далекими от повседневного опыта.

Русское заглавие книги предложено самим автором.

С самых первых страниц, где говорится о нашем месте во Вселенной, поражает стройный, логически

убеждающий метод изложения. Автор не пытается подавить воображение читателя громадностью астрономических чисел. Каждый новый шаг, раздвигающий горизонты Вселенной от планет к звездам, от звезд к галактикам, от отдельных галактик к их совокупности, обоснован очень простыми оценками порядков величин. Читатель легко понимает, откуда берутся все эти миллиарды галактик и световых лет. Оценки так очевидны, что иногда возникает недоумение: почему они не были известны еще в древности? Очевидно, кроме количественных оценок, нужна прежде всего правильная картина мира.

У Л. Н. Толстого есть интересная мысль.

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

Со времен Толстого объем знаний, насущно необходимых каждому культурному человеку, очень расширился. «Умный астроном» прекрасно понимал, как трудно рассказать людям в доступной и интересной форме именно то, что проще и нужнее всего. Но Вайскопфу это прекрасно удалось.

А. С. Компанеев

*«...Ибо всякое знание и чудо
(в котором заключено семя
знания) есть удовольствие
само по себе...»*

Фрэнсис Бэкон

ПРЕДИСЛОВИЕ АВТОРА

Эта книга возникла из цикла лекций, прочитанных автором в Бэкингемской школе (Кембридж, Массачусетс) для слушателей, не имеющих специальной подготовки в науке. Цель лекций состояла в том, чтобы дать общий беглый очерк современных научных представлений о явлениях природы, показать универсальность этих представлений и их значение для человека.

Слишком хорошо известно, с какими трудностями связано подобное начинание. Научное знание трудно сообщить не ученому: слишком многое надо объяснить прежде, чем дойдешь до существа дела. Обычно профан не видит леса из-за деревьев. Но эти трудности не должны пугать ученых и удерживать их от попыток такого рода. В этой книге непосвященным рассказывается о величайших культурных достижениях нашего времени.

В наш век естественные науки уже не являются независимыми. Химия, физика, геология, астрономия и биология связаны друг с другом, и все рассматриваются в этой книге, хотя и не одинаково подробно. Наибольшее место отведено физике, основе естественных наук, и, в частности, атомной физике, так как все на свете состоит из атомов. В книге особенно подчеркнута тенденция к универсальности науки, к единому рассмотрению любых объектов — от элементарной атомной частицы до живого мира. Реализация этой общей точки зрения кажется более близкой благодаря огромным успехам, достигнутым в последние десятилетия в понимании атомов, звезд и живых клеток.

При написании такой небольшой книги, как эта, автор вынужден делать отбор и опускать многие существенные факты. При этом отборе он руководствовался своими представлениями о существенности тех или иных областей науки; большую роль играла также ограниченность его собственных знаний. Один пробел требует специальных пояснений. Теория относительности Эйнштейна не включена в книгу и лишь бегло упоминается в ней. Конечно, автор прекрасно понимает, что теория относительности — это одно из крупнейших достижений физики и всей науки вообще. Она настолько революционизировала наши представления о пространстве и времени, что без Эйнштейна невозможно было бы количественное, строгое рассмотрение пространства и времени. Однако идеи Эйнштейна играют решающую роль в количественной формулировке многих научных проблем, тогда как в нашей книге особое место уделено качественной картине мира в том виде, в котором ее рисует наука. Для этого теория относительности не абсолютно необходима, и поэтому мы оставили ее в стороне.

Автору помогли очень многие коллеги, читавшие ранние варианты рукописи и предложившие изменения и добавления. Особенно автор обязан своим коллегам: ученым Давиду Хаукинсу, Мервину Хайну, Филипу Моррисону, Алексу Ричу и Кириллу Смиту. Очень помогла ему книга «Физика», изданная Комитетом содействия изучению физики (D. C. Heath & Co., 1960). Особую благодарность автор приносит двум лицам, не принадлежащим к миру ученых, — Кингмэну Брюстеру и Энн Моррисон, которые сыграли роль подопытных морских свинок в ранних стадиях работы над книгой и оказывали постоянную моральную поддержку.

Особую благодарность надо принести Джону Х. Дэрстону за внимательный просмотр рукописи и внесенные в нее усовершенствования и Полю Ларкину за иллюстрации, а также Бэкингемской школе, которая своим приглашением прочесть лекции вызвала к жизни эту книгу.

*Женева, Швейцария
1 марта 1962 г.*

Виктор Ф. Вайскопф

НАШЕ МЕСТО В ПРОСТРАНСТВЕ

Как велик мир? Каковы размеры предметов в этом мире? Мы имеем непосредственное представление только о размере тех предметов, с которыми встречаемся в повседневной жизни. Наименьшая длина, которую воспринимают наши глаза, — это толщина, или диаметр, волоса, примерно равный одной десятой миллиметра ¹⁾. Рост человека, грубо говоря, равен двум метрам, это несколько превышает десять тысяч диаметров волоса. Другие предметы вокруг нас: мебель, инструменты, автомобили, дома — имеют размеры того же порядка, как и наше тело, в противном случае было бы трудно иметь с ними дело.

Глядя в окно на ландшафт, мы видим предметы больших размеров, находящиеся на больших расстояниях, например горы и равнины. Мы можем измерить расстояния до них, считая шаги, которые нужно сделать, чтобы достичь их, иначе говоря, прямо сравнивая эти расстояния с размерами своего тела. Мы находим, что предметы, которые мы еще можем увидеть на расстоянии — горы, холмы и леса,

¹⁾ Мы будем измерять все величины в метрической системе, как это делают ученые и все люди в большинстве стран, за исключением Англии и США. Введением этой полезной системы мер мы обязаны французской революции; достойно сожаления, что она не принята в странах английского языка.

Единицей длины служит метр, приблизительно равный расстоянию от кончика носа до конца вытянутых рук. Согласно научному определению основателей системы, метр должен равняться одной сорокамиллионной окружности Земли. Они не могли проводить свои измерения с достаточной точностью и сделали очень небольшую ошибку. Но мы пользуемся их исходным метром. Сантиметр — это одна сотая часть метра, он примерно равен диаметру мелкой монеты. Миллиметр — тысячная часть метра, он близок к толщине монеты. Километр — тысяча метров, «короткая» миля, или 3300 футов.

отстоят от нас только на несколько километров, не более чем на 100 км, даже если речь идет об огромных Скалистых горах.

На этом кончается наше непосредственное восприятие расстояния. Было бы слишком трудно измерить размеры какого-либо континента, не говоря уже о размерах Земли, считая шаги. Поэтому надо применять не прямые методы, чтобы получить представление о размерах и расстояниях, превышающих, скажем, 100 км. Один из таких способов состоит в измерении расстояний с помощью скорости. Если я еду из одного пункта в другой с заданной скоростью, скажем 100 км/час, и знаю время, которое заняла поездка, то я могу получить представление о расстоянии между ними. Современные средства передвижения облегчают эту задачу. Самолету требуется около 10 мин, чтобы пролететь 100 км; расстояние от западного до восточного побережья США он покрывает примерно за 500 мин. Следовательно, ширина Америки приблизительно равна 5000 км. Тому же самолету потребовалось бы примерно в 10 раз больше времени, чтобы облететь вокруг Земли; значит, ее окружность составляет около 50 000 км. На самом деле она составляет 40 000 км. Так как Земля — шар, нетрудно найти и ее диаметр, он равен 13 000 км. Это размер нашей родной планеты — Земли.

РАССТОЯНИЯ ДО ЛУНЫ, СОЛНЦА И ПЛАНЕТ

Обратимся теперь к небесным телам. Как мы можем измерить расстояния до них и их размеры? Солнце, Луна и звезды кажутся прикрепленными к какому-то своду, окружающему пространство, в котором мы живем. Когда мы смотрим на звездное небо, оно выглядит так, как если бы все небесные тела находились на одинаковом расстоянии (рис. 1). Истинное расстояние до этих тел столь велико, что его невозможно воспринять непосредственно.

Однако существуют очень простые способы измерения расстояний до ближайших небесных тел. Наиболее простой способ разработан в самые последние годы, он основан на методе радиолокации.

Луч радара направляют на объект и посылают весьма короткий сигнал. Затем ждут возвращения отраженной волны и измеряют время, протекшее от посылки сигнала до его возвращения. Если сигнал нацелен на Луну, то это время составит 2,6 сек. Столько времени понадобилось сигналу радара, чтобы достичь

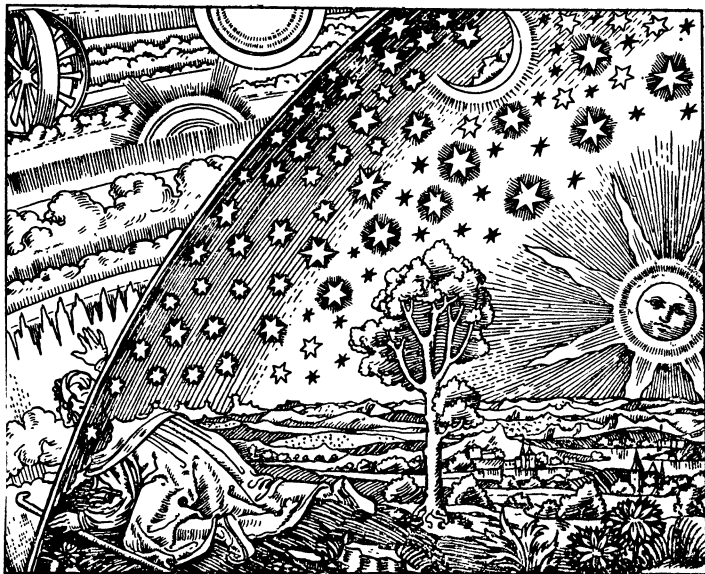


Рис. 1. Средневековая гравюра на дереве, на которой показано преобладавшее в то время представление о картине мира.

Странник просовывает голову сквозь небесный свод и видит устройства, движущие звезды.

Луны и вернуться. Волна радара имеет ту же природу, что и световая, и распространяется с той же скоростью (см. гл. III) — $300\,000\text{ км/сек}$. Отсюда мы заключаем, что расстояние Земля — Луна — Земля равно $2,6 \cdot 300\,000\text{ км}$, т. е. что Луна отстоит от нас приблизительно на $400\,000\text{ км}$. Это — еще один пример определения расстояния по скорости.

Теперь, когда мы уже знаем расстояние до Луны, спросим, как она велика? Мы видим Луну как диск. Размеры его таковы, что понадобилось бы 360 таких дисков, чтобы выложить их рядом по большому

кругу от западного горизонта через зенит к восточному. Так как нам известно расстояние до Луны, мы можем узнать и длину полуокружности, радиус которой равен расстоянию до Луны. Эта длина равна радиусу, умноженному на π , т. е. произведению π на 400 000 км. Диаметр Луны составляет $1/360$ этой длины, или 3600 км. Это примерно в три раза меньше диаметра Земли, а расстояние до Луны равно приблизительно тридцати диаметрам Земли. Луна почти земной объект.

Рассмотрим теперь другие небесные объекты, прежде всего объекты, принадлежащие нашей сол-

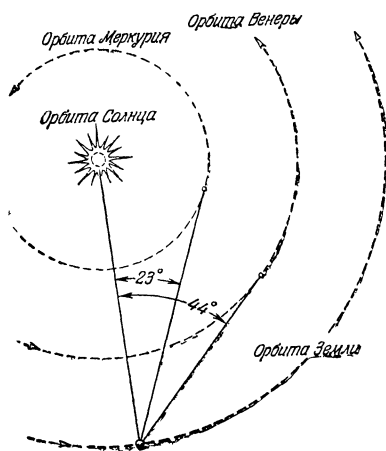


Рис. 2. Наибольшие угловые отклонения Меркурия и Венеры относительно Солнца.

Эти углы определяют отношения радиуса земной орбиты к радиусам орбит Меркурия и Венеры.

нечной системе, состоящей из Солнца и других планет. Люди наблюдали движение планет в течение многих столетий и интересовались, что оно означает. Коперник объяснил странные движения планет на небе тем, что Земля обращается вокруг Солнца и с нее наблюдаются планеты, которые тоже обращаются вокруг Солнца по круговым орбитам (точнее, по эллипсам, близким к кругу)¹⁾. Земля — одна из планет, ее орбита — третья от Солнца. Тщательные наблюдения с Земли над движением планет позволяют определить относитель-

ные размеры орбит различных планет. Например, Меркурий всегда наблюдается близко от Солнца,

¹⁾ Движение планет по небу казалось странным потому, что они перемещаются не просто с востока на запад, как Луна, а описывают сложные петли. Именно это запутанное движение по небесному своду и объяснил Коперник, исходя из простой кинематики движения планет по окружности вокруг Солнца. (Прим. перев.)

никогда не далее 23° ; отсюда мы заключаем, что радиус орбиты Меркурия равен 0,38 радиуса земной орбиты, т. е. немногим более одной трети ее радиуса. Аналогичным способом мы находим, что радиус орбиты Венеры равен 0,7 радиуса земной орбиты, т. е. немногим более двух третей от него. Таким образом, мы можем построить картину солнечной системы, соблюдая правильные пропорции, но не зная ее истинных размеров (рис. 2).

Как же нам найти размеры орбит и получить представление об истинной величине солнечной системы? Так как мы знаем расположение членов солнечной системы друг относительно друга, то надо узнать расстояние только до одного из них, чтобы узнать истинную величину всех орбит. Здесь можно снова воспользоваться радарным методом.

Хотя некоторые обещающие опыты и были уже выполнены в момент написания этой книги, еще не удалось применить радарный метод для прямого определения расстояния от Земли до Солнца. Но можно направить луч радара на одну из ближайших планет. Он был послан на Венеру, и время между испусканием и возвращением сигнала лежало где-то между 5 и 15 мин, в зависимости от того, где находились Земля и Венера на своих орбитах во время опыта. По скорости света мы заключаем, что расстояние до Венеры порядка миллионов километров. Так мы определили характерные для солнечной системы расстояния. Размер солнечной системы таков, что свет проходит от одной планеты до другой за несколько минут. После того, как определено единственное расстояние — расстояние Венера — Земля, нетрудно найти и другие расстояния в солнечной системе, так как мы знаем пропорции и относительные размеры орбит. Можно прямо найти и наиболее важное для нас расстояние, а именно расстояние Земля — Солнце. Оно оказывается равным 150 миллионам километров; свету требуется немногим более 8 мин, чтобы дойти от Солнца до нас.

Как велико Солнце? Оно кажется нам таким же, как Луна, но легко показать, что оно в 375 раз

дальше. Следовательно, и диаметр Солнца должен быть в 375 раз больше лунного; умножая, получаем,

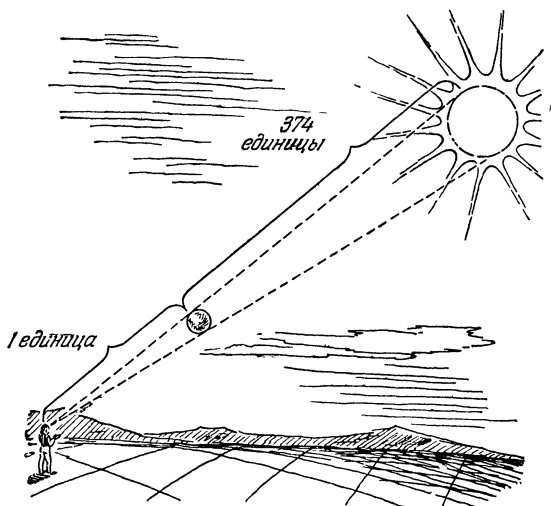


Рис. 3. Соотношение между размерами Луны и Солнца для земного наблюдателя.

что он равен 1,4 миллиона километров. Солнце более чем в 100 раз больше Земли (рис. 3).

РАССТОЯНИЯ ДО ЗВЕЗД

Итак, мы определили размеры солнечной системы, которая в большей степени, чем Земля, может считаться нашим обиталищем. Ведь Солнце, в конце концов, служит нашим источником света, тепла и энергии. Миру этой звезды мы принадлежим, и она служит частью нашей жизни. Солнечная система — это тот мир, в котором мы живем. Теперь выглянем наружу.

Все, что мы видим, — это звезды. Они называются «неподвижными звездами», так как нам кажется, что они все время остаются на месте, в отличие от планет, движение которых вокруг Солнца легко заметно. На самом же деле эти звезды представляются «неподвижными» только потому, что они находятся на слишком большом расстоянии от нас, чтобы за всю

нашу жизнь нам удалось обнаружить какое-либо их перемещение. В действительности они движутся. Точные фотографии неба показывают небольшие перемещения звезд за периоды во много лет. Изучая древние манускрипты, мы можем увидеть, что несколько тысяч лет назад некоторые из созвездий выглядели совсем иначе.

На каком же расстоянии от нас находятся звезды? Предположим, что звезды, которые мы видим на небе, примерно столь же велики и ярки, как и Солнце, что в значительной степени верно. Нам они совсем не кажутся одинаково блестящими: одни светят ярко, другие — слабо. Если наше исходное предположение верно, то это можно объяснить только тем, что одни звезды ближе к нам, другие — дальше. Тогда нам легко вычислить расстояния до звезд.

Обратимся теперь к Сириусу и вспомним такой хорошо известный факт: если одно из двух одинаково ярких тел находится от нас на расстоянии в n раз большем, чем другое, то более близкое тело кажется в n^2 раз ярче. Применим этот закон к Солнцу и Сириусу. Солнце кажется значительно более ярким. Сравнивая интенсивности света, мы увидим, что Солнце в (миллион)² раз ярче Сириуса. Тогда из нашего закона следует, что Сириус находится от нас в миллион раз дальше, чем Солнце. Яркость других звезд, например семи звезд ковша Большой Медведицы, в девять раз меньше яркости Сириуса. Тогда, если справедливо наше предположение о равной абсолютной светимости, они должны находиться еще в три раза дальше. Было бы легко найти расстояния до всех звезд, а значит и размеры всей нашей видимой Вселенной, если бы все звезды имели приблизительно равную светимость.

Нельзя ли подтвердить эту гипотезу какими-либо другими наблюдениями? Да, можно. Это делают, непосредственно измеряя расстояния до некоторых звезд и сравнивая полученный результат с тем, который следует из нашей гипотезы. Если результаты, найденные обоими способами, совпадают, гипотеза верна. Простейший способ измерения расстояния до какого-либо недоступного предмета состоит в том, чтобы визировать его из двух разных точек и затем

определить, как изменяется направление, в котором он виден. Отдаленное дерево будет видно слегка в ином направлении, если мы пройдем несколько шагов в направлении, перпендикулярном линии, соединяющей дерево и наблюдателя. Чем дальше дерево, тем меньше изменится направление, в котором оно

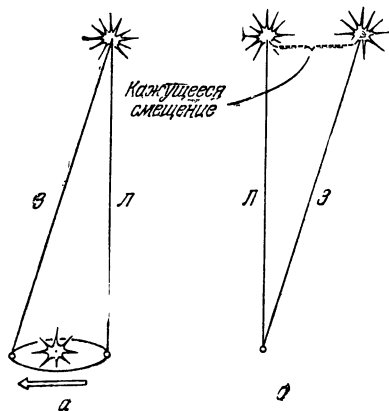


Рис. 4. Кажущееся смещение.

Зимой звезда видна в направлении З, а летом — в направлении Л (а). Поэтому звезда, видимая с Земли, кажется смещенной на расстояние, равное диаметру земной орбиты (б).

видно. Из этого изменения можно вычислить расстояние до дерева ¹⁾. Конечно, звезды так далеки, что, ведя наблюдения из разных точек земного шара, невозможно заметить ни малейшего изменения в направлении.

Но здесь можно воспользоваться тем обстоятельством, что Земля вращается вокруг Солнца и мы поэтому непрерывно меняем точку наблюдения звезды (рис. 4). Зимой мы смотрим на звезду из точки, которая на 300 миллио-

нов километров удалена от летней точки наблюдения. Если мы перемещаемся из некоторой точки круга в противоположную, то звезды, в особенности ближайшие, будут казаться слегка смещенными. Если за полгода Земля переместилась, скажем, справа налево, то звезды должны переместиться по небесному своду слева направо. Звезда переместится по небесному своду на расстояние, равное диаметру земной орбиты (300 миллионов километров), если считать неподвижной Землю, иначе говоря, мы увидим звезду, сместившуюся на угол, под которым

¹⁾ Если выразить изменение направления в градусах, например считать его равным α , и пройти n метров, то расстояние до дерева составит $\frac{57n}{\alpha}$. Чем меньше α , тем дальше от нас находится дерево.

виден диаметр земной орбиты со звезды. Если наша предыдущая гипотеза верна, то Сириус, который в миллион раз дальше от нас, чем Солнце, должен совершать периодические смещения, не превышающие размеры гривенника, наблюдаемого с расстояния в 5 км (увеличенный в миллион раз радиус гривенника). Такое смещение действительно было найдено!

Уже 125 лет назад у астрономов были инструменты, способные измерять такие малые смещения, и выяснилось, что Сириус и другие столь же яркие звезды действительно находятся от нас на расстоянии, предсказываемом гипотезой о равенстве их истинной яркости и яркости Солнца. Если расстояние до звезды можно измерить по ее небольшому периодическому смещению, то мы убеждаемся в том, что более яркие звезды находятся ближе, а менее яркие — дальше от нас. Наше предположение оказалось в общих чертах справедливым. Большинство звезд, расстояние до которых измерено, имеют близкую истинную яркость (светимость).

Теперь мы знаем расстояния до наиболее ярких, т. е. до ближайших, звезд. Мы можем оценить протяженность пустого пространства между нашей солнечной системой и ближайшим солнцеподобным объектом — оно в миллион раз больше расстояния от Земли до Солнца, т. е. примерно равно 10^{14} км¹). Свету требуется десять лет, чтобы пройти это расстояние, почему мы и измеряем подобные расстояния в световых годах: Сириус отстоит от нас на 10

¹) Вместо того, чтобы писать числа с многими нулями, мы будем в этой книге пользоваться общепринятым научным обозначением через так называемые «степени десяти». Так, 10^{14} означает десять в четырнадцатой степени, т. е. десять, умноженное само на себя четырнадцать раз, или единицу в первом знаке с четырнадцатью нулями после нее. В этих обозначениях миллион, например, записывается в виде 10^6 .

Когда мы говорим, что расстояние до Сириуса составляет 10^{14} км, это не означает, что оно точно равно этой величине. Мы указываем только «порядок величины». Оно может равняться и $\frac{2}{3}$ и $\frac{3}{2}$ от 10^{14} км. Для специальных научных целей расстояние до Сириуса нужно знать значительно точнее, и оно действительно известно очень точно, но в данном случае в этом нет необходимости. Для нас сейчас неважно, удален ли Сириус от нас на $\frac{1}{2} \cdot 10^{14}$ км или на $2 \cdot 10^{14}$ км. При определении протяженности пространства нас интересует только порядок величины.

световых лет. Сравним это с несколькими минутами, которые требуются свету, чтобы пройти солнечную систему, или с десятой секунды, за которую свет может обойти вокруг Земли, и мы получим представление о расстояниях до наших сестринских солнц.

Прямым методом смещений можно измерить расстояние не до многих звезд, а только до ближайших к нам, отстоящих не более чем на 50 световых лет. На этом расстоянии находится около 300 звезд. Смещение большинства других звезд слишком мало, чтобы его можно было заметить. К счастью, есть много других, менее прямых методов измерения расстояний до звезд. Здесь мы не будем входить в детали этих методов. В общем, эти измерения подтвердили нашу гипотезу: звезды мало отличаются друг от друга по своей истинной яркости; если бы они находились на одном и том же расстоянии, то выглядели бы приблизительно одинаково яркими. Из этого правила есть много исключений, но им можно пользоваться для предварительной ориентации при оценке распределения звезд в пространстве. В действительности это правило выполняется гораздо лучше при сравнении звезд одного цвета. Например, звезды, подобные Солнцу (желтовато-белого цвета ¹⁾), никогда заметно не отличаются друг от друга: одна может быть втрое ярче или втрое слабее другой, но для наших целей это различие очень невелико. Мы не сделаем большой ошибки при оценке расстояния, предполагая светимости всех звезд равными. Мы получим правильный порядок величин для расстояний, и это все, что нужно для получения общих представлений об огромных расстояниях во Вселенной.

РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ЗВЕЗД В ПРОСТРАНСТВЕ

Посмотрим на звездное небо, чтобы представить себе распределение звезд в пространстве. Мы увидим яркие и слабые, тусклые звезды, причем слабых

¹⁾ Цвет, который имеет Солнце при наблюдении с очень больших расстояний, легко найти, рассматривая некоторые искусственные спутники. Они сделаны из отражающего металла и поэтому имеют такой же цвет, что и Солнце.

оказывается гораздо больше, чем ярких. На первый взгляд кажется, что нет никакой закономерности в распределении звезд по небу. Но при более систематическом наблюдении с использованием примитивного телескопа мы заметим, что слабые звезды распределены по небу далеко не равномерно. В Млечном Пути или около него слабых звезд значительно больше, чем в отдаленных от него участках неба. Если смотреть в хороший бинокль в направлении, сильно удаленном от Млечного Пути, мы заметим несколько ярких звезд, но почти не увидим очень слабых. Фон Млечного Пути, однако, мерцает миллионами звезд.

Что это означает? Это означает, что звезды не распределены в пространстве равномерно, а сосредоточены в участке, имеющем вид плоского диска. Наша солнечная система находится где-то в этом диске. Если мы смотрим в тело диска, то видим много звезд, и особенно много таких, которые весьма удалены от нас и поэтому кажутся слабыми, но если смотреть перпендикулярно плоскости диска, то мы заметим только несколько звезд, причем (вследствие их близости) относительно ярких.

Каковы же размеры этого диска, внутри которого находятся все звезды, видимые нами на небе? Мы снова можем воспользоваться своей гипотезой и измерить яркость слабейших звезд, еще видимых при наблюдении в направлении диска (Млечного Пути) и в перпендикулярном ему направлении. Для этого нужны мощные телескопы, позволяющие различить каждую отдельную звезду в Млечном Пути. Тогда мы снова сможем применить наш простой способ определения расстояний. Приведем полученные результаты: слабейшие звезды, еще видимые в направлении плоскости Млечного Пути, в 100 раз слабее звезд, еще видимых в перпендикулярном направлении. Поэтому радиус диска должен примерно в 10 раз превышать его толщину ¹⁾. Яркость наиболее слабых звезд в Млечном Пути приблизительно

¹⁾ Напомним, что источник света кажется в 100 раз слабее, если он находится в 10 раз дальше. Вообще, он кажется в x раз слабее, если он в \sqrt{x} раз дальше.

в сто миллионов раз меньше яркости Сириуса; поэтому они должны находиться в 10 000 раз дальше, чем Сириус, т. е. располагаться на расстоянии 100 000 световых лет (рис. 5).

Из распределения слабых и ярких звезд по небу следует, что звезды образуют круговой диск с диаметром 10^5 световых лет и толщиной 10^4 световых

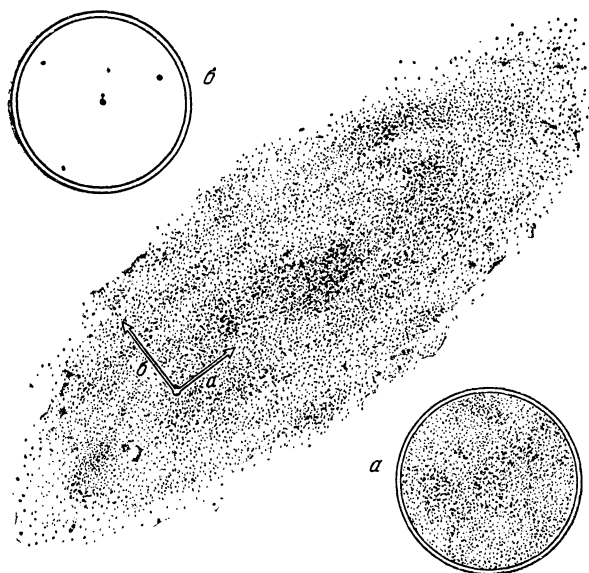


Рис. 5. Схема Галактики, на которой показаны положение Солнца и направления лучей зрения *а* и *б*.

а — звезды, видимые в телескоп, направленный внутрь Галактики; *б* — звезды, видимые в телескоп, направленный из Галактики наружу.

лет. Солнце и Земля находятся на середине радиуса. Эта плоская «колония» звезд называется галактической системой, или нашей Галактикой. Среднее расстояние между звездами в ней — около 10 световых лет. Таково расстояние от Солнца до ближайших звезд вокруг него, и, по-видимому, таково же обычное расстояние между соседями в Галактике. Отсюда легко оценить, сколько всего звезд в Галактике. Мы получим число около 50 миллиардов.

В настоящее время мы знаем гораздо больше о строении Галактики. В нее входят не только звезды, но также газы и пыль; особенно много их в центре Галактики. Эта межзвездная материя затрудняет применение нашего простого метода измерения расстояний. Видимая через слой газа и пыли, звезда кажется слабее, и мы можем ошибочно заключить, что она дальше от нас, чем на самом деле. Но астрономы разработали много методов, позволяющих преодолеть эту трудность. Современная радиоастрономия, например, дает хороший метод определения областей, в которых находится межзвездный газ; этот газ испускает определенные радиоволны, характерные для атомов водорода — основного элемента в межзвездном газе. Таким методом, а также целым рядом других установлено, что звезды сосредоточены в больших спиральных рукавах, выходящих из центра диска и закрученных в его плоскости.

Система звезд, образующих нашу галактическую систему, — это вторая, более крупная единица космической среды, в которой мы обитаем. Сначала мы рассматривали Землю, а затем и солнечную систему как наше местообитание. Теперь мы узнали, что Солнце вместе со своими планетами — только малая часть большой системы, насчитывающей многие миллиарды звезд, — нашей Галактики. Что находится вне этой системы?

ДРУГИЕ ГАЛАКТИКИ

Посмотрим опять на звездное небо в бинокль. Мы увидим миллиарды звезд нашей Галактики. Иногда, однако, мы увидим нечто отличное от звезды — туманность, протяженное светящееся пятно. Прекрасным примером ее служит туманность в созвездии Ориона. Эта туманность, как и многие другие, оказалась облаком светящегося газа. Однако существуют и другие туманности; наиболее поразительна среди них туманность Андромеды, которая при наблюдении в малый телескоп выглядит как дискообразная светящаяся область. Рассматривая эти туманности в очень сильные телескопы, мы увидим, что на самом деле они представляют собой скопления

очень слабых звезд, расположенных в виде такой же дискообразной спирали, как и наша Галактика. Это было потрясающее открытие! Наша Галактика оказалась не единственной. Существуют и другие аналогичные звездные системы. Число таких галактик

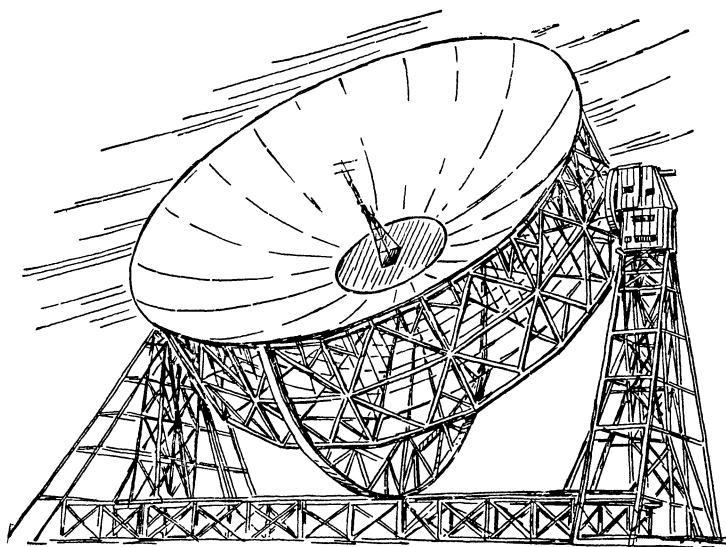


Рис. 6. Современный радиоастрономический телескоп.

очень велико. Чем мощнее телескоп, тем больше можно увидеть галактик. Они простираются глубоко во Вселенную. Насколько они удалены от нас и каково их распределение в пространстве?

Мы снова можем получить некоторое представление об интересующих нас расстояниях, исходя из кажущейся яркости объектов. Обратимся к туманности Андромеды (фото I)¹⁾. Ее полная яркость примерно такая же, как у средней звезды, удаленной на 10 световых лет. Очень мощные телескопы показывают, что число всех звезд в этой галактике такого же порядка, как и в нашей, — около 50 миллиардов. Отсюда мы должны заключить, что на самом

¹⁾ Все фотографии приведены на вклейках. (Прим. ред.)

деле эта туманность в 50 миллиардов раз ярче отдельной звезды нашей Галактики. Она кажется столь же яркой; следовательно, расстояние до туманности Андромеды должно быть в $\sqrt{50 \cdot 10^9}$ раз больше, чем до ближайших звезд, т. е. должно равняться произведению 10 световых лет на $\sqrt{50 \cdot 10^9}$, что дает около 2 миллионов световых лет. Это число неоднократно проверялось другими, более точными методами и оказалось примерно правильным. Расстояние от нашей Галактики до соседней приблизительно в 20 раз больше диаметра Галактики. Свет, приходящий от туманности Андромеды, покинул ее тогда, когда нашу Землю населяли еще не люди, а их обезьяноподобные предки.

Тот же метод можно применить к другим видимым на небе галактикам. Сравним кажущуюся яркость какой-либо галактики с яркостью туманности Андромеды; пусть яркость первой, скажем, в x раз меньше; тогда данная галактика в \sqrt{x} раз дальше. Это заключение основано на гипотезе, что все галактики имеют приблизительно одинаковые размеры и истинную яркость. Многие тщательно выполненные наблюдения подтверждают эту гипотезу.

Таким путем можно получить представление о распределении по небу множества спиральных туманностей, которые мы видим в сильные телескопы. Теперь нам известно о миллионах таких туманностей. Мы нашли, что они распределены в пространстве более или менее равномерно по всем направлениям, причем среднее расстояние между соседями достигает нескольких миллионов световых лет. Расстояние между нашей Галактикой и туманностью Андромеды приблизительно равно среднему расстоянию между галактиками вообще. Чем дальше мы смотрим, тем больше галактик находим. Дойдем ли мы в своих поисках до конца?

РАСШИРЯЮЩАЯСЯ ВСЕЛЕННАЯ

На этот вопрос можно ответить утвердительно благодаря открытию очень интересного и неожиданного явления, сделанного несколько десятилетий назад. Все эти галактики движутся от нас, и, чем

далее они находятся, тем быстрее удаляются. Откуда мы это знаем?

Для этого надо лучше изучить свет, приходящий к нам от туманностей, т. е. от всех 50 миллиардов звезд, составляющих туманность. Как будет показано в гл. III, световой луч есть электромагнитная волна, и ее частота (т. е. число колебаний, совершающихся в 1 секунду) определяет цвет. Свет можно разложить в спектр, пропуская его через призму, и тогда цвета расположатся по частотам: низкие частоты с одной стороны, высокие — с другой. Изучая свет, испускаемый звездой, легко показать, что, хотя мы видим все цвета, некоторые частоты все же отсутствуют. В спектре большинства звезд отсутствуют определенные частоты.

Свет с такими частотами поглощается более холодным газом на поверхности звезд. Темные линии в спектре расположены как раз на тех местах, в которых находился бы свет соответствующей частоты, если бы он не поглощался. Например, в большинстве звездных спектров наблюдаются две темные линии в фиолетовой части, указывающие на поглощение газообразным кальцием. Мы не удивляемся, находя те же темные линии в спектрах отдаленных галактик, так как их излучение — это сумма излучения всех входящих в них звезд. Но весьма поразительно, или сперва казалось поразительным, что те же две темные линии находятся не при ожидаемой частоте, а смещены в сторону меньших частот. В очень слабых галактиках эти линии видны в красном конце спектра, а не в фиолетовом.

Такое смещение частоты хорошо известно, и его можно прямо истолковать как следствие движения объекта относительно наблюдателя. Если источник света удаляется от наблюдателя, то частота испущенного света уменьшается, точно так же как звук автомобильного сигнала кажется ниже, когда автомобиль удаляется от нас. Наблюдаемое смещение пропорционально скорости и, следовательно, может служить для определения скорости удаляющихся объектов.

Поэтому смещение частоты света от отдаленных галактик можно истолковать как доказательство

того, что они удаляются от нас. Скорость этого движения оказалась пропорциональной расстоянию до галактики. Движение ближайшей галактики, например туманности Андромеды, почти невозможно обнаружить, но галактики, отстоящие от нас примерно на 100 миллионов световых лет, удаляются со скоростью около 3000 км/сек. Численная величина этой скорости, выраженная в километрах в секунду,

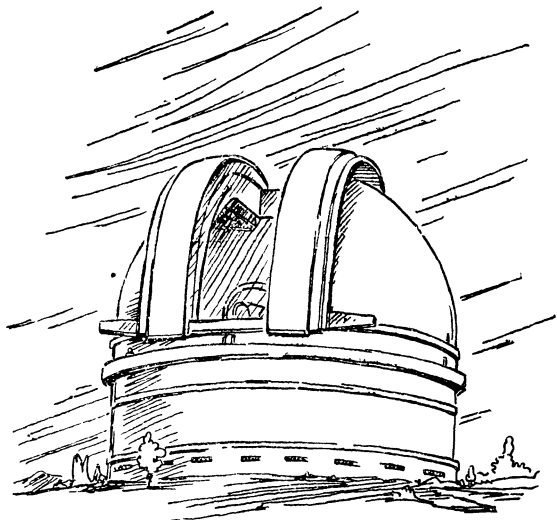


Рис. 7. Маунт-Паломарская обсерватория.

примерно в 30 раз больше расстояния, выраженного в миллионах световых лет. Такая связь между скоростью и расстоянием была впервые найдена американским астрономом Хабблом в 1929 г. В настоящее время наиболее сильные телескопы позволяют различать галактики, удаленные на 3 миллиарда световых лет. Они удаляются от нас со скоростью 90 000 км/сек, что составляет почти треть от скорости света.

Расширение мира галактик указывает нам предел, до которого мы можем их увидеть. Мы можем создавать все более и более мощные телескопы, пытаясь наблюдать все более удаленные галактики,

но последние будут убегать от нас со скоростью, все более приближающейся к скорости света. Если объект удаляется от нас со скоростью, близкой к скорости света, его излучение будет казаться ослабленным; чем ближе его скорость к световой, тем меньше будет его яркость, тем менее заметным он станет.

Причину этого легко понять, сравнивая свет, испущенный источником, с пулями, вылетающими из ружья во всех направлениях. Очевидно, что число поражений цели окажется очень небольшим, если ружье будет удаляться от нее со скоростью, близкой к скорости пуль ¹⁾).

Поэтому если даже и существует гораздо больше галактик, удаленных на расстояние, превышающее 10 миллиардов световых лет (расстояние, на котором соотношение Хаббла дает скорость удаления, равную скорости света), даже если их и бесконечно много, нам не удастся видеть их; они удаляются от нас настолько быстро, что их свет никогда не сможет достичь нас.

Вселенная, в которой расстояния между галактиками увеличиваются, ставит перед нами интересный вопрос. Пусть имеется бесконечное число галактик, рассеянных по бесконечному пространству. Но мы можем увидеть только те из них, которые удаляются от нас со скоростью, заметно меньшей скорости света. Поэтому имеется только конечное число галактик, свет которых может достичь нас.

¹⁾ Этот пример может привести к ошибочному выводу, что свет, испущенный в направлении, противоположном движению удаляющегося источника, имеет меньшую скорость, чем в случае покоящегося источника. Конечно, пули, вылетающие из удаляющегося ружья, приходят к нам с меньшей скоростью, чем пули из покоящегося.

Свет всегда распространяется с одной и той же скоростью (300 000 км/сек), независимо от того, испущен ли он покоящимся или движущимся источником. Поведение света управляется законами теории относительности, которая в этой книге не рассматривается. Однако следствие, выведенное из нашего примера, все же остается в силе: ослабление света происходит не за счет уменьшения скорости, а за счет потери интенсивности. Она обращается в нуль при удалении источника со скоростью света. (Прим. перев.).

Хотя на самом деле Вселенная и может быть бесконечной, для нас она конечна. Мы можем изучать только ту ее часть, которая посылает достигающие нас световые сигналы.

Замечательно, что астрономические приборы, которыми мы располагаем теперь, такие, как телескоп обсерватории Маунт-Паломар (рис. 7), уже способны проникать на расстояния, для которых скорость удаления равна $1/3$ скорости света. Это ненамного меньше наибольшего расстояния, на котором мы вообще еще можем увидеть какой-либо объект. Если нам удастся проникнуть во Вселенную только втрое дальше, то мы охватим всю ее видимую часть. Мы являемся свидетелями великого события в истории человечества, сравнимого с первым кругосветным путешествием Магеллана в 1520 г. Путь Магеллана охватил всю Землю, и таким образом были установлены пределы путешествий на ней. Теперь мы можем определить пределы проникновения в мировое пространство. Мы начинаем наблюдать последние объекты, которые еще можно увидеть.

ЛЕСТНИЦА РАССТОЯНИЙ

Подытожим теперь то, что мы узнали о размерах объектов. Для этого пройдем по одной ступеньке всю «лестницу расстояний», начиная с наименьшего расстояния, еще воспринимаемого невооруженным глазом, и восходя к звездам.

Наименьшее расстояние, или размер, который мы можем различить, приблизительно равно одной десятой миллиметра. Это — толщина волоса. Следующая ступенька на нашей лестнице характеризует размеры нашего собственного тела, например расстояние от глаза до конца руки — кончиков пальцев, — оно в 10 000 раз больше первого, т. е. составляет около одного метра. Расстояние до ясно видимых гор на горизонте еще в 10 000 раз больше — 10 км. Следующая ступенька — диаметр Земли, она примерно в 1000 раз больше — 12 000 км. Расстояние от Земли до Солнца снова в 10 000 раз больше —

150 миллионов километров. Следующая ступенька — расстояние до ближайших звезд. На этот раз ступенька больше примерно в 1000 000 раз, и мы получаем 10^{14} км, или 10 световых лет. Следующая — размер нашей Галактики — опять в 10 тысяч раз больше предыдущей, а именно 10^5 световых лет. Затем следует ступенька, которая больше только на множитель, заключенный между 10 и 100; она приводит нас к расстояниям до соседних галактик, нескольким миллионам световых лет. Последняя ступенька, получаемая умножением на 10 000, — расстояние до наиболее удаленных объектов, которые вообще еще можно увидеть, или то, что мы называем радиусом доступной Вселенной. По лучшим современным оценкам это расстояние порядка 10 миллиардов световых лет.

«Лестница расстояний»

Расстояния, или различные размеры		Отношение ступенек
Наименьшее различимое расстояние . . .	0,1 мм	10 000
Размеры тела человека	1 м	10 000
Расстояние до горизонта	10 км	1 000
Диаметр Земли	$1,2 \cdot 10^4$ »	10 000
Расстояние Земля—Солнце	$1,5 \cdot 10^8$ »	1000 000
Расстояние Солнце—Сириус	10^{14} »	10 000
Размер Галактики	10^{18} »	10
Расстояние до ближней галактики	10^{19} »	10 000
Размер Вселенной	10^{23} »	

Теперь мы пришли к концу «лестницы расстояний». Каждый шаг приводил к большим расстояниям. В большинстве случаев мы получали возрастание в 10 000 раз. Такой шаг легко воспринимается нами; он становится наглядным, если мы вспомним, что длина руки человека в 10 000 раз больше толщины волоса, а рост человека примерно во столько же раз меньше расстояния в 10 км. Даже множитель в один миллион, который определяет расстояние до ближайшей звезды по сравнению с расстоянием от Земли до Солнца, можно сделать наглядным: расстояние Сириус — Земля настолько же больше расстояния

Солнце — Земля, во сколько длина 100 м больше толщины волоса. Однако наше воображение изменяет нам, когда мы пытаемся охватить всю «лестницу расстояний». Огромные размеры всей видимой Вселенной слишком велики, чтобы представить их какими-либо земными размерами. Тем величественнее достижения человеческого разума, создавшего такие понятия и представления, которые позволили постичь колоссальные размеры Вселенной. Французский философ Блез Паскаль сказал: «Не огромность мира звезд вызывает восхищение, а человек, который измерил его».

НАШЕ МЕСТО ВО ВРЕМЕНИ

ВОЗРАСТ ЛАНДШАФТА

Каков возраст мира? Мы непосредственно ощущаем промежутки времени, встречающиеся в нашей жизни. Кратчайший промежуток времени, который мы можем ощутить, примерно равен одной десятой секунды. Это длительность щелчка пальцами. Естественные единицы времени, с которыми мы имеем дело в повседневной жизни, суть день и год; кроме того, мы понимаем, что имеется в виду, когда говорят о длительности человеческой жизни. Памятники письменности позволяют нам вернуться к событиям давностью до 5000 лет. Это возвращает нас к эпохе шумерской цивилизации, древнейшему периоду, оставившему эти памятники. Итак, 5000 лет — это наиболее длинный период, на который распространяется прямой опыт человека. Если мы хотим изучить хронологию событий, предшествовавших истории человека, надо применить непрямые методы.

Крупные природные образования вокруг нас — холмы, реки, океаны, равнины и т. д. — мало изменились за эти 5000 лет. Но существовали ли они вечно? Очевидно, нет. Ветер и непогода работали над ними.

Возьмем, например, такую гору, как Маттерхорн, находящуюся в Альпах между Италией и Швейцарией. Она возвышается непосредственно над окружающей ее местностью примерно на 2000 м и в основании имеет около 2000 м. Следовательно, она состоит, грубо говоря, из $2 \cdot 10^9 \text{ м}^3$ горных пород. Площадь склонов равна, тоже по грубой оценке, 10^7 м^2 . Капризы погоды — дождь, лед и бури — по-

степенно отламывают здесь и там кусочки породы, в основном вследствие замерзания воды в трещинах, и вся громада постепенно разрушается. Сколько времени должно пройти, чтобы совсем разрушить гору и сравнять ее с окружающей местностью? Сделаем простой расчет. Разумно предположить, что в среднем от каждого квадратного метра породы в год отламывается кусок размером в несколько сантиметров. Следовательно, за один год с Маттерхорна осыплется примерно 10^3 м³ породы. Через миллион лет половина горы разрушится. Жизнь такой горы, как Маттерхорн, должна длиться около нескольких миллионов лет.

К аналогичным выводам мы приходим, изучая количество наносов, которое выносится реками в моря. Можно измерить количество измельченной горной породы, песка и почвы, увлекаемое дождями с земли и переносимое реками в моря за год. Если равномерно распределить это количество по всей площади, с которой его собирает вода, текущая в реках, то получится весьма тонкий слой, толщиной около $1/300$ см. Однако за миллион лет это даст слой толщиной 30 м. Так как уносимая реками порода не поступает равномерно отовсюду, а только с тех участков, где есть уклон, мы видим, что за миллион лет дожди и непогода могут уничтожить холмы во много сот метров высотой и существенно изменить ландшафт. Итак, можно считать, что возраст ландшафта, который мы видим вокруг себя, достигает миллионов лет.

Выветривание и размывание — это разрушительные силы, выравнивающие поверхность Земли. Если бы на нее не действовали другие силы, весь мир был бы плоским, так как горы и холмы были бы разрушены за несколько миллионов лет. Однако работают и восстанавливающие силы, которые медленно, но постоянно изменяют поверхность Земли. Внутренние части Земли все время находятся под высоким давлением, так как на них давят вышележащие наружные слои. Иногда это давление уменьшается в одном месте или увеличивается в другом (рис. 8). Изменения давления приводят к смещению поверхности вверх и вниз, при этом образуются высокие

платó и глубокие впадины. Иногда возникают боковые смещения, тогда поверхность Земли искривляется и образуются горные кряжи и долины, как на куске материи, если сдвигать ее с двух противоположных сторон. Непрерывно происходит смена горообразования и последующего разрушения гор в результате эрозии. Мы живем в период, отделенный только несколькими миллионами лет от времени весьма интенсивного горообразования; вот почему

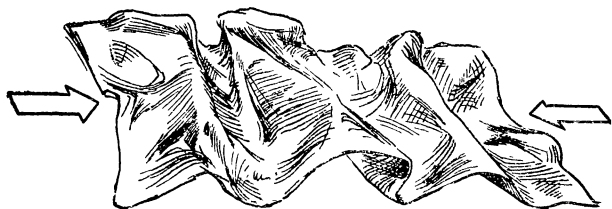


Рис. 8. Поверхность Земли подобна куску ткани

поверхность Земли покрыта в настоящее время горами столь разных размеров. Так, через 50 миллионов лет Земля станет значительно плосче и однообразнее, если за это время не произойдет никаких новых горообразовательных процессов.

РАДИОАКТИВНОСТЬ — ЧАСЫ ВСЕЛЕННОЙ

Сколько времени продолжалась эта смена горообразования и атмосферной эрозии гор? Как измерить промежутки времени, в течение которых совершались великие геологические события? Для этой цели мы должны применить естественные часы, которые идут так медленно, что по ним можно прочесть долгие промежутки времени. К счастью, природа снабдила нас очень медленным, мерно идущим процессом, который можно использовать для измерения времени. Речь идет здесь о явлении радиоактивности, странном явлении, открытом в 1896 г. французским ученым Анри Беккерелем. Но как же радиоактивность можно использовать в качестве часов?

Когда была открыта радиоактивность, она казалась весьма загадочной, так как опровергала искон-

ную веру всех ученых в неизменяемость химических элементов ¹⁾). Явление радиоактивности показало, что некоторые элементы изменяются. Радиоактивное вещество превращается в другое вещество. Атомы таких элементов распадаются, испуская лучи, и становятся атомами других элементов.

В качестве примера рассмотрим радиоактивный рубидий. Рубидий — сравнительно редкий металл, сходный с натрием и калием. В природе найден рубидий двух сортов (два «изотопа»). Они отличаются друг от друга по весу: один имеет атомный вес ²⁾ 85, другой — 87; радиоактивен более тяжелый изотоп. Кусок чистого Rb^{87} испускает характерное для него излучение, природа которого для нас сейчас несущественна. (Этот элемент представляет большой интерес для медиков, так как может применяться для лечения рака.) Важнее всего тот факт, что атом Rb^{87} превращается в атом другого элемента, а именно в атом стронция. Это превращение происходит медленно и непрерывно, с постоянной скоростью, и его нельзя ни ускорить, ни замедлить каким-либо внешним воздействием. Каждый год известная часть рубидия превращается в стронций. Для Rb^{87} эта часть чрезвычайно мала, она составляет только $1,6 \cdot 10^{-11}$ в год ³⁾). Это значит, что за год в стронций превращается одна сотая от миллиардной части Rb^{87} . Большинство природных радиоактивных веществ превращается столь же медленно. «Постоянная распада» урана равна $2 \cdot 10^{-10}$ в год, т. е. за год превращаются только две десятиллиардные части урана. Калий 40, тоже радиоактивный элемент, имеет постоянную распада, равную $0,7 \cdot 10^{-9}$ в год.

¹⁾ Химические элементы — это материалы, из которых построены все вещества. Элементами являются железо, золото, кислород, сера, углерод и т. д. Мы узнаем о них гораздо больше в гл. III. Явление радиоактивности значительно подробнее рассмотрено в гл. VII.

²⁾ Атомным весом элемента называется вес его атома, выраженный через вес наиболее легкого атома — водорода. Атом Rb весит в 85 раз больше атома водорода.

³⁾ Здесь мы пользуемся отрицательными степенями, чтобы выразить очень малые числа. 10^{-1} означает 0,1; 10^{-2} означает $\frac{1}{10} \cdot \frac{1}{10} = \frac{1}{100}$; 10^{-11} означает $\frac{1}{10} \cdot \frac{1}{10} \dots$ и так одиннадцать раз. Еще можно сказать, что $10^{-11} = 0,00\dots 1$ с одиннадцатью нулями, считая нуль, стоящий перед запятой.

Наши знания о радиоактивности значительно углубились после изобретения ускорителей частиц до высоких энергий. В таких устройствах малые частицы ударяют с большими энергиями по атомам разных веществ и производят изменения в этих атомах. Например, при бомбардировке обычно нерадиоактивные элементы превращаются в новые элементы, которые, как правило, не встречаются в природе и очень часто радиоактивны. Таким способом можно производить новые, «искусственные» радиоактивные вещества, очень ценные для физических и медицинских исследований. Большинство из них превращается в другие элементы гораздо быстрее, чем естественные радиоактивные элементы. Например, можно получить радиоактивный натрий (атомный вес 24), который превращается в магний со скоростью 6 % в 1 час.

ВОЗРАСТ МАТЕРИИ

Теперь мы приходим к первому фундаментальному заключению о шкале космических времен: Земля не могла существовать бесконечно давно. На Земле есть объекты, которые не могли находиться на ней извечно. Если бы Земля существовала бесконечно длительное время, мы не могли бы обнаружить на ее поверхности радиоактивных веществ, таких, как Rb^{87} , уран и калий. Действительно, если бы возраст Земли был гораздо больше, чем 10^{10} лет, все естественно-радиоактивные вещества, которые мы перечислили, распались бы почти полностью в свои дочерние продукты и их нельзя было бы обнаружить. Мы должны предположить, что процесс, в котором образовались эти элементы, больше не продолжается.

Каков же тогда возраст Земли? Рассматривая постоянные распады природных радиоактивных веществ, мы видим, что все они меньше одной миллиардной в год. Искусственные же радиоактивные материалы, которые мы производим сами, имеют, однако, всевозможные постоянные распады. У некоторых из них постоянные распады очень малы (миллионные доли в год), у других распад происходит очень быстро — например, половина вещества распадается

за десятые доли секунды. Найдены всевозможные скорости распада в этих пределах. Однако в природе встречаются только элементы со скоростью распада меньше нескольких биллионных ¹⁾ долей в год. Объяснение очень просто: элементы, распадающиеся быстрее, не встречаются в природе потому, что они уже успели распасться ²⁾ за время существования Земли.

Отсюда мы заключаем, что материал, составляющий Землю, существует в его нынешнем состоянии несколько миллиардов лет, во всяком случае не многим более. Естественный радиоактивный элемент с наименьшим временем распада, K^{40} (скорость распада — одна миллиардная в год), почти израсходовался; его содержание в естественном калии очень невелико (0,12 %). Поэтому «возраст» материала, составляющего нашу Землю, должен несколько превышать миллиард лет, быть может, он в 5 или в 10 раз больше, но не многим более.

Это был знаменательный момент в истории нашего познания мира, когда здесь, на Земле, мы нашли доказательство того, что Земля не существует извечно. Радиоактивные вещества — это только маленькая часть материала Земли. Они встречаются исключительно редко. Но само их существование свидетельствует о каком-то начале.

Что же происходило в этом начальном периоде? Конечно, Земля не могла находиться в состоянии, напоминающем нынешнее. В то время вещество, из которого состоит Земля, должно было находиться в условиях, обеспечивающих образование радиоактивных элементов. Такие условия мы создаем в

¹⁾ По английской терминологии биллион = 10^9 .

²⁾ Можно указать интересные исключения из этого правила, которые показывают, как легко ошибиться при неверном подходе. В природе существует некоторое количество быстро распадающихся веществ. Однако все они представляют собой «дочерние продукты» медленно распадающихся элементов. Вот что это значит. Иногда продукт радиоактивного распада сам радиоактивен и превращается в какой-то третий элемент. Такой продукт называется «дочерним». Если распад первого идет очень медленно, а распад второго, дочернего, быстро, в природе всегда будет наблюдаться быстрый распад, следующий за медленным.

наших больших ядерных ускорителях. Частицы и атомы должны были обладать огромными энергиями, их плотности достигали колоссальных величин, и сами они сталкивались друг с другом на больших скоростях. Температуры, при которых создаются эти условия, имеют порядок 100 миллионов градусов. У нас есть веские основания полагать, что такие условия существуют в центрах звезд, но не при обычных обстоятельствах, а когда звезды становятся неустойчивыми и взрываются. Взрывающиеся звезды называются новыми, потому что они внезапно появляются на небе и быстро, за несколько месяцев, тускнеют. Они встречаются не так уж редко. С помощью наших гигантских телескопов мы ежегодно можем найти 20 или 30 таких звезд среди 50 000 000 000 звезд Галактики ¹⁾).

Итак, мы приходим к заключению, что материал, из которого состоит Земля, должен был подвергаться огромному ускорению и нагреванию (вероятно, во взрывающихся звездах) в период, закончившийся 5—10 миллиардов лет назад. Мы можем считать, что эти процессы обеспечили создание элементов, из которых состоит наше окружение ²⁾. К этому времени относится образование многих радиоактивных и нерадиоактивных элементов, в том числе тех, которые мы можем сделать в наших ускорителях, а также некоторых других. Но с тех пор радиоактивные вещества с короткими временами распада давно распались и превратились в устойчивые, стабильные, элементы. Немногие долгоживущие естественные радиоактивные вещества — это последние свидетели того богатого событиями времени, когда образовались элементы — те элементы, из которых состоит Земля. Это последние искры, оставшиеся после величественного космического пожара, который 10 миллиардов лет назад создал элементы, окружающие нас на Земле.

¹⁾ Вероятность взрыва обычной звезды, такой, как Солнце, не очень велика. Это случается один раз за несколько миллиардов лет. Последний взрыв в нашем окружении (в радиусе 1000 световых лет) произошел в 1750 г.

²⁾ Образование элементов в звездах рассмотрено в гл. IX.

ДАВНОСТЬ СОБЫТИЙ В ИСТОРИИ ЗЕМЛИ

Более подробный анализ процесса распада естественных радиоактивных элементов позволяет нам определять давность событий, происходивших значительно позже образования элементов. В большинстве случаев минерал, содержащий естественный радиоактивный элемент, содержит и продукт его распада. Например, в горной породе, содержащей рубидий, находится также и стронций, элемент, в который превращается радиоактивный рубидий. Сравнивая относительные количества обоих элементов в образце, мы можем определить, сколько времени рубидий находился в этой породе, или, другими словами, найти время, прошедшее с момента ее затвердевания. Расчет весьма прост. Каждый год $1,6 \cdot 10^{-11}$ часть рубидия превращается в стронций, и отсюда можно заключить, сколько лет понадобилось, чтобы получилось наблюдаемое количество стронция.

Здесь есть только одна трудность. Не обязательно весь стронций в природе был раньше рубидием. В нее мог попасть стронций с самого начала. Есть очень изящный способ преодоления этой трудности. Стронций, образовавшийся из рубидия, — это особый стронций, а именно Sr^{87} . В обычном, природном стронции содержится только 12 % изотопа Sr^{87} , основная его часть состоит из изотопа Sr^{88} ¹⁾. Следовательно, нам нужно только измерить долю Sr^{88} в нашем образце. Если Sr^{88} отсутствует, то, значит, весь стронций образовался из рубидия. Если в нем содержится Sr^{88} , то мы знаем, сколько обычного стронция находилось в образце, и можем определить, сколько Sr^{87} образовалось вследствие радиоактивного распада.

Такие же измерения можно произвести с образцами горных пород, содержащими другие естественные радиоактивные элементы. Для этой цели широко использовалась радиоактивность калия и урана.

Естественные радиоактивные материалы являются не только свидетелями рождения Земли, их

¹⁾ Символы Sr^{87} и Sr^{88} означают атомы, которые в 87 и в 88 раз тяжелее водородного атома. Числа 87 и 88 суть атомные веса изотопов стронция.

медленный, но мерно идущий распад позволяет измерять прошедшее время.

Измерение содержания продуктов радиоактивного распада, например стронция, образовавшегося из рубидия, позволило определять давность событий, которые попадают в неизученный период между миллионами лет (эрозия поверхности Земли) и многими миллиардами лет (образование элементов).

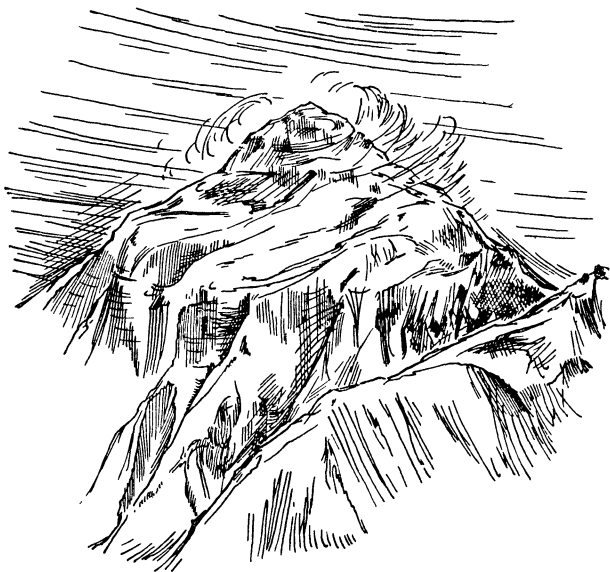


Рис. 9. Вершина К2 в Гималаях (8470 м), которая считается второй по высоте в мире.

Когда бы ни произошло образование новых гор, когда бы ни начали накапливаться морские отложения, в радиоактивных элементах, содержащихся в таких веществах, начинают накапливаться продукты их распада, и, измеряя содержание накопившегося продукта, можно найти время наступления данного события. Это позволяет нам с разумной точностью определять давность геологических событий. Мы нашли, например, что Альпы и Гималаи весьма молоды, их возраст — всего лишь несколько миллионов лет (рис. 9). Скалистые горы в их настоящем

виде старше, им около 60—100 миллионов лет. Возраст плоских хребтов Аппалачских гор приблизительно равен 250—300 миллионам лет, хотя действительная форма отдельных вершин на их поверхности неоднократно менялась с тех пор.

Возраст старейших горных пород, найденных до сих пор, достигает 2,6 миллиарда лет. Поэтому Земля никак не может быть моложе. По-видимому, она старше, но то, что теперь является поверхностью нашей планеты, изменилось так сильно, что теперь уже нельзя найти более древних пород. Различные слои горных и осадочных пород содержат окаменелые останки животных и растений. Таким образом, «расписание», или шкала времен, геологических формаций попутно дает и шкалу времен для развития жизни (рис. 10). Мы нашли, что старейшие следы жизни насчитывают примерно 600 миллионов лет и принадлежат водорослям и губкам. Очевидно, что раньше должны были также существовать более примитивные формы жизни, но они не оставили никаких следов в горных породах. По оценкам, примитивные бактерии должны были жить не менее миллиарда лет назад. Находят рыб и моллюсков, существовавших 300 миллионов лет назад, пресмыкающиеся появились примерно 275 миллионов лет назад. Им должно было предшествовать появление деревьев и цветов, которые существуют уже около 400 миллионов лет. Млекопитающие развились только 150 миллионов лет назад, а человек существует едва лишь миллион лет. Так радиоактивные часы помогли нам датировать и развитие различных форм жизни.

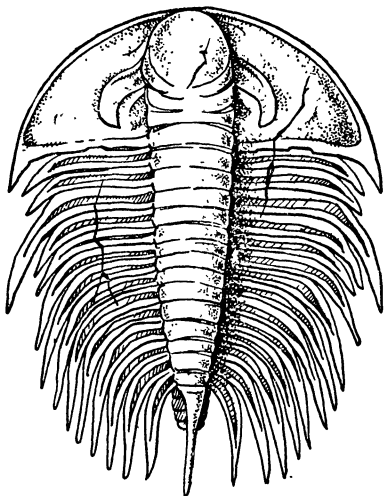


Рис. 10. Трилобит (*Olenellus*).
Кембрийский период.

ВОЗРАСТ ЗЕМЛИ И ПЛАНЕТ

То и дело из внешнего пространства в атмосферу влетают куски вещества. Большинство этих объектов — они называются метеоритами, — попадая в атмосферу, испаряется вследствие сильного разогрева, наступающего при очень быстром их движении в воздухе. Но некоторые большие частицы достигают поверхности Земли (рис. 11). Эти объекты, а

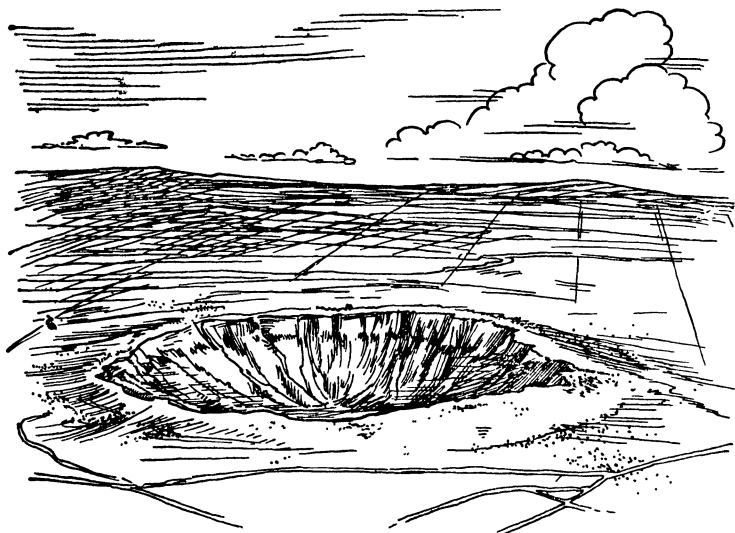


Рис. 11. Метеоритный кратер в пустыне Аризона. Вероятно, этот метеорит упал несколько десятков тысяч лет назад.

Диаметр кратера — около 1200 м, глубина 195 м. Кратер образовался при падении огромного метеорита, состоящего из железа и никеля.

также пути, по которым они пришли, подвергались внимательному изучению. Возможно, что метеориты не приходят очень издалека. Быть может, это раздробленные остатки одной или нескольких малых планет, разрушившихся когда-то, на заре образования нашей солнечной системы.

Возраст пород, составляющих метеориты, должен быть близок к возрасту самой солнечной системы; они возникли, вероятно, тогда же, когда из

вещества «образовались» Солнце и планеты. Поэтому, определяя возраст обломков, мы, вероятно, узнаем и возраст нашей солнечной системы, или время образования планет. К счастью, метеориты иногда содержат следы радиоактивных веществ и продуктов их распада. Данные о количестве этих продуктов можно использовать для того, чтобы узнать, сколько времени радиоактивный элемент распадался в частице вещества в межпланетном пространстве. Полученные результаты хорошо согласуются друг с другом: все метеориты имеют, по-видимому, одинаковый возраст — около 4,5 миллиарда лет. Отсюда мы должны заключить, что столько же времени прошло с тех пор, как вещество «собралось» в Солнце и планеты нашей солнечной системы. Очень возможно, что столько же времени Земля и другие планеты существуют в виде больших шаров, обращающихся вокруг Солнца ¹⁾).

ВОЗРАСТ ЗВЕЗД

Можем ли мы определить возраст других звезд? Мы больше не можем применять радиоактивные часы, так как вещества, находящиеся вне солнечной системы, не достигают Земли. Наше единственное средство связи — свет. Однако, несмотря на отсутствие прямого контакта, астрономы пытались получить некоторую косвенную информацию о возрасте звезд. Иногда можно прийти к приближенным оценкам, тщательно исследуя цвет и яркость звезды и применяя наши новые представления о процессах,

¹⁾ Возраст пород, составляющих метеориты, определенный по естественной радиоактивности, действительно близок к 4,5 миллиарда лет. Однако возраст самих метеоритов, как обломков, обычно гораздо меньше. В межпланетном пространстве на вещество метеоритов действует космическое излучение, состоящее из частиц с энергией 10^{10} электронвольт (т. е. с такой же энергией, как и у частиц в самых мощных ускорителях) и более. Под действием космических лучей в теле метеоритов образуется из ядер тяжелых элементов легкий изотоп гелия He^3 . По содержанию этого изотопа, которое очень мало в естественном гелии, судят о том, насколько долго метеорит подвергался облучению. Оказалось, что возраст каменных метеоритов исчисляется миллионами лет, железных — сотнями миллионов. (Прим. перев.)

обеспечивающих создание запаса той огромной энергии, которая необходима для длительного поддержания свечения звезды ¹⁾. Отсюда находят, что возраст большинства звезд также измеряется миллиардами лет. Возраст некоторых групп звезд, вероятно, достигает 20—30 миллиардов лет ²⁾, другие, по-видимому, моложе. Точно так же, как год служит удобной единицей для измерения длительности жизни человека, миллиард лет удобен для измерения возраста звезд. Старейшие породы на Земле насчитывают 2,6 миллиарда лет; солнечная система образовалась 4,5 миллиарда лет назад; наши естественные радиоактивные вещества образовались в звездных взрывах 5—10 миллиардов лет назад, и возраст большинства звезд также лежит в этих пределах.

Расширение Вселенной, которое мы рассматривали в предыдущей главе, тоже дает масштаб времени, в течение которого развивалась Вселенная: в настоящее время мы видим непрерывно удаляющиеся от нас галактики, причем их скорость тем больше, чем дальше они находятся. Мы можем задать вопрос: если верно, что галактики удаляются друг от друга, то не было ли такого времени, когда они располагались теснее? Действительно, если расширение Вселенной происходило с той же скоростью, что и сейчас, то когда-то все галактики должны были находиться в одном месте. Поэтому их расширение, которое мы видим сейчас, не могло идти извечно. Когда же было это время скопления галактик? Напомним, что скорость удаления галактик примерно равна 30 км/сек на каждый миллион световых лет расстояния. Здесь весьма важно, что на прохождение миллиона световых лет со скоростью 30 км/сек требуется 10 миллиардов лет. Это значит, что расширение галактик не могло начаться при той же скорости намного раньше, чем 10 миллиардов лет назад. Проследивая расширение в обратном направлении, мы должны заключить, что в какое-то время все галактики были сосредоточены, грубо говоря, в одном месте.

¹⁾ Этот вопрос рассматривается в гл. V.

²⁾ 30 или даже 20 миллиардов лет никак не согласуются с оценками, которые делает автор на основе данных о расширении Вселенной. (*Прим. перев.*)

Мы снова получаем период, аналогичный другим космическим временам жизни. Что это значит для нас? Немногим более следующего: видимая Вселенная и материя, которую она содержит, 10 миллиардов лет назад были совсем не такими, как сейчас. Мир, как мы его знаем теперь, с составляющим его веществом, с его звездами и планетами, галактиками и системами галактик, существует 10 миллиардов лет. Сегодня никто не знает, в каком состоянии мир был ранее. Вещество, звезды и галактики возникают и исчезают. Все, что мы знаем, это общая длительность процесса — 10 миллиардов лет ¹⁾).

«Лестница времен»

Кратчайший интервал, различимый ухом	0,1 сек
День	10^5 сек
Длительность жизни человека	10^9 сек = 100 лет
Возраст цивилизации	10^4 лет
Длительность существования человека	} 10^6 лет
Существенное изменение ландшафта	
Длительность существования млекопитающих	} 10^8 лет
Возраст Скалистых гор	
Длительность существования жизни	$2 \cdot 10^9$ лет
Возраст ряда горных пород	} $4,6 \cdot 10^9$ лет
Возраст Земли	
Возраст вещества ближайших звезд (включая Солнце)	$5-10 \cdot 10^9$ лет
Возраст Вселенной	$10-20 \cdot 10^9$ лет

Если возраст Вселенной принять за один день, то человечество существует только последние десять секунд.

¹⁾ Согласно выводам космологии, основанным на общей теории относительности, само понятие времени не может быть экстраполировано в обратном направлении более чем на 10 миллиардов лет. Это в таком же смысле наибольший физически определимый интервал времени, как 20 000 км — наибольшее расстояние на земной поверхности. Поэтому лишен смысла самый вопрос, «что было до расширения»: нельзя определить, что такое «до». (Прим. персв.)

ДВЕ СИЛЫ ПРИРОДЫ

В главах I и II мы соорудили во времени и в пространстве подмости, на которых разворачиваются все события в нашем мире. Теперь посмотрим, что же это за события. Мы видим несметное множество объектов, претерпевающих непрерывное изменение и движение на небе и на Земле и обладающих различными свойствами и качествами; среди этих объектов мы находим любые: от самых простых — газов, жидкостей и твердых тел — и до таких сложных, как растения, животные и человек. Поведение всех этих форм материи очень сложно и запутано. И все же мы можем отметить некое подобие порядка в природе. Несмотря на постоянное изменение и движение, мы замечаем сходство между различными объектами, мы разбиваем их на классы и называем их. Материалы, из которых состоят эти объекты, можно разделить по типам, таким, как горные породы, металлы, жидкости, органические вещества и т. д. Эти вещества сильно отличаются по своим свойствам, но мы везде видим одни и те же металлы, горные породы, органические вещества и т. п. Кусок золота остается таким же, где бы на Земле его ни нашли. В мире живого мы тоже находим сходства и тождества. Они поразительным образом коренятся в том, что мы называем видами; мы находим бактерии, деревья, цветы, животных, в пределах каждой такой группы мы видим общие свойства и безошибочно относим всех представителей любой группы к определенному виду. Такие закономерности мы и хотим понять. Мы хотим знать, почему в природе существуют специфические формы, почему эти формы именно таковы, почему они ведут себя именно так,

как мы это видим. Для начала, однако, надо изучить некоторые простые свойства природы, которые не носят специфического характера и одинаковы для всех объектов. Настоящая глава посвящена двум таким вопросам — вопросу о тяготении и вопросу о свете.

ТЯГОТЕНИЕ НА ЗЕМЛЕ И В НЕБЕ

Тяготение — хорошо известная на Земле сила. Все предметы вокруг нас, большие и малые, притягиваются Землей: они падают вниз, если только их что-либо не поддерживает. Притяжение каждой частицы вещества Землей есть наиболее известный пример действующей в природе силы. Однако понадобились колоссальные усилия и целые столетия работы мысли прежде, чем человечество поняло, что движение Луны вокруг Земли и планет вокруг Солнца основано на той же силе. Ученые долго считали, что законы, управляющие движением небесных тел, весьма отличны от законов, действующих на Земле. Универсальность законов природы, их справедливость для всей Вселенной были поняты только после Исаака Ньютона.

Луна и планеты не падают ни на Землю, ни на Солнце; как же их движением может управлять сила тяготения? Существует большой разрыв между нашим земным опытом, согласно которому тела падают на Землю, и картиной движения тел по орбитам вокруг какого-то центра в небе (Луна обращается вокруг Земли, планеты — вокруг Солнца). Перекинуть мост от одного к другому — означало сделать решающий шаг в понимании Вселенной. Посмотрим, как это делается.

Предположим, что мы находимся на верхушке очень высокой башни и горизонтально бросаем в пространство камень (рис. 12). Путь камня изогнется к Земле из-за силы тяжести, и камень упадет на некотором расстоянии от башни. Чем сильнее мы бросим камень, тем более плавно изогнется его путь. Представим себе бросок такой силы, что изгиб траектории будет как раз равняться кривизне земной поверхности, которая, как известно, сферична. В

этом случае камень никогда не достигнет Земли, потому что, насколько искривится траектория, настолько же искривляется и поверхность Земли. Мы забросили камень за горизонт. Если бы воздух не замедлял полета, камень кружился бы вокруг Земли как спутник. На этом, конечно, и основан принцип

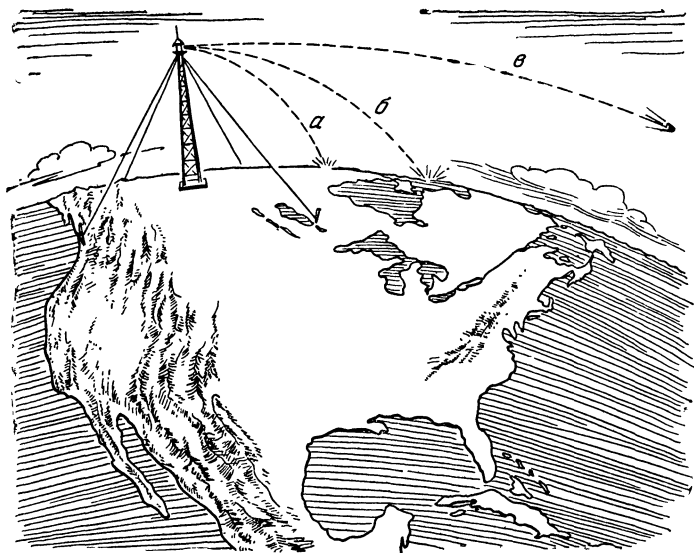


Рис. 12. Траектории камня, брошенного с башни.
Траектории *a*, *b* и *v* отвечают бросанию с возрастающей силой.
Траектория *v* никогда не достигнет Земли.

запуска спутников ракетами. В типичном случае первая ступень ракеты поднимает спутник над атмосферой, а вторая — сообщает ему толчок в горизонтальном направлении. Горизонтальная скорость, необходимая для облета Земли по круговой орбите, примерно равна 8 км/сек. Итак, мы видим, каким образом падение может перейти в горизонтальный полет объекта по орбите вокруг Земли, если этот объект получит достаточно сильный горизонтальный толчок.

Посмотрим теперь на орбиту тела вокруг центра притяжения несколько иначе. Когда планета вра-

щается вокруг Солнца, сила тяготения сохраняет орбиту круговой, точно так же, как груз на веревке движется по кругу, если вы вращаете его, держа веревку за другой конец. Сила притяжения уравнивается центробежной силой, которая при круговом движении стремится столкнуть тело с орбиты наружу.

Центробежная сила (натяжение веревки) тем больше, чем больше оборотов в секунду совершает тело. Она увеличивается также и с удлинением радиуса и, разумеется, пропорциональна массе тела. Легко вычислить центробежную силу, действующую на каждую планету, так как нам известно ее расстояние от Солнца и время обращения.

Центробежная сила точно уравнивается силой тяготения; поэтому, если мы вычислим центробежную силу на орбите, то тем самым найдем и силу тяготения. Таким способом Ньютон определил силу притяжения планет к Солнцу и спутников планет к самим планетам. Он нашел, что сила тяготения следует очень простому закону: притяжение двух тел прямо пропорционально произведению их масс и обратно пропорционально квадрату расстояния между ними. Например, расстояние между Венерой и Солнцем составляет 0,7 расстояния от Земли до Солнца. Для того чтобы удержать Венеру на орбите при заданном известном времени ее обращения, сила притяжения Венеры к Солнцу должна быть примерно вдвое больше, чем сила притяжения к нему Земли ¹⁾). Это отвечает обратной пропорциональности квадрату расстояния, так как $(0,7)^2 \approx 1/2$. Так человек вычисляет силу, действующую далеко вне пределов его опыта, силу на небесах.

Чтобы увериться во всеобщности силы притяжения между Солнцем и планетами и доказать, что такая сила действует между любыми двумя массами, надо показать, что таким же способом притягиваются два свинцовых слитка или любые два объекта и что сила их взаимодействия уменьшается, как квадрат

¹⁾ Не надо беспокоиться о различии масс Венеры и Земли (в нашем примере они случайно почти одинаковы); при наших вычислениях массы сокращаются.

расстояния между ними, и прямо пропорциональна произведению масс. Конечно, сила притяжения двух слитков свинца друг к другу чрезвычайно мала, так как их массы очень малы по сравнению с массами небесных тел. Если каждый слиток весит 45 кг, то действующая между ними сила на расстоянии 30 см так же мала, как и сила притяжения к Земле массы в 0,004 г. Однако эта сила была измерена, и результаты подобных измерений подтвердили справедливость и универсальность закона тяготения.

ВСЕОБЩНОСТЬ ЗАКОНА ТЯГОТЕНИЯ

Открытый Ньютоном закон тяготения объяснил движение планет по орбитам. Он положил конец древней любимой мечте многих философов. Они мечтали найти чрезвычайно важный смысл в действительных размерах орбит и в длительности периодов обращения планет. Можно было ожидать, что радиусы планетных орбит находятся в простых соотношениях, например, что при переходе от одной планеты к другой радиус каждый раз удваивается или что между ними существует какая-либо иная числовая закономерность. Философы-пифагорейцы, например, придавали особое значение численным отношениям между параметрами небесных орбит и видели в них смысл своей системы. В этих отношениях заключалась «гармония сфер»; предполагалось, что она отражает присущую небесному миру симметрию, в противоположность земному миру, полному беспорядка и начисто лишенному симметрии. Предполагалось, что гармоническая смена небесных движений производит музыку, слышимую духовным ухом и служащую проявлением божественного порядка Вселенной. Даже Кеплер, чей анализ планетных движений привел к открытию закона тяготения, настойчиво пытался объяснить наблюдаемые размеры орбит и для этой цели предложил гипотезу о Вселенной, построенной по модели правильных твердых тел — сферы, куба, тетраэдра и т. д.; одно вписывалось в другое и задавало одну из орбит на основе какого-то глубокого, фундаментального, всеобъемлющего принципа (рис. 13).

Ньютон показал всю несостоятельность этих представлений. Основным принципом, управляющим движением планет, служит закон тяготения. Он определяет орбиты планет лишь постольку, поскольку

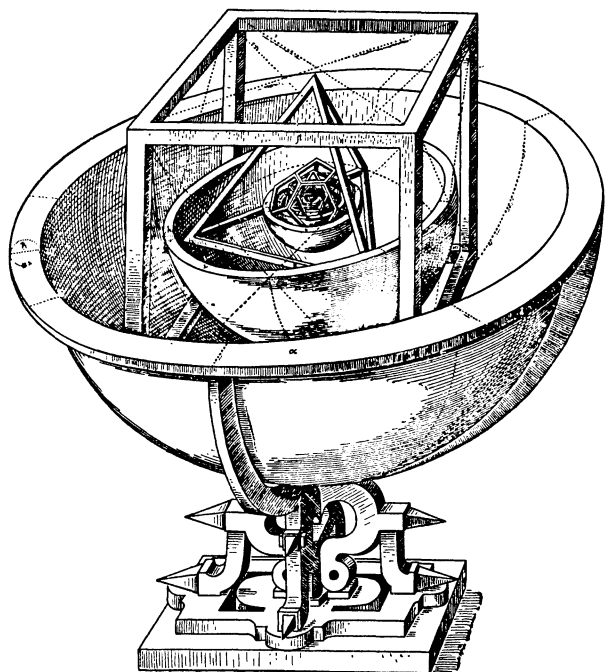


Рис. 13. Устройство Кеплера.

Модель Вселенной Кеплера, показывающая положение планет по отношению к различным геометрическим образам.

требуется, чтобы они были окружностями или эллипсами с Солнцем в центре или в фокусе, и устанавливает специальное соотношение между радиусом (или большой осью эллипса) и периодом обращения. Однако этот принцип не предписывает какого-либо специального размера или радиуса орбиты. Действительно, истинный ее размер зависит от условий в начальный период, т. е. в период образования солнечной системы, и от последующих взаимных возмущений орбит. Если бы, например, Земля получила вначале иную скорость, то она вращалась бы по

большей орбите. Мало того, если бы вблизи нашей солнечной системы прошла другая звезда, все планетные орбиты изменились бы, и после встречи соотношения между их размерами и периодами стали бы совсем иными.

Отсюда мы видим, что наблюдаемые в настоящее время размеры орбит не имеют большого значения. Они могли бы оказаться и совсем другими, но это не повлекло бы за собой нарушения законов физики. Фундаментальный закон тяготения определяет только общий характер явления. Он допускает непрерывное множество воплощения орбит. Параметры истинных орбит зависят от влияний, которые действовали раньше их установления и без всякого вмешательства извне. Размеры наблюдаемых сегодня орбит, быть может, обуславливаются какими-либо специальными причинами, например какими-либо особыми условиями, преобладавшими при образовании солнечной системы, или влиянием проходивших звезд, но в этих размерах нет никакого особого фундаментального значения. Мы полагаем, что планеты другой звезды движутся по совсем другим орбитам, даже если эта звезда близка к Солнцу по своему строению и размерам.

Благодаря своей всеобщности сила тяготения действует за пределами солнечной системы и даже за пределами нашей Галактики. Звезды каждой галактики влияют друг на друга вследствие действия сил притяжения, и каждая галактика притягивает другие галактики. Поэтому движением звезд и галактик управляет их взаимное притяжение. Мы пока еще мало знаем об этих движениях, так как их очень трудно наблюдать, и пришлось бы решать очень трудную задачу математического анализа, чтобы найти, как должны двигаться 50 миллиардов звезд под влиянием сил взаимного притяжения. Однако существуют очень веские данные, указывающие на то, что тот же общий принцип управляет движением всех звезд. Звезды, по-видимому, обращаются вокруг общего центра своей галактики таким же образом, как и планеты вокруг Солнца.

Определяются ли движения галактик тоже силами тяготения? Здесь мы приходим к еще не решенной

проблеме астрономии. Мы мало знаем об этом, нам известен лишь поразительный факт разбегания галактик — расширения Вселенной. Это движение, очевидно, не может обуславливаться тяготением; должно существовать какое-то другое, еще неизвестное объяснение ¹⁾).

СВЕТ

Есть ли что-нибудь, обладающее такой же всеобщностью, как свет? Свет, приходящий от Солнца к Земле, — основа нашего существования. Он приносит тепло и снабжает нашу планету почти всей получаемой ею энергией. Он заставляет расти растения, а ведь мы применяем их как топливо, в виде угля или нефти, или как пищу животных и людей. Единственным источником энергии, не приходящей в виде солнечного света, служат «темные» силы радиоактивности и деление урана. И наконец, — чем тоже нельзя пренебречь — в ярком свете Солнца природа встает перед нами во всей своей красе.

Как сказал Галилей, свет — единственный посланец звезд; он должен рассказать нам почти все, что мы когда-либо узнаем о Вселенной. Кроме скудных сведений, получаемых нами при изучении космических лучей и метеоритов, и того, что нам предстоит еще узнать из космических путешествий, мы не имеем иных сообщений из внеземного мира, кроме сообщений, даваемых светом.

Что такое свет? Ответ на этот вопрос был дан в одном из самых интересных построений физики прошлого века. Световые сигналы идут в пустом пространстве по прямым линиям с определенной постоянной скоростью, равной $3 \cdot 10^5$ км/сек. За то время, которое требуется, чтобы согнуть палец (0,1 сек),

¹⁾ Разбегание туманностей согласуется с более общим, эйнштейновским законом тяготения, в свете которого оно не выглядит загадочным. Возможность существования расширяющейся Вселенной была теоретически обнаружена А. А. Фридманом из уравнений общей теории относительности. После того, как Хаббл открыл красное смещение удаленных галактик, Леметр применил решение Фридмана к объяснению этого факта. В. Вайскопф считает вещество равномерно распределенным и равномерно расширяющимся (см. гл. I). Именно из этого допущения и вытекает решение Фридмана. (Прим. перев.)

свет успевает пройти расстояние, равное окружности Земли. Как мы говорили в гл. II, свету требуются минуты, чтобы в нашей солнечной системе пройти от планет до Солнца.

Что же происходит между источником и приемником при посылке светового сигнала из одной точки в другую? Сначала полагали, что источник испускает какие-то световые единицы, импульсы или частички, разного рода для разных цветов. Даже великий Ньютон считал, что свет состоит из частичек (хотя он старательно уклонялся от прямых утверждений). В XVII веке Христиан Гюйгенс (Голландия) предположил, что свет — это волновое движение, а Томас Юнг и Огюстен Френель в начале XIX века с несомненностью установили, что световой луч — это волна, распространяющаяся в пространстве.

Что же такое волна? Наиболее известный пример — это волны на воде, но ими не очень удобно пользоваться при рассмотрении световых волн, так как они распространяются по поверхности воды, а световые волны — в трехмерном пространстве. Однако изучение волн на воде помогает понять природу волн вообще.

Волна движется в каком-то носителе. Поверхность воды служит носителем волн на воде. В носителе происходят периодические колебательные изменения: например, поверхность воды движется вверх и вниз. Эти изменения таковы, что они распространяются и образуют характерную картину бегущих волн. Следует ясно понимать, что при распространении волны не происходит никакого перемещения материальной среды. Вместе с волной перемещаются только изменения картины на поверхности воды. Сама вода фактически не переносится. Однако волна может передавать действие от точки к точке. Если в одном месте сосуда сообщить толчок водной поверхности в известном направлении, то результирующая волна передаст этот толчок в другом его месте. Волны на воде могут передавать большие мощности, как мы это иногда видим по их действию на берег моря. Но масса воды не перемещается вместе с волной. Она только движется вверх и вниз, вперед и назад.

Другим примером, более близким к световым волнам, служит звуковая волна в воздухе. Колебательные изменения, которые претерпевает носитель, суть изменения давления воздуха. Если звук производит, скажем, громкоговоритель, то его поверхность движется взад и вперед, вызывая тем самым периодические увеличения и уменьшения давления в слое прилегающего к нему воздуха. Эти изменения бегут во все стороны, точно так же, как волны на поверхности воды, образующиеся при движении вперед и назад вашей руки в воде. Но в воде волны распространяются только на поверхности, а в воздухе — по всем направлениям в пространстве. Такое распространение периодических сгущений и разрежений воздуха и есть звуковая волна. Когда это колебание достигает уха, оно передает давление барабанной перепонке, заставляя ее колебаться так же, как и источник звука. Колебания барабанной перепонки мы и воспринимаем как звук. Чем меньше расстояние между гребнями и впадинами волны, или (что то же самое), чем чаще сменяются сгущения и разрежения, когда волна достигает уха, тем выше воспринимаемый нами звук. Расстояние между двумя последовательными гребнями (или впадинами) называется длиной волны, а число гребней, проходящих за 1 сек к уху (или проходящих мимо любой точки), называется частотой волны. Чем короче волна, тем больше ее частота.

Хотя Гюйгенс и не располагал большим количеством фактов, он еще в 1680 г. предположил, что свет есть волновое движение. Окончательное подтверждение того, что свет есть волна, принадлежит английскому ученому Томасу Юнгу, родившемуся в 1773 г. и первоначально изучавшему медицину. Он занимался проблемами света с 1800 г. и первый нашел решающие факты, показавшие, что свет есть волновое движение.

ПОЧЕМУ СВЕТ—ЭТО ВОЛНА?

Колебания, происходящие в световой волне, не воспринимаются непосредственно именно как колебания; в волновой природе света нас убеждают лишь

косвенные данные. И по сей день наилучшее ее доказательство принадлежит Юнгу. Его доводы основаны на явлении «интерференции». Этот эффект заключается в том, что при некоторых определенных условиях свет, складываясь со светом, дает темноту. Интерференция показывает, что свет есть волна, потому что этот эффект наблюдается тогда, когда гребень одной волны совпадает с впадиной другой. Погрузите по одному пальцу на каждой руке в воду и подвигайте ими, внимательно следя за двумя возникшими волнами, идущими навстречу друг другу. Вы увидите, что волны гасятся во всех местах, в которых гребень одной волны налагается на впадину другой.

Есть много способов демонстрации этого эффекта со световыми волнами. Один из хорошо известных эффектов — появление окрашенных полос или колец, наблюдаемых при растекании тонкого слоя нефти по поверхности воды. Такая же окраска часто видна и на краях масляных пятен на мостовой. В этих случаях свет от неба или от уличных фонарей отражается сначала от верхней поверхности пленки, а затем от нижней. Колебания в световом луче, отраженном от нижней поверхности масляной пленки, отстают от колебаний в луче, отраженном от верхней ее поверхности, на расстояние, равное удвоенной толщине пленки. Оба отраженных луча «интерферируют» следующим образом: если толщина пленки составляет четверть длины волны, второй луч отстает от первого на полволны¹⁾. Гребень волны, отраженной от одной поверхности, налагается на впадину в отраженной другой поверхностью волне, и получается темнота. В результате интерференции белый дневной свет становится после отражения окрашенным; ведь белый цвет есть комбинация всех цветов. Некоторым цветам соответствуют как раз такие длины волн, которые гасятся при отражении. Тогда окраска от-

¹⁾ Фактически и в совсем тонкой пленке при отражении света от ее внутренней поверхности возникает разность фаз в полволны между падающим и отраженным лучами, но для рассуждения автора это несущественно. (Прим. перев.)

раженного цвета будет определяться остающимися цветами ¹⁾).

Вы можете наблюдать интерференционные эффекты в простом опыте. Возьмите патефонную пластинку и, держа ее на уровне глаза, осветите ее лампой так, чтобы свет лампы падал на плоскость пластинки под весьма малым углом. Вы увидите цветной узор на краю пластинки около глаза. Световые лучи, отраженные от различных бороздок, интерферируют друг с другом, давая темные и яркие окрашенные полосы.

Другой пример того же явления показан на рис. 14. На нем мы видим, что происходит, когда острый край бросает тень на какую-либо поверхность. Световые лучи рассеиваются на краю экрана, как показано на рис. 14. Часть рассеянного света попадает

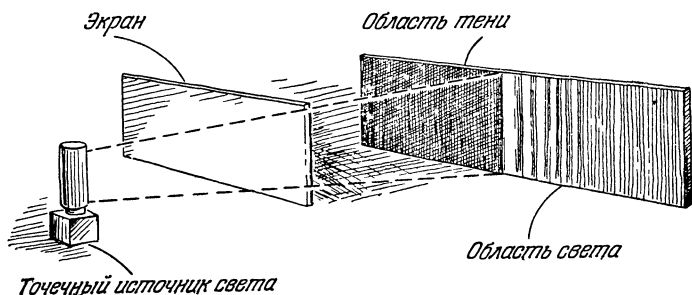


Рис. 14. Свет, падающий на экран, дает интерференционную картину.

в область тени, и поэтому близ ее края она оказывается несколько менее темной. Однако часть рассеянного света попадает в освещенную область, интерферируя там с прямым светом. Например, если рассеянный свет на своем пути к точке А проходит в обход пути, превышающий путь прямого луча на $1/2$ волны (или на $3/2$, или на $5/2$ волны и т. д.), то оба

¹⁾ Легко заметить, что кажущаяся окраска пленки меняется при наблюдении пленки под различными углами. Если свет проникает в масляную пленку под углом, различие между отраженными лучами меняется в зависимости от угла, а соответственно меняется и цвет взаимно гасящихся лучей.

луча дадут темноту (рис. 15). Поэтому около края тени мы получим темные полосы. Чем меньше длина волны, тем уже полосы. Обычно эти полосы не видны невооруженным глазом, но, как показано на фото II, их можно увидеть при помощи оптических инструментов.

Эти явления, а также многие другие явления того же характера убедительно доказывают волновую

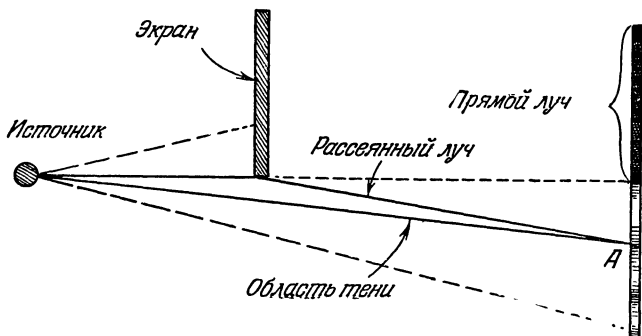


Рис. 15. Интерференция света.

Если прямой луч на $\frac{1}{2}$, $\frac{3}{2}$, $\frac{5}{2}$ и т. д. длины волны короче рассеянного луча (источник — край препятствия — точка А), то в точке А будет темнота. Это рис. 14, видимый сверху.

природу света. Они позволяют также измерять длину световой волны. Например, зная толщину такой нефтяной пленки, которая не отражает красного света, мы можем сказать, какова длина волны этого света. Подобные измерения показали, что длины волн видимого света лежат между $4 \cdot 10^{-5}$ и $8 \cdot 10^{-5}$ см, причем красный свет имеет наибольшую, а фиолетовый — наименьшую длину волны. Мы знаем скорость света и поэтому можем сказать, сколько раз в секунду проходят гребни или впадины волн мимо некоторой точки. Это число называется частотой света. Оно указывает число колебаний в секунду в световой волне. Красный свет имеет частоту $4 \cdot 10^{14}$ /сек, фиолетовый — около $8 \cdot 10^{14}$ /сек. Эти колебания происходят чрезвычайно быстро, и поэтому их нельзя наблюдать непосредственно.

После того, как мы установили волновую природу света, нам приходится рассмотреть важный вопрос:

каким типом волн являются световые волны? что служит их носителем и каковы те колебательные изменения, которые образуют волну? Ответ на этот существенный вопрос был получен в конце XIX века Джемсом Кларком Максвеллом и Генрихом Герцем. Совокупность идей и открытий, приведших к этому ответу, составляет одну из самых захватывающих глав в истории науки. Но прежде чем мы дадим ответ на поставленные выше вопросы, нам нужно познакомиться с двумя фундаментальными понятиями: электричеством и магнетизмом.

ЭЛЕКТРИЧЕСТВО

Поверхностное рассмотрение явлений природы не раскрывает важнейшей роли электричества. Единственные два безусловно электрических явления в природе — это молния и электризация трением. Если первое подавляет нас своей величественностью и разрушительной силой, то второе вообще не производит на нас никакого впечатления. Электризацию трением можно иногда увидеть: при трении предметов о какое-либо вещество они притягивают кусочки бумаги и частицы пыли, а прикосновение этих предметов к металлу приводит к появлению слабеньких электрических разрядов. Эти явления не кажутся столь же важными, как тяготение и свет, и поэтому до конца XVIII века их считали менее существенными, побочными. В наше время, конечно, роль электричества особенно подчеркивается его техническими приложениями; однако истинное значение электричества в природе вышло на передний план только в последнее время, в связи с развитием атомной физики, когда оказалось, что почти все явления, которые мы видим вокруг нас в природе, основаны на электрических силах и их действиях.

В первую очередь здесь следует отметить существование двух родов электричества. Предмет может быть заряжен электричеством как одного, так и другого рода. Они называются положительным и отрицательным электричеством, но в этих названиях не отражено качественное различие между ними. Положительное электричество ничем не «лучше»

отрицательного. Ученые, которые дали им эти названия, с тем же успехом могли назвать положительное электричество отрицательным и наоборот. Заряженные объекты воздействуют друг на друга. Если они заряжены разноименным электричеством, то они притягиваются, если одноименным — отталкиваются.

Электрические заряды противоположного знака могут взаимно уничтожаться. Положительно заряженное тело можно сделать электрически нейтральным, если сообщить ему равное количество отрицательного электричества. Следовательно, если какое-либо тело не заряжено, то оно может либо совсем не нести электрического заряда, либо нести равные количества положительного и отрицательного заряда. Одно из великих открытий физики заключалось в обнаружении того, что незаряженное вещество действительно состоит из положительных и отрицательных электрических зарядов.

Электрические заряды могут двигаться в веществе. Движение заряда особенно легко совершается в металлах. Металлическая проволока, соединяя два противоположно заряженных тела, немедленно разряжает их, так как противоположные заряды притягиваются. Отрицательное электричество в одном теле переходит к положительному в другом, и наоборот. Движения заряда в металлической проволоке мы называем электрическим током. В настоящее время мы имеем готовые «заряженные объекты» у себя дома. Два гнезда штепсельной розетки постоянно поддерживаются заряженными электричеством противоположного знака, так что в любой соединяющей их проволоке возникает ток, поддерживаемый электрической силой, действующей между гнездами.

Тщательное исследование того, что же именно движется в проволоке, показало, что движется отрицательное электричество; положительное остается в самом теле. Отрицательное электричество состоит из маленьких «атомов» электричества, электронов — частиц, с которыми мы часто будем иметь дело в этой книге. Все вещества как бы заполнены электронами.

Отрицательный заряд электронов в веществе обычно уравновешен равным количеством положитель-

ного. Положительный же заряд представляется связанным с веществом и, следовательно, неподвижным. Позже мы увидим, что положительный заряд находится в центре атомов и поэтому должен оставаться с ними. Электроны легко удалить из любого вещества или прибавить к нему. Если добавить к веществу некоторое количество электронов, то оно приобретает отрицательный заряд; если удалить часть электронов, то возникает избыток положительного электричества и вещество заряжается положительно.

Мы здесь впервые заглянули в электрическую природу материи. Поверхностному взгляду она не показывает своего электричества; оно маскируется тем, что отрицательные и положительные заряды в веществе обычно точно уравнивают друг друга, и мы не можем обнаружить никакого избыточного заряда. Тем не менее результаты более глубоких исследований показывают, что вещество состоит из электрически заряженных частиц — подвижных отрицательных электронов и центров атомов, несущих положительные заряды.

Вернемся теперь к силе взаимодействия заряженных объектов. Она зависит от расстояния между зарядами. Например, взаимодействие противоположных зарядов в штепсельных гнездах обычной проводки слишком слабо, чтобы гнать электроны от одного гнезда к другому. Но если достаточно сблизить гнезда (примерно на 0,025 см), то это взаимодействие станет достаточно сильным, чтобы заставить электроны пройти зазор, и мы увидим искру.

Силу взаимодействия двух заряженных объектов легко измерить. Сила притяжения, действующая между частицами с положительным и отрицательным зарядами, убывает обратно пропорционально квадрату расстояния, т. е. по тому же закону, по которому убывает с расстоянием сила тяготения. Конечно, сила тяготения действует между любыми двумя массами, тогда как электрическое притяжение действует только между объектами, несущими противоположные заряды. Если оно действует между очень маленькими заряженными телами, то сила электрического притяжения обычно гораздо больше гравитационной силы (т. е. силы тяготения). Эта

аналогия между силами приводит нас к чрезвычайно существенному выводу: отрицательные электроны в веществе притягиваются положительными центрами атомов примерно таким же образом, как и планеты притягиваются Солнцем. Поэтому мы полагаем, что электроны вращаются вокруг атомных центров так же, как планеты вокруг Солнца. Это заключение имеет очень большое значение в теории атома, что мы и увидим в следующей главе.

МАГНЕТИЗМ

Мы реже замечаем магнитные явления в природе, чем электрические. Конечно, компасом пользуются везде и всегда, но это кажется чем-то столь естественным, что никто уже не задумывается над физической стороной дела. Магнитными свойствами обладает

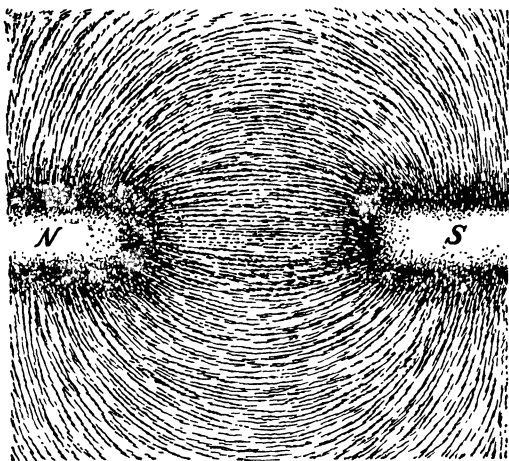


Рис. 16. Магнитное поле, показанное железными опилками.

лишь небольшое число металлов, хотя некоторые из них распространены весьма широко, например железо. Тем не менее магнетизм — явление поразительное; когда мы держим в руке магнит и кусок железа, то замечаем силу особого рода — некую «силу природы», подобную силе тяжести (рис. 16).

Весьма важным оказалось обнаружение тесной связи магнетизма с электричеством. На такую связь между ними впервые указал датчанин Ганс Христиан Эрстед в начале XIX века. Он установил, что электрический ток, текущий по круговой или спиральной проволоке, действует точно так же, как магнит, и создает магнитную силу. Это открытие привело француза Андре Ампера к предположению, что обычный стальной магнит должен действовать по тому же принципу, и он заключил, что в каждом атоме имеется слабый круговой ток; если большинство этих атомных токов ориентировано в одном направлении, то возникает магнитная сила. Гипотеза Ампера оказалась совершенно правильной.

Связь между электричеством и магнетизмом взаимна. Не только электричество создает магнетизм, но и магнетизм создает электричество. Если какой-либо магнит движется вблизи электрической проволоки или проволока движется вблизи магнита, в ней возникает ток. Переменная магнитная сила индуцирует ток и, следовательно, действует точно так же, как и электрическая сила. На этом принципе основаны наши генераторы — устройства, производящие ток, применяемый в технике. В генераторах при вращении якоря намотанные на него витки проволоки движутся в магнитном поле, и в проволоке возникает электрический ток. В каких бы условиях ни изменялось магнитное поле, оно всегда создает электрическую силу, приводящую в движение электрические заряды.

ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ И МАГНИТНЫЕ ПОЛЯ

Изучение связи между электрическими и магнитными явлениями привело к открытию нового явления природы — совокупного электрического и магнитного поля. Оно было сделано примерно в середине XIX века. Мы обязаны этим открытием главным образом Фарадею, Максвеллу и Герцу. Возникшие отсюда новые представления не только глубоко повлияли на наше понимание природы, но и изменили наш образ жизни, так как они стимулировали развитие энергетики и радиотехники. Понятие электромагнитного поля связано с тем удивительным обстоя-

тельством, что электрические заряды или магниты оказывают действие на другие объекты (заряды или магниты), не находящиеся в непосредственной близости от них. Электрические и магнитные силы действуют в пространстве на расстоянии. Как это может быть? Что передает это действие от одного тела к другому?

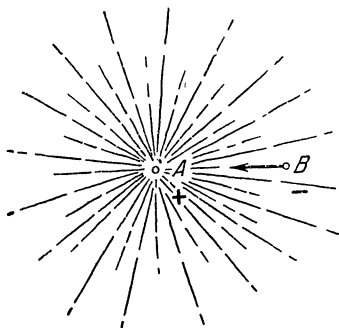


Рис. 17. Электрическое поле вокруг положительного заряда A .

В пространстве вокруг A создается натяжение. На отрицательный заряд B действует сила, направленная к A .

Чтобы понять это действие на расстоянии, воспользуемся представлением о поле. Каждый электрический заряд служит центром, или источником, электрического поля. Это поле есть свойство самого пустого пространства. Пространство в окрестности заряда находится в состоянии натяжения. Последнее можно измерить, воспользовавшись *пробным* зарядом, на который при его помещении в поле бу-

дет действовать некая сила. Притяжение положительного заряда A и отрицательного B можно описать следующим образом (рис. 17). Заряд A создает электрическое поле в пространстве вокруг себя. Когда в это поле помещают заряд B , он начинает испытывать действие поля как силу, толкающую его в направлении A . Точно так же поле заряда B толкает заряд A .

Подобные же поля создают магниты в окружающем их пространстве. Они называются магнитными полями. Это — «натяжение» в пространстве другого типа. Оно действует на любой кусок железа, находящийся в данном участке пространства; «натяжение» принимает характер силы, толкающей железо к магниту.

До сих пор понятие поля служило только для сложного способа описания сил взаимодействия зарядов или магнитов. Однако связь электрических и магнитных явлений показывает, что эти поля существуют и сами по себе. Возьмем, к примеру, инду-

цирование тока в проволоке путем движения магнита вблизи нее. При движении магнита его магнитное поле в том месте, где находится проволока, меняется со временем: с приближением магнита поле растет, с удалением — убывает. В результате этих изменений в проволоке индуцируется ток: они приводят заряды в движение. Следовательно, переменное магнитное поле делает то, что по предположению делает электрическое поле, — переменное магнитное поле создает электрическое поле.

Рассмотрим теперь создание магнитного поля электрическими силами. В данном случае магнитное поле создает ток. Ток — это движение зарядов, каждый из которых несет электрическое поле. Итак, мы видим, что движущееся электрическое поле создает магнитное поле, точно так же, как движущееся магнитное поле создает электрическое.

ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ ВОЛНЫ

Связь между электрическим и магнитным полями занимала умы физиков в течение всей первой половины XIX века. Наибольший вклад в решение этой проблемы внес великий английский физик-теоретик Джеймс Кларк Максвелл, который, кроме того, смог математически описать полученные результаты. Математические соотношения, связывающие оба поля, являются основой наших знаний об электрических явлениях; эти соотношения называются уравнениями Максвелла. Содержащаяся в них концепция явилась поворотным пунктом в нашем понимании природы и породила бесчисленные направления в физике и технике, среди которых мы упомянем здесь лишь радио, радиолокацию и телевидение.

Максвелл тщательно изучил связи между обоими полями и пришел к следующему интересному вопросу: если электрическое и магнитное поля существуют сами по себе, то не могут ли они существовать независимо от зарядов и магнитов? Конечно, статические (постоянные) поля могут существовать только близ зарядов и магнитов, но как же обстоит дело с переменными полями? То обстоятельство, что переменное поле создает поле другого рода, наводит на

мысль о возможности самоподдерживающегося процесса. Изменяющееся электрическое поле создает магнитное; создаваясь, последнее увеличивается и поэтому само создает электрическое поле и т. д. Анализируя эти соотношения количественно, Максвелл показал, что данный процесс распространяется в пространстве, т. е. что переменное электрическое поле в одной точке создает магнитное по соседству с ней, которое в свою очередь вызывает электрическое еще немного дальше, и так снова и снова. Таким образом возникает колеблющееся электромагнитное поле, непрерывно расширяющееся в пространстве. Каким бы способом ни возникало переменное электрическое или магнитное поле — например, в результате колебаний зарядов или появления магнитов, — поле будет распространяться во всех направлениях. Скорость его распространения можно вычислить по данным о наблюдаемом токе, индуцированном движущимися магнитами, или по данным о магнитном поле, создаваемом токами. В результате эти вычисления показали, что скорость распространения электромагнитного поля равна $3 \cdot 10^8$ м/сек, т. е. в точности равна скорости света.

ЧТО ТАКОЕ СВЕТ?

Это был один из великих моментов. Тот день, когда Максвелл завершил свои расчеты, по праву считается одним из знаменательных дней в истории физики. Максвелл пользовался в своих вычислениях только измерениями электрических токов и магнитных полей, т. е. явлениями, которые, казалось бы, не имеют ничего общего со светом; однако он заключил из этих измерений, что колеблющееся электрическое поле распространяется в виде волн со скоростью, точно совпадающей со скоростью световых сигналов. Таким образом была открыта связь между двумя областями физики, которые казались совершенно несвязанными, между оптикой и электричеством.

От результатов Максвелла до заключения, что свет есть не что иное, как распространение электромагнитных волн, оставался лишь очень малый, но

смелый шаг. После того, как он был сделан, множество разрозненных фактов стало на свое место. Например, нам сразу же становится ясно, почему нагретое до высокой температуры вещество испускает свет. Это вытекает из того, что вещество состоит из электрических зарядов. При высоких температурах заряженные частицы вещества, в частности электроны, совершают интенсивные и быстрые движения; в результате этого они создают быстро меняющиеся электрические поля, которые вызывают распространение полей в пространстве со скоростью света, т. е. испускается свет.

Если представление Максвелла об электромагнитной природе света верно, то должно быть возможным создание новых видов света. Любой электрический заряд или магнит, приведенный в колебание, породит поле, распространяющееся в пространстве, и будет служить источником света с частотой, равной частоте колебаний самого заряда или магнита.

Например, при пропускании по проволоке переменного электрического тока будут излучаться электромагнитные волны: их можно обнаружить на большом расстоянии, поместив на пути волн другую проволоку, в которой будут наблюдаться слабые наведенные токи. Этот опыт был впервые осуществлен в 1880 г. Герцем, который хотел проверить правиль-

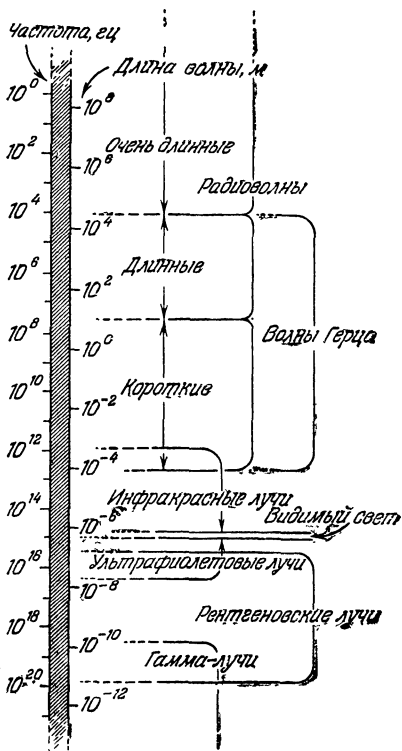


Рис. 18. Спектр электромагнитных волн.

ность идей Максвелла. Успех Герца открыл новую эру в технике. В настоящее время пространство полно таких радиоволн, испускаемых переменными токами в антеннах и отличающихся от световых волн только частотой и длиной волны. Конечно, колебания, искусственно вызываемые в антеннах, происходят значительно медленнее колебаний электронов в накалированных проволочках ламп. Поэтому радиоволны имеют ту же природу, что и световые, но их частота гораздо меньше, или длина волны значительно больше (рис. 18).

Теперь мы можем ответить на вопрос о природе световых волн: что же именно колеблется и что служит носителем? Колебания совершают напряженности электрического и магнитного полей, а носителем волны служит само пространство; это пространство находится в состоянии натяжения. Электрическое и магнитное натяжения распространяются в пространстве в виде световой волны, точно так же, как сгущения и разрежения распространяются в воздухе в виде звуковой волны. Электромагнитная волна носит двойственный характер. Электрические и магнитные натяжения распространяются вместе и тесно связаны друг с другом. Итак, свет имеет чисто электромагнитную природу. Световая волна — это волна электромагнитного поля, бегущая в пространстве и отделенная от испустивших ее зарядов.

Открытие Максвелла можно сравнить по важности с открытием закона тяготения Ньютоном. Ньютон связал движение планет с тяготением на Земле и открыл фундаментальные законы, управляющие механическим движением масс под действием сил. Максвелл связал оптику с электричеством и открыл фундаментальные законы (уравнения Максвелла), управляющие поведением электрических и магнитных полей и их взаимодействием с зарядами и магнитами. Труды Ньютона привели к введению понятия всеобщего поля тяготения, труды Максвелла — к введению понятия электромагнитного поля и к установлению законов его распространения.

ГЛАВА IV

АТОМЫ

ЕСТЕСТВЕННЫЕ ЕДИНИЦЫ МАТЕРИИ

В мире мы находим несметное множество различных веществ с невероятно сложными свойствами и строением; особенно сложна живая материя. Для того чтобы подойти к наиболее важным особенностям строения материи, следует начинать с изучения простых веществ. Сначала оставим в стороне органические вещества, такие, как дерево или кожа человека, так как они обладают сложной структурой и представляются комбинацией субструктур. Мы начнем рассмотрение с однородных веществ, таких, как воздух, вода, нефть, кусок металла или минерала. Эти вещества встречаются в трех агрегатных состояниях: твердом, жидком и газообразном (в виде пара). В твердом и жидком состояниях вещество выглядит плотно упакованным: в этих состояниях его чрезвычайно трудно сжать. Сжать вещество, находящееся в газообразном состоянии, очень легко; отсюда можно заключить, что в газообразном состоянии оно разрежено, т. е. что между единицами материи есть пустое пространство.

Что же такое единицы материи? Существуют ли они на самом деле? Можно ли бесконечно делить известное количество данного вещества, не изменяя его свойств, или же есть какое-то наименьшее его количество? Ответ на этот основной вопрос в настоящее время хорошо известен. Существует какое-то наименьшее количество любого вещества, которое называется молекулой, а в некоторых веществах — атомом. Разница между атомом и молекулой будет рассмотрена в конце настоящей главы. Раньше нам не

придется делать различий между этими двумя типами наименьших единиц. Такие единицы очень малы, и в большинстве случаев простые вещества производят впечатление однородных. Однако исследования, проведенные очень тонкими методами, обнаруживают наличие какой-то молекулярной структуры. На фото III, например, показано строение кончика очень острой вольфрамовой иглы, снятого при помощи так называемого ионного микроскопа — устройства, позволяющего локализовать очень мелкие детали на некоторых металлических поверхностях. Здесь мы видим правильное, упорядоченное расположение единиц, из которых состоит вольфрам. Зная увеличение микроскопа, можно найти размер этих единиц; оказывается, что он примерно равен $3 \cdot 10^{-8}$ см. Следовательно, один грамм вольфрама должен содержать около $3 \cdot 10^{21}$ таких единиц¹⁾.

На этой же фотографии мы видим, что в твердом состоянии единицы вещества образуют правильную, хорошо упорядоченную решетку.

Молекулярную природу газа, например воздуха, можно продемонстрировать весьма убедительным образом. Мы знаем, что воздух может двигать легкие предметы, так, движение воздуха заставляет шелестеть листья. Однако если воздух находится в покое в резервуаре, в котором нет ни ветра, ни течений, то мы не должны ожидать, что нам удастся заметить какое-либо движение объектов, взвешенных в неподвижном воздухе. Однако если объекты очень малы и легки — это могут быть, например, мелкие

¹⁾ Размер единиц вольфрама, т. е. его атомов, равен 2,5 см, деленным на 100 миллионов. Воспользуемся данными, изложенными в гл. I, чтобы представить себе такие размеры. Толщина волоса в 10 000 раз меньше длины вытянутой руки (1 м). 100 миллионов — это 10 000 раз 10 000. Следовательно, размер атома вольфрама во столько же раз меньше 2,5 см, во сколько толщина волоса меньше расстояния 10 км.

Атомы вольфрама расположены так, что они касаются друг друга. Поэтому кубический образец вольфрама, высота которого в n раз больше диаметра атома, содержит n^3 атомов. Образец вольфрама в форме куба весом 1 г имеет высоту 0,4 см. Это в 14 миллионов раз больше размера атома. Поэтому в 1 г вольфрама находится $(14 \text{ миллионов})^3$ атомов, т. е. приблизительно $3 \cdot 10^{21}$ атомов.

частички пыли или дыма, — то наши ожидания не оправдаются. Если рассматривать в микроскоп взвешенные в воздухе частички, то мы увидим, что они испытывают небольшие беспорядочные смещения в разные стороны (рис. 19). Это выглядит так, как если бы по ним стреляли крошечными невидимыми снарядами, беспорядочно выпускаемыми во всех направлениях. Такое движение впервые обнаружил в 1827 г. ботаник Роберт Броун, увидевший в свой микроскоп хаотический танец маленьких частиц. Он вел наблюдения в воде, а не в воздухе, но причина движения от этого не изменяется. Наличие «броуновского движения» служит прямым доказательством того, что воздух не непрерывен, а состоит из множества маленьких единиц, летящих в

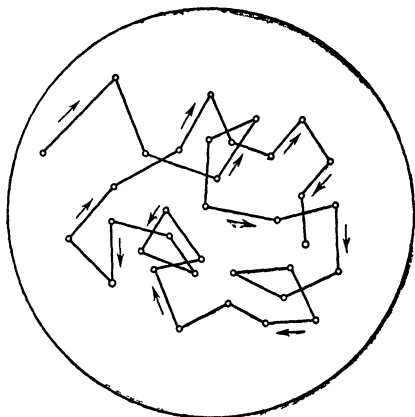


Рис. 19. Броуновское движение. Легкая частица испытывает беспорядочные смещения, видимые в микроскоп.

пространстве по всем направлениям весьма произвольным образом. Любой предмет в воздухе беспорядочно обстреливается со всех сторон молекулами, и этот обстрел создает давление воздуха. Обычно число ударов столь велико, что они действуют, как постоянное давление. Однако если наш предмет очень мал, то он испытает значительно меньше ударов, и, следовательно, отдельные удары могут время от времени вызывать дополнительное действие. Это и есть причина броуновского движения.

Мы можем определить наименьшую единицу жидкости, задавая следующий вопрос: сколь большую площадь можно покрыть тонкой пленкой жидкости, если в нашем распоряжении имеется ограниченное ее количество? Если бы не существовало наименьшей единицы, то одним граммом можно было бы покрыть площадь какого угодно размера, так как

тогда любую площадь можно было бы удвоить, уменьшая толщину пленки вдвое. Но если есть наименьшая единица, толщину пленки нельзя сделать меньше нее, и, следовательно, для данного количества жидкости должна существовать определенная наибольшая площадь, по которой можно распределить эту жидкость.

Подобный опыт легко произвести, давая нефти растекаться по поверхности воды. Оказывается, что маленькая капелька нефти диаметром 1 мм растекается по площади около 3 м^2 , но никогда — по большей площади. Отсюда мы заключаем, что есть наименьшая единица нефти. По размерам площади можно рассчитать, чему она равна; мы снова получаем около $3 \cdot 10^{-8} \text{ см}$, т. е. примерно столько же, как и для единицы (атома) вольфрама ¹⁾.

Существование определенной наименьшей единицы любого вещества дает нам некую абсолютную меру количества. Обычно мы говорим об одном килограмме железа, об одном литре воды, об одном кубическом метре воздуха при атмосферном давлении. Все эти меры определяются произвольным выбором единиц измерения. Но, говоря о миллионе атомов железа, миллионе молекул воды или воздуха, мы тем самым применяем абсолютную меру, характерную для данного вещества и не зависящую от выбора человеком тех или иных единиц измерения. Вещество можно «сосчитать», вместо того чтобы измерять или взвешивать.

Для нас молекулы или атомы чрезвычайно малы, и поэтому химики предпочитают пользоваться в качестве абсолютной меры «молем» вещества ²⁾). Модем называется некое определенное число наименьших

¹⁾ Допустим, что капля нефти имеет форму куба с ребром, равным 1 мм. Составим этот куб, разрезая масляный слой площадью 3 м^2 на миллиметровые квадратики и накладывая их друг на друга. Высота получающегося столбика будет равняться 1 мм, т. е. высоте исходной капли. В 3 м^2 содержится 3 000 000 мм². Следовательно, толщина нефтяного слоя будет равна 1 мм, деленному на 3 000 000. Отсюда размер единицы, или молекулы, нефти равен $3 \cdot 10^{-8} \text{ см}$.

²⁾ Здесь и в дальнейшем автор называет модем то, что в специальной литературе обычно называют числом Авогадро. (Прим. перев.)

единиц; из практических соображений для определения моля выбрано число атомов в 12 водорода. Это число, знаменитое число Авогадро, равно $6,03 \cdot 10^{23}$. Один моль воды, содержащий $6,03 \cdot 10^{23}$ молекул воды, заполняет около 18 см^3 ; один моль горной породы (кварца) имеет объем, примерно равный 24 см^3 , а один моль воздуха при нормальных условиях — $22,4 \text{ л}$. Объемы одного моля воды и одного моля кварца приблизительно одинаковы, и, следовательно, должны быть приблизительно одинаковыми и размеры их наименьших единиц. Однако один моль воздуха заполняет гораздо больший объем, чем один моль воды или кварца. Это объясняется не большим размером единицы воздуха, а тем, что воздух представляет собой газ, молекулы которого находятся далеко друг от друга и свободно движутся в пространстве. Если охладить воздух до такой низкой температуры, что он станет жидким (при этом его молекулы касаются друг друга), то объем одного его моля будет примерно равен объему одного моля воды.

ТЕПЛО

Что делает предмет горячим или холодным? В течение многих лет считалось, что тепло — это некое вещество, содержащееся в нагретом предмете. Полагали, что при соприкосновении с холодным предметом тепловое вещество проникает из горячего предмета в холодный и выравнивает их температуры. Но в середине прошлого века стало ясно, что тепло есть энергия, а именно энергия неупорядоченного движения молекул и атомов. При нагревании куска вещества все изменение состоит в том, что его наименьшие единицы совершают более быстрые и беспорядочные движения.

Рассмотрим несколько примеров. Мы видели, что в вольфрамовой игле атомы расположены в виде правильного узора. Как же они могут совершать беспорядочные движения? Будучи нагреты, они колеблются вокруг предписанных им мест, совокупность которых образует упорядоченную структуру. Конечно, это возвратно-поступательное движение частично обуславливает размытость картины на фото III. При

более высокой температуре ее размытость еще увеличивается. При очень высокой температуре размах колебаний становится сравнимым с расстоянием между соседними атомами и их расположение перестает быть упорядоченным. Это происходит при нагреве металла до температуры его плавления.

В газе, например в воздухе, тепловое движение молекул — это обычное прямолинейное движение, когда каждая молекула перемещается в пространстве хаотическим образом, сталкиваясь с другими молекулами и со стенками. Чем выше температура, тем быстрее движение. В холодный день (-18°C) средняя скорость молекул воздуха примерно равна 400 м/сек (1440 км/час), а в жаркий день (38°C) — приблизительно 440 м/сек (1600 км/час). Разница между очень холодным и очень жарким днем дает различие скоростей, равное лишь 10% . Мы замечаем эту разницу в скоростях по изменению давления в автомобильных шинах. Давление воздуха обуславливается ударами его молекул о стенки (сосуда); передаваемый стенкам импульс пропорционален квадрату скорости¹⁾. Уменьшение скорости молекул на 10% вызывает уменьшение импульса на 20% , и поэтому при снижении температуры с $+38^{\circ}\text{C}$ до -18°C давление в шинах падает на 20% .

Несмотря на огромную скорость движения молекул при обычных температурах, они не «улетают» очень далеко. Их «полет» постоянно прерывается столкновениями с другими молекулами. В воздухе их средний свободный и непрерываемый путь составляет только одну стотысячную долю сантиметра. Поэтому их полет больше всего напоминает беспорядочное метание с указанной выше скоростью, причем направление движения изменяется через каждую стотысячную сантиметра пути.

Тепловое движение в любом веществе, твердом или газообразном, полностью прекращается при -273°C ,

¹⁾ Импульс, который несет каждая молекула, пропорционален ее скорости. Число ударов молекул о стенку в секунду опять-таки пропорционально их скорости, так что передаваемый в секунду импульс пропорционален квадрату скорости. Переданный за единицу времени импульс есть не что иное, как сила, в данном случае — давление. (Прим. перев.)

так называемом абсолютном нуле температуры. При этой температуре все беспорядочное движение молекул прекращается, и ясно, что она является наименьшей возможной температурой.

МОЛЕКУЛЫ И АТОМЫ

Можно ли разделить описанные выше наименьшие единицы материи на еще меньшие? Можно, но тогда эти части уже не будут принадлежать тому же веществу. Молекула воды есть наименьшая единица воды. Части этой молекулы окажутся уже не водой, а водородом и кислородом.

Разбить молекулу на ее составные части значительно труднее, чем разбить само вещество на молекулы. Например, когда мы кипятим воду и получаем пар, мы разделяем вещество воды на молекулы. Вода в форме пара — это газ, частицы которого, молекулы, летают в пространстве каждая в отдельности, но оставаясь неразделенной, целой единицей. Но если через пар пропустить мощный искровой разряд, то часть молекул раздробится, и мы получим водород и кислород. Искра — значительно более сильный источник энергии, чем процесс кипячения. В некоторых случаях сильное нагревание тоже расщепляет молекулы и превращает одно вещество в другое.

Опыт, накопленный за все время развития химии, показал, что некоторые вещества можно разложить в другие интенсивным нагреванием, электрической искрой или другим сильным воздействием и что два вещества можно соединить, получая при этом новое химическое соединение. Водород и кислород можно соединить в воду, а кусок кварца можно разложить на кислород и кремний.

Один из самых важных моментов в истории человечества наступил, вероятно, около 3000 лет до нашей эры, когда человек впервые поместил некоторые похожие на землю вещества (вероятно, куприт или свинцовый блеск) на раскаленные угли. При этом получилось новое вещество — медь или свинец. Большинство металлов, например железо, медь, свинец, цинк и т. д., суть воистину вещества, приготовленные человеком; они редко встречаются в природе;

исключением служат очень мелкие самородки (например, меди) и железоникелевые сплавы, приходящие из космического пространства в виде метеоритов. Объясняется это очень просто: чистые металлы не сохраняются, если они подвержены действию кислорода воздуха. Большинство металлов с течением времени связывается с кислородом и образует химические соединения, представляющие собой те же похожие на землю вещества, из которых сами металлы были извлечены. Человек может превратить эти руды в чистые металлы на период времени, достаточный для практических применений, но очень короткий по сравнению с возрастом Земли.

Изучение процессов, в которых одни вещества превращаются в другие, позволило установить очень важный факт: все, действительно все существующие вещества можно разложить на 92 основных вещества, называемых элементами. Каждый кусок вещества, где бы он ни был найден и в каком бы агрегатном состоянии он ни находился, всегда или сам представляет собой элемент, или состоит из элементов. Вещество, наименьшая единица которого является комбинацией нескольких элементов, называется химическим соединением.

Многие хорошо известные нам вещества представляют собой настоящие элементы. Все чистые металлы, например золото, серебро, железо, свинец, алюминий и т. д., суть элементы. Многие газы, например водород, кислород или азот, также являются элементами, но другие газы, такие, как светильный или углекислый газы, суть химические соединения. Большинство хорошо известных жидкостей — это химические соединения. Наименьшая единица элемента называется атомом; наименьшая единица химического соединения — молекулой. Так как все химические соединения можно разложить на элементы, наименьшая единица химического соединения должна быть составлена из наименьших единиц элементов. Следовательно, каждая молекула представляет собой конгломерат атомов; она состоит из атомов тех элементов, из которых состоит само химическое соединение. Они как-то подходят друг другу и образуют устойчивую единицу, молекулу, наделенную всеми



Рис. 20. Иллюстрация из книги по металлургии XVI века (гравюра на дереве).

Показана доменная печь для плавнения медных и свинцовых руд. А, В — две печи, С — передний горн; D — тигель. Мастер стоит около одной из домен и снимает шлак железной вилкой. Е — железная вилка, F — деревянный гребок, которым снимают спекшиеся куски расплавленных пиритов, G — тигель переднего горна, половина его показана открытой на другой печи, H — половина, выступающая из печи, I — помощник подготавливает горн; последний отделен от печи, чтобы его было лучше видно, K — чушка, L — трамбовка, M — лестница, N — черпак.

химическими свойствами того вещества, чьей единицей она является.

Вода — это химическое соединение водорода и кислорода. Наименьшими единицами элементов водорода и кислорода служат атомы водорода и кислорода ¹⁾. Наименьшей единицей воды служит молекула воды, состоящая из двух атомов водорода и одного атома кислорода (H_2O); они связаны так прочно, что разъединить их может только электрическая искра.

Существуют как большие молекулы, так и маленькие. Молекула воды состоит только из трех атомов; молекула этилового (винного) спирта — из девяти атомов: одного атома кислорода, двух атомов углерода и шести атомов водорода. Некоторые молекулы, встречающиеся в живом веществе, например белки, состоят из сотен и тысяч атомов.

Открытие 92 элементов и их атомов было самым важным шагом в понимании строения материи. Потребовалось очень много времени, чтобы выработались ясные представления и были поняты факты. Представление об основных веществах, из которых можно сделать все другие, столь же старо, как и натурфилософия. Целый ряд греческих философов развивал спекулятивные идеи такого рода. Первые заключения, близкие к нашим нынешним, были сделаны в XVII веке Робертом Бойлем; однако многие вещества, которые он считал простыми (т. е. элементами), оказались химическими соединениями. Знаменитый французский химик Антуан Лавуазье, казненный во время французской революции, составил список, содержащий 33 элемента. Современный список элементов и представление о молекулах как о соединении атомов были выработаны в XIX веке,

¹⁾ Существует одно обстоятельство, которое часто ведет к недопониманиям: у многих элементов устойчивой единицей является не отдельный атом, а соединение двух тесно связанных в пару атомов. Это справедливо для большинства элементов, встречающихся в виде газов — водорода, кислорода и т. п. Поэтому их наименьшими единицами тоже служат молекулы, но только молекулы, состоящие из пар одинаковых атомов (O_2 , H_2 и т. д.). Если такая молекула будет расщеплена, этот процесс не приведет к изменению исходного вещества. Однако для простоты мы всегда считаем наименьшей единицей элемента атом.

причем наиболее важный вклад в это был сделан английским химиком Джоном Дальтоном.

Постараемся понять все колоссальное значение этого открытия. Мы окружены бесконечным множеством веществ, находящихся в различных и даже постоянно изменяющихся формах, с разными свойствами: горячих и холодных, живых и неживых. Несмотря на это колоссальное многообразие, все известные нам объекты состоят только из атомов 92 сортов, причем каждый сорт принадлежит своему, хорошо определенному элементу. Ни в живой, ни в неживой материи нельзя найти ничего такого, что нельзя было бы разложить каким-либо способом на некоторые из 92 элементов. Это открытие обнаружило основную простую черту в строении материи. Мы имеем дело со сравнительно малым числом фундаментальных единиц. Поэтому есть надежда, что принципы, лежащие в основе строения материи, достаточно просты, чтобы их мог понять человек.

СТРОЕНИЕ АТОМОВ

Очень важно больше узнать о строении самих атомов. Надо выяснить, что же существует в 92 различных формах и наделено способностью соединяться, образуя самые разнообразные известные нам вещества; мы должны понять, почему определенные комбинации элементов возможны, а другие — нет, и наконец, мы должны попытаться выяснить, откуда произошли столь высоко организованные системы, как живая материя.

Атомы 92 видов обладают весьма различными свойствами. В обычных условиях одни из них образуют газы, другие — металлы; некоторые, например атомы углерода, способны легко соединяться с другими атомами и образовывать скелет целого ряда химических соединений, тогда как другие, например атомы гелия, неона, аргона, почти никогда не дают соединений. Несмотря на такие различия, атомы имеют примерно одинаковую величину. Это можно показать следующим способом.

Если известно атомное строение молекулы вещества, то легко определить, сколько атомов содер-

жится в данном количестве вещества. Вспомним, что 1 моль воды содержит $6,03 \cdot 10^{23}$ молекул и что это количество занимает около 18 см^3 . Так как молекула воды состоит из трех атомов (два атома водорода и один атом кислорода), то в 1 моле содержится $18 \cdot 10^{23}$ атомов. Следовательно, в 18 см^3 воды¹⁾ содержится примерно это число атомов. Мы получим аналогичное, но несколько меньшее число атомов в равном объеме горной породы: 1 моль кварца занимает 24 см^3 . Одна молекула кварца тоже состоит из трех атомов — одного атома кремния и двух атомов кислорода. Поэтому в строго равном объеме (18 см^3) содержится $\frac{3}{4} \cdot 18 \cdot 10^{23}$ атомов, т. е. $13,5 \cdot 10^{23}$ атомов. Беря даже столь различные вещества, как золото, дерево или углерод, мы всегда получаем для числа атомов, содержащихся в 18 см^3 , величину, лежащую между $10 \cdot 10^{23}$ и $25 \cdot 10^{23}$. Так как в жидких и твердых телах молекулы плотно упакованы и внутри молекул атомы тоже плотно упакованы, мы заключаем, что все атомы имеют примерно одинаковый размер: в объеме 18 см^3 помещается от $10 \cdot 10^{23}$ до $25 \cdot 10^{23}$ атомов, т. е. диаметр атома приблизительно равен 10^{-8} см .

Что мы знаем о внутреннем строении атома? Здесь мы приходим к основному вопросу: механизм, действующий в атоме, должен служить ключом к пониманию свойств окружающих нас объектов. В предыдущей главе мы ясно показали важную роль, которую играют электрические заряды, и установили, что электроны составляют существенную часть атома. Решающий опыт был сделан в 1910 г. Эрнестом Резерфордом, Хансом Гейгером и Э. Марсденом; они выполнили «зондирование» атома альфа-частицами — очень быстрыми, электрически заряженными частицами, испускаемыми некоторыми радиоактивными веществами. Они направляли пучок этих частиц на металлическую пластинку и наблюдали, как и насколько изменится направление движения частиц после их прохождения сквозь металл (рис. 21). Эти измерения говорят кое-что о том, как распределен электрический заряд в атомах металлов. Если бы он

¹⁾ Автор относит все найденные им числа к одному кубическому дюйму, т. е. к 18 см^3 . (Прим. перев.)

был равномерно распределен по всему атому, то при пролете альфа-частиц сквозь атом они никогда не отклонялись бы заметным образом от своего пути. Если же электрический заряд сосредоточен в определенных точках атома, то, подходя к этим точкам,

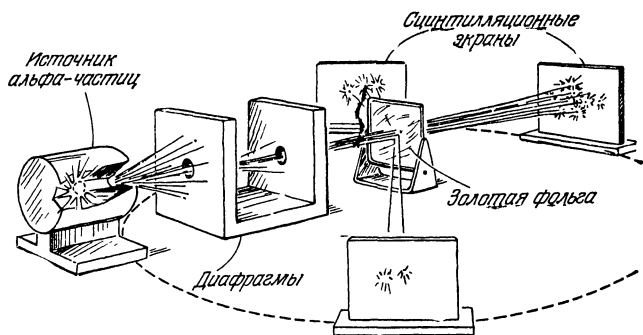


Рис. 21. Схема опыта Резерфорда.

альфа-частицы должны испытывать сильное отклонение. Здесь стоит провести описание опыта, данное самим Резерфордом:

«... Я хотел бы воспользоваться этим примером, чтобы показать, как часто мы наталкиваемся на факты случайным образом. Я уже давно занимался исследованиями рассеяния альфа-частиц, а д-р Гейгер, работавший в моей лаборатории, изучал это явление во всех деталях. Исследуя тонкие образцы тяжелых металлов, он нашел, что рассеяние оказывается обычно малым, порядка одного градуса. Однажды Гейгер пришел ко мне и сказал: „Не думаете ли Вы, что молодому Марсдену, которого я учу методике исследований радиоактивности, следовало бы начать небольшую исследовательскую работу?“ Я согласился с ним и сказал: „Почему бы не предложить ему выяснить, могут ли рассеиваться альфа-частицы на большие углы?“ Должен сознаться Вам, что я сам не верил в такую возможность. Действительно, как мы знаем, альфа-частицы — это очень быстрые и массивные частицы с большим запасом энергии, и можно показать, что если бы рассеяние было обусловлено эффектом накопления целого ряда незначительных рассеяний, то вероятность рассеяния альфа-частиц в обратном направлении окажется очень малой. Затем я вспоминаю, что два или три дня спустя Гейгер пришел ко мне очень возбужденным и сказал: „Мы получили несколько альфа-частиц, летящих в обратном направлении...“ Это было самое невероятное событие, когда-либо происходившее в моей жизни. Это было почти столь же невероятно, как если бы при стрельбе 15-дюймовым снарядом по куску бумаги Вас бы ранило рикошетом. Поразмыслив, я понял, что это обратное рассеяние должно происходить в результате одного-единственного столкновения, и когда

я произвел вычисления, то увидел, что можно получить эффект такого порядка величины, только если допустить существование системы, в которой большая часть массы атома сосредоточена в маленьком по размеру ядре. Тогда я подумал об атоме с маленьким массивным центром, несущим заряд. Я разработал математический закон, которому должно подчиняться рассеяние, и установил, что число частиц, отклоненных на заданный угол, должно быть пропорционально толщине рассеивающей фольги, квадрату заряда ядра и обратно пропорционально четвертой степени скорости. Эти выводы впоследствии подтвердили Гейгер и Марсден рядом прекрасных опытов¹⁾).

После этих опытов и целого ряда последующих стало совершенно ясно, что атом состоит из положительно заряженного, маленького, но массивного ядра (в котором сосредоточена основная масса атома), окруженного отрицательно заряженными электронами, гораздо более легкими, чем ядро. Истинный размер ядра чрезвычайно мал. Его диаметр лежит между 10^{-13} и 10^{-12} см, в зависимости от рода атома, т. е. примерно в 10 000 раз меньше диаметра самого атома; однако ядро очень тяжелое, так как в нем сосредоточена почти вся масса атома. Резерфорд и другие физики, в частности Мозли, определили число электронов в каждом атоме и положительный заряд атомного ядра. Поскольку сам атом электрически нейтрален, отрицательно заряженные электроны должны уравнивать заряд положительно заряженного ядра. Следовательно, число электронов всегда должно равняться заряду ядра, выраженному в единицах заряда электрона. Это число характерно для атомов каждого рода. Водород, например, имеет один электрон и один положительный заряд в ядре, гелий — два электрона, литий — три и т. д., вплоть до урана с его 92 электронами и ядром, несущими 92 единицы положительного заряда. Это число называется атомным номером Z . Каждый элемент имеет свой характерный атомный номер Z , указывающий величину положительного заряда ядра и число электронов в атоме.

После этого открытия качественная разница между 92 элементами свелась к количественной. Атомы

¹⁾ Э. Резерфорд, Развитие теории строения атома, Макмиллан, Нью-Йорк, 1940.

одного элемента отличаются от атомов другого только числом электронов в них, определяющим также, сколько положительных единиц заряда имеет ядро.

Можно расположить атомы в определенном порядке в соответствии с их атомными номерами Z , причем каждый номер от 1 до 92 (кроме технеция (43) и прометия (61)) отвечает элементу, находящемуся в природе. Ниже приведены атомные номера Z для наиболее важных природных элементов.

Водород	1	Азот	7	Кремний	14	Золото	79
Гелий	2	Кислород	8	Железо	26	Свинец	82
Литий	3	Натрий	11	Серебро	47	Уран	92
Углерод	6						

Существуют также и искусственно создаваемые элементы — «трансурановые», которые имеют больше 92 электронов. Они имеют короткое время жизни и не встречаются в природе при обычных условиях.

ВАЖНЕЙШИЕ ПРОБЛЕМЫ СТРОЕНИЯ АТОМА

Сведение качественных различий между девянью двумя сортами атомов к количественным представляет огромный шаг вперед. Но каждое новое научное открытие, решая старые проблемы, сразу же создает новые. Если мы больше знаем, то у нас возникает больше вопросов. Наше знание — остров в бесконечном океане неизвестного, и, чем больше становится остров, тем больше протяженность его границ с неизвестным. Выяснение строения атома немедленно поставило перед нами новый вопрос. Как могут эти количественные различия в строении атомов привести к наблюдаемым качественным различиям в свойствах элементов? Как возможно, например, то, что бром с его 35 электронами — это коричневая жидкость, образующая много химических соединений, тогда как криптон с 36 электронами — газ, не образующий никаких соединений, а рубидий с 37 электронами — металл? Почему один лишний или недостающий электрон способен вызвать такое значительное различие в свойствах атомов? На этот вопрос не было ответа до тех пор, пока позднее не удалось понять квантовую природу материи, о которой мы будем говорить ниже, в следующей главе.

Какие типы движения мы ожидаем встретить в атоме? После того, как Резерфорд установил, что атом состоит из массивного положительного ядра, окруженного легкими отрицательными электронами, стала очевидна близкая аналогия атомов и планетной системы. Электроны притягиваются к центру атома силой электрического притяжения, действующей между зарядами противоположного знака. Эта сила значительно больше силы тяготения между ядром и электроном¹⁾, но подчиняется тому же закону зависимости от расстояния, т. е. убывает, как квадрат расстояния между ними. Поэтому мы ожидаем, что электроны будут двигаться вокруг ядра примерно так же, как и планеты вокруг Солнца. Электрическое притяжение между ядром и электроном заменит силу тяготения. Атом должен быть маленькой планетной системой, и атомы каждого рода будут иметь разное количество электронов — планет. Мы можем ожидать, что в малом мире атома повторяется большой мир на небе.

В некоторых отношениях эти ожидания как будто оправдались. Например, мы можем вычислить, сколько оборотов в секунду будет совершать электрон вокруг ядра, скажем, в водороде. Нам известен размер орбиты, он примерно таков же, как и размер самого водородного атома (около 10^{-8} см). Кроме того, известна сила, с которой притягивается электрон. Тогда, приравнявая центростремительную силу силе притяжения, можно вычислить скорость его вращения по орбите. Это дает около 10^{16} оборотов в секунду; отсюда следует, что «год» в атомной солнечной системе, т. е. время одного оборота электрона, равен 10^{-16} сек. Правильность оценки этого промежутка времени можно подвергнуть проверке. Мы знаем, что колеблющийся электрический заряд испускает свет и что частота этого света (число гребней и впадин в секунду) должна равняться числу колебаний заряда в секунду. Поэтому следует ожидать, что свет, испускаемый водородным атомом, имеет частоту 10^{16} в 1 сек. Действительно, нагретый водород испускает свет такой частоты.

¹⁾ Она больше в 10^{40} раз! (Прим. перев.)

Однако, приняв планетарную модель атома, нам вскоре приходится сталкиваться с большими трудностями. Если бы атом действительно был планетной системой, в которой электрические заряды все время обращаются вокруг ядра, то электроны должны были бы непрерывно испускать свет как в обычном холодном водороде, так и в накаливаемом до очень высоких температур. Но этого не происходит. Есть и другое затруднение: свет, излучаемый газообразным водородом, да и любым другим газом, испускается и поглощается только с одной определенной частотой, характерной для элемента, из которого состоит данный газ. Иными словами, атомы каждого рода ведут себя так, как если бы они были радиостанцией со строго определенной частотой передачи и приема. Спектроскописты изучают эти характерные частоты в течение многих лет, так как, пользуясь ими, лучше всего отождествлять элементы: это то же, что отождествлять радиостанцию, находя ее по частоте в списке установок для радиопередач. Это единственный способ получения данных о химическом составе звезд.

Все рассказанное выше очень трудно согласовать с планетарной моделью атома. Вращение вокруг центра может происходить по самым разным орбитам. По одним орбитам электрон движется быстрее, по другим медленнее. Возникает вопрос: почему электрон должен обращаться только по таким орбитам, для которых частота имеет определенную величину? Это тем более странно, так как мы знаем, что атомы газа сталкиваются 10^{12} раз в 1 сек (т. е. в среднем 1 раз за 10 000 «лет» водородного атома). Энергию таких столкновений можно вывести из тепловой энергии газа. Соударения достаточно сильны и должны были бы полностью изменять размер и форму орбиты, а также характерную для нее частоту. Как же они сохраняют частоту постоянной?

Чтобы проиллюстрировать эти трудности нагляднее, рассмотрим газообразный натрий. Он поглощает только свет с частотой, характерной для атома натрия. Нагретый газ испускает хорошо известный желтый свет натрия, т. е. свет определенной частоты. Сконденсируем теперь газ, охлаждая или сжимая его, до появления металлического натрия. В металле атомы

соприкасаются и, следовательно, их планетарные орбиты переплетаются друг с другом. Мы не должны удивляться тому, что металл не дает специального «ответа» на излучение с частотой, характерной для свободного атома натрия. Действительно, у металлического натрия не видно избирательности к какой-либо определенной частоте; этого и следовало ожидать вследствие сложного переплетения электронных орбит в твердом теле. Теперь снова превратим металл в газ путем испарения. Газ опять приобретает те же свойства, которыми он обладал до охлаждения: он будет поглощать и испускать только излучение с типичными для натриевого атома частотами.

Это поведение резко отличается от поведения планетной системы, и его никак нельзя понять на ее основе. Есть свойства, которых никак нельзя ожидать от планетной системы. Как представить себе, что после испарения металла электроны попадут на точно те же орбиты? Для этого нет ни малейших оснований. Наоборот, кажется в высшей степени невероятным, чтобы между орбитами до и после испарения оставалось заметное сходство в чем-либо, кроме общей формы и примерных размеров. Однако на самом деле мы обнаруживаем совпадение частот и целого ряда других особенностей, совпадение в самых мельчайших подробностях. Это все равно, как если бы Венера, выбитая из своей орбиты столкновением с другой звездой, вернулась на свою прежнюю орбиту после удаления звезды.

Мы привыкли находить в природе вещества со строго определенными и воспроизводимыми свойствами. В нашем мышлении глубоко укоренилось, что это именно так, и мы совсем не удивляемся, например, тому, что два атома золота из разных месторождений, выделенные и очищенные разными способами, в конце концов оказываются совершенно тождественными. Вся наша жизнь основана на опыте человека, указывающем, что вещества имеют свои характерные свойства; мы способны распознавать металлы, минералы и химические соединения и различать их по характерным и всегда воспроизводимым свойствам. Золото всегда обладает свойствами золота, а семена циннии рожают циннии каждую весну.

Однако надо отдавать себе очень ясный отчет в том, что все, рассказанное выше, совершенно не укладывается в планетарную модель атома. Это не только необъяснимо, но и прямо противоречит большинству характерных свойств планетных систем. Строе-ние орбит зависит от начальных условий; существует множество возможных форм орбит, и реализация той или иной формы зависит от предыстории данной системы. Если бы два атома были просто двумя планетными системами, то их свойства очень редко оказывались бы тождественными.

Подведем итог. Все вокруг нас в природе проявляет характерные для веществ свойства. Несмотря на несметное множество самых различных веществ, каждое из них воспроизводимо и его можно снова создать со всеми характерными свойствами. Существование такой ситуации требует, чтобы атомы обладали следующими тремя свойствами:

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

2) *Тождественность*. Все атомы одного рода (с тем же числом электронов Z) обладают тождественными свойствами; они испускают и поглощают излучение с одними и теми же частотами, имеют равные размеры, форму, и внутреннее движение в них одинаково.

3) *Воспроизводимость*, вернее, способность возвращаться в исходное состояние. Если форма атома была искажена и его электронные орбиты были вынуждены изменить свой вид в результате высокого давления или соседства других атомов, то после устранения причины искажения сам атом и его орбиты снова приобретают исходную форму.

Опыты, однако, показывают, что атом есть планетная система электронов, обращающихся вокруг ядра, система, которая не может обладать перечисленными выше тремя свойствами. Следовательно, эта модель атома никак не может объяснить всю специфичность свойств вещества. Мы должны найти новую и существенную черту строения атома, которая не содержится в классической модели планетной системы. Этот новый взгляд на природу атома принесло развитие квантовой теории.

ГЛАВА V

КВАНТ

Мир атомов полон неожиданностей. Пытаясь проникнуть во внутреннюю структуру атома, мы наблюдаем странные вещи, которые кажутся противоречивыми из-за своего существенного отличия от всего нашего повседневного опыта, относящегося к макромиру. По-видимому, они не отвечают нашим привычным представлениям о том, что такое частицы и как они должны себя вести. Мы понимаем, что надо найти нечто необычайное для того, чтобы объяснить те факты, которые мы видим вокруг себя.

В гл. IV мы подчеркивали серьезные противоречия, затрудняющие изучение структуры атома. С одной стороны, атом проявляет себя как маленькая планетная система из обращающихся по орбитам электронов; с другой стороны, мы видим его устойчивость и характерные свойства, совершенно чуждые планетным системам. В этой главе мы начнем с более подробного обзора необычных наблюдений над атомами и атомными частицами, а затем попытаемся выяснить новые закономерности, управляющие недрами атома. Но это не будет исторический обзор. К сожалению, в действительном развитии науки открытие редко делается тогда, когда оно было бы нам полезнее всего; оно приходит лишь после того, как успехи техники обеспечат создание аппаратуры, позволяющей проводить необходимые измерения. Здесь мы будем рассказывать о новых открытиях в таком порядке, который облегчит понимание их глубокого смысла. Мы обсудим три группы наблюдений, из которых каждое отражает странные и необычные черты атомного мира.

К первой группе относится обнаружение квантовых состояний атома, вторая связана с квантовой природой света, третья — с волновыми свойствами материальных частиц. Тогда мы будем подготовлены к пониманию существа новой квантовой механики, основанной на этих наблюдениях. Она служит фундаментом нашего понимания атомных явлений на данном этапе развития науки.

КВАНТОВЫЕ СОСТОЯНИЯ АТОМА

В 1913 г. Джеймс Франк и Густав Герц произвели ряд опытов, в которых они пытались изменить планетарные орбиты электронов в атомах. Они рассуждали

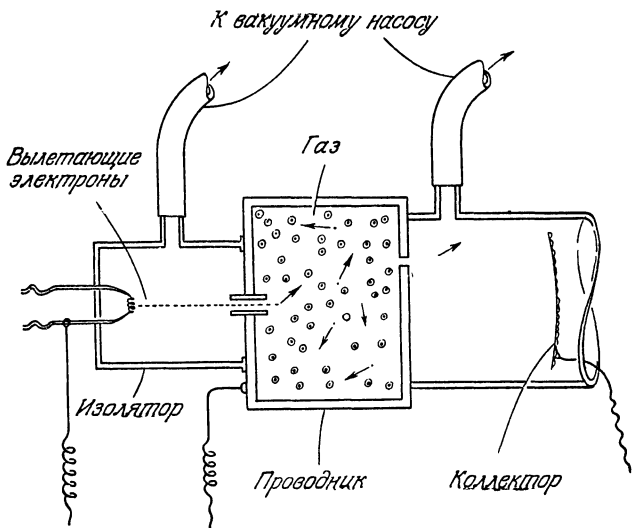


Рис. 22. Общая схема опыта для измерения потерь энергии электронов при их столкновении с атомами.

Электроны проходят через газ (пары натрия) в средней камере. Электроны покидают источник (пушку) с энергией, определяемой ускоряющим напряжением, приложенным к двум проволокам слева. Их энергия, остающаяся после столкновения, измеряется в камере справа.

так. Атом, по-видимому, сопротивляется изменению электронных орбит. Попытаемся изменить эти орбиты силой и посмотрим, как и до какой степени

атом сможет сопротивляться такому изменению. Можно ожидать, что планеты изменят свои орбиты, если какая-нибудь звезда пройдет близ нашей солнечной системы. Франк и Герц осуществили в микромире опыт, который соответствует такому катаклизму в солнечной системе. Приведем упрощенную схему их опыта. Возьмем сосуд, содержащий атомы газа, например газообразного натрия или водорода (рис. 22), и пропустим через него прямой пучок электронов. Так как электроны оказывают друг на друга сильное действие, то следует ожидать, что электроны пучка, проходя близ атомов, будут влиять на орбитальные электроны и заставят их изменить свои орбиты, точно так же, как звезда, проходящая близ Земли, изменила бы ее орбиту.

Мы не можем непосредственно ни увидеть электронную орбиту, ни выяснить, изменилась ли она, но мы можем косвенным образом узнать, что именно произошло. Мы точно установили, что все электроны в пучке при вхождении в газ имеют одинаковую скорость. Любое изменение, которое электроны произведут в атомах, будет связано с изменением скорости электронов. Это предсказание следует из закона сохранения энергии. Для того чтобы изменить орбиту электрона в атоме, нужна энергия ¹⁾; поэтому, если орбита изменяется электроном проходящего пучка, то этот электрон должен потерять некоторое количество энергии. Скорость связана с энергией, и следовательно, скорость электрона должна уменьшиться, что можно заметить после того, как пучок выйдет с другой стороны из сосуда с газом. То же самое должно происходить и при прохождении звезды близ нашей солнечной системы. При этом Земля должна была бы получить толчок, что привело бы к увеличению ее энергии и уменьшению энергии звезды.

Чего надо ожидать на основе планетарной модели атома? Должны были бы возникать всевозможные изменения орбит, малые и большие, в зависимости

¹⁾ Любое изменение в природе сопровождается обменом энергией. Если тереть пальцем по столу, то энергия передается от тела к столу, причем энергия тела уменьшится точно на переданную столу величину. Для восполнения этой убыли энергии человек должен поесть.

от того, насколько близко от атома прошел электрон. Следовало ожидать всевозможных потерь (а иногда и выигрыша) энергии, начиная с нулевых; в среднем эти потери должны были бы уменьшаться по мере разрежения газа, так как в нем должны происходить более редкие столкновения.

Наблюдения показали совершенно обратное. Скорость электронов в пучке вообще не менялась, если их начальная энергия была меньше некоторой минимальной величины. Однако последняя была достаточно большой: она более чем в 1000 раз превосходила тепловую энергию электронов при обычных температурах. Если же энергия электронов в пучке превышала этот минимум, то электроны или теряли некоторое определенное количество энергии, или совсем не теряли ее. Эта определенная величина — минимальная величина, а значит, характерная для атомов данного рода, из которых состоит газ; она не зависит ни от плотности газа, ни от каких-либо внешних обстоятельств. Что может означать этот странный результат? Он говорит нам, что энергию электрона в атоме нельзя изменить на произвольную величину. Она или совсем не меняется, или меняется только на определенную и очень большую величину. Здесь появляется понятие о кванте энергии. Атому можно сообщить только некоторые характерные кванты энергии — не больше, не меньше.

Это значит, что атом воспринимает только predetermined порции энергии. Он не принимает маленьких частей этой порции, а только всю. Для атомов каждого сорта имеются свои определенные порции энергии, которые они могут воспринимать. Если атому предлагаются меньшие порции, он вообще не реагирует на них. Он реагирует (изменяет свое состояние) только тогда, когда предлагается как раз должная порция энергии.

Такое положение совершенно несвойственно планетной системе. Проходящая звезда может передать любую энергию земной орбите. Чем больше расстояние до проходящей звезды, тем меньше переданная энергия. Однако в свете современных данных об атоме результат нашего опыта вовсе не так уж поразителен. Он показывает, что атом обладает природ-

ной устойчивостью. Слабые столкновения не могут изменить его; для этого нужны большие количества энергии. Должно существовать нечто, обеспечивающее нормальное характеристическое состояние атома, и для преодоления этого «нечто» необходимо большое количество энергии. Не это ли обуславливает специфичность атомов данного сорта и всегда заставляет электроны возвращаться к конфигурации, характерной для таких атомов?

Перейдем теперь к более количественному способу рассмотрения. Что такое минимальная энергия, необходимая для изменения состояния атома? Сделаем отступление и расскажем, как выражают энергию в атомных проблемах. Энергия атомных частиц измеряется в единицах, называемых «электронвольтами» (эв). Такую энергию получает электрон, пройдя разность потенциалов, равную 1 в. Напряжение, или вольтаж,— это «давление» электричества в выводах штепсельной розетки. Например, в наших квартирах вольтаж, или «давление» в розетках, составляет 127 в, что и заставляет ток идти через лампы и электрические приборы. Если бы электроны могли свободно перемещаться между выводами розетки, то при 127 в (напряжении в нашей сети) они приобрели бы энергию, равную 127 эв. На самом деле в воздухе не могут существовать свободные электроны; если бы они появились, их тут же захватили бы молекулы воздуха. Следовательно, обычно в незамкнутых штепсельных выводах электроны не разгоняются. Однако если поместить выводы штепсельной розетки в область с очень низким давлением воздуха (мало молекул), то вокруг проводов мы увидим свечение, обусловленное электронами, разогнанными полем 127 в до энергии 127 эв.

Электронвольт — очень удобная единица энергии для наших задач. Например, в воздухе при обычной температуре молекулы движутся в разные стороны со средней кинетической энергией, равной $1/30$ эв. Такова средняя энергия теплового движения, приходящаяся на один атом любого вида при комнатной температуре; того же порядка, например, и энергия беспорядочных тепловых колебаний, совершаемых атомами в металле, тех самых колебаний,

которые приводят к плавлению металла при более высоких температурах, когда преодолеваются силы, удерживающие атомы около положений равновесия.

Вернемся к опытам Франка и Герца, в которых электронный пучок передает атомам свою энергию. Пороговая энергия для атома натрия, т. е. наименьшая энергия, которую он способен воспринять и прибавить к своей энергии, оказалась равной 2,1 эв; для атома водорода она равна 10 эв. Эти энергии значительно больше энергии теплового движения при комнатных температурах. Мы немедленно усматриваем в этом связь с тем фактом, что при комнатной температуре атомы газа сохраняют свою тождественность и не изменяются, несмотря на множество столкновений, которые они претерпевают. Энергия этих столкновений значительно меньше пороговой энергии, т. е. меньше минимального количества, или кванта, энергии, которое может воспринять атом. Поэтому опыты Франка и Герца в свою очередь показали удивительную устойчивость атома и дали ее количественное выражение. Атом остается неизменным и устойчивым до тех пор, пока энергия испытанного им столкновения остается меньше некоторой, вполне определенной пороговой энергии, причем этот порог имеет характерное значение для каждого элемента. Франк и Герц «измерили» устойчивость атома.

Результаты Франка и Герца позволяют сделать и дальнейшие выводы. Они дают нам не только минимальную величину энергии, которую может воспринять атом, но и целый ряд точно определенных ее значений, начиная с минимальных, которые способен воспринять атом. Атому можно сообщить только эти количества энергии, все промежуточные количества он отбрасывает. Например, атому водорода можно сообщить только такие количества энергии: 10, 12, 12,5 и 12,9 эв и ряд больших значений с уменьшающимися промежутками между ними. Атом натрия принимает только 2,1, 3,18, 3,6, 3,75 эв и т. д. (рис. 23). Каждая энергия отвечает определенному состоянию движения электрона в атоме. Следовательно, каждая линия представляет какое-то определенное избранное состояние, которое атому разрешено принимать. Все другие состояния, лежащие

между ними, по-видимому, запрещены. Эти избранные состояния называются квантовыми состояниями. Состояние с наименьшей энергией называется основным состоянием, в котором атом находится в нормальных условиях; другие называются возбужденными

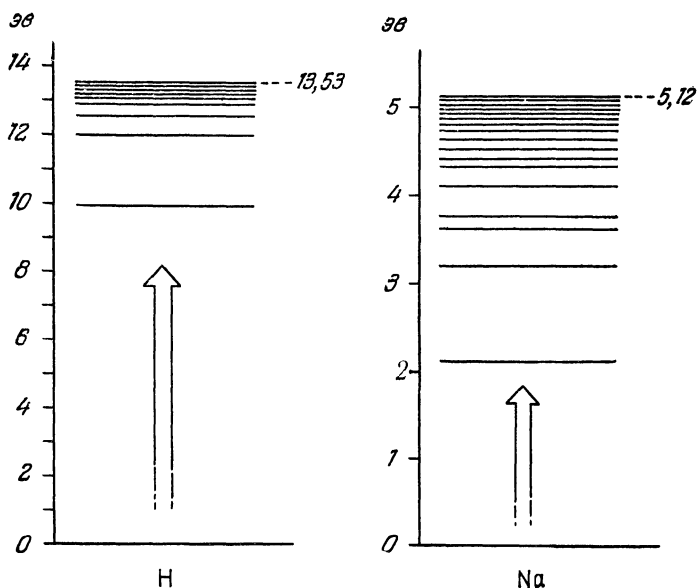


Рис. 23. Энергии квантовых состояний водорода H и натрия Na.

состояниями. Пороговая энергия равна разности между первым возбужденным и основным состояниями.

Все рассказанные выше факты находятся в резком противоречии с тем, что мы можем ожидать от поведения планетарной модели. Почему энергия электрона в атоме должна квантоваться? Почему к энергии атома нельзя прибавить произвольную малую порцию энергии? Сравнивая энергию атома с банковским счетом, мы можем сказать, что банк разрешает вносить на счет и снимать с него только некоторые определенные суммы, чтобы держать величину вклада на одном из заранее предписанных уровней.

Рассмотрим теперь внимательнее различные квантовые состояния. Ряд разрешенных значений энергии атома обычно называют его «спектром». Два спектра на рис. 23 отражают весьма важное общее свойство квантовых состояний. Чем выше расположен уровень энергии относительно уровня основного состояния, тем меньше разность энергий между двумя соседними состояниями. Это свойство наблюдается во всех атомных системах; при больших энергиях возбуждения квантовые состояния становятся столь близкими, что почти сливаются. При таких энергиях квантовые эффекты исчезают. Тогда на атом действует произвольное количество энергии, как на обычную планетную систему. Возвращаясь к сравнению с банковским счетом, мы можем сказать, что странные правила, регулирующие банковский счет, не применяются к очень большим вкладам, потому что размеры дозволенных операций по вкладам становятся тем меньше, чем больше счет.

Этот чрезвычайно важный факт оказался гораздо более общим, чем он выглядит здесь. В настоящее время мы знаем, что при сообщении атому большой энергии он будет вести себя, как планетная система. Эти условия могут возникнуть при весьма высоких температурах, развивающихся при мощном электрическом разряде в газах. При этих условиях газ образует так называемую «плазму» ¹⁾ и атомы теряют свои характерные свойства. Плазма газообразного неона, имеющего по 10 электронов на атом, имеет те же свойства, что и плазма газообразного натрия с 11 электронами. В плазме нет избранных электронных орбит, ни один атом не ведет себя так же, как другой; характеристическое излучение отсутствует. В плазме царит хаос; это хаос очень высоких температур, и он редко встречается на Земле, если только он не создан в наших лабораториях. Однако мы находим плазму в космическом пространстве в виде газа, испущенного Солнцем и другими горячими звездами.

¹⁾ Эта «плазма» не имеет ничего общего ни с плазмой крови, ни с плазмой в живой клетке. Плазма, впервые полученная в разрядной трубке, была похожа на плазму биологических объектов, отсюда и ее название. (Возможно, что термин «плазма» имеет отношение и к ее бесструктурности. (Прим. перев.))

В плазме исчезают все черты упорядочения, т. е. черты, по которым мы отличаем один атом от другого. Порядок и дифференциация встречаются только у атомов, находящихся в нижних энергетических состояниях, далеких по энергетической шкале от плазмы. Только в этих состояниях мы обнаруживаем устойчивость, обуславливающую характерные формы и орбиты атомов и, следовательно, их характерные химические и физические свойства. При высоких энергиях все эти свойства исчезают. Однако следует помнить, что основные трудности возникают у нас при понимании характерных свойств атомов при *низких* энергиях. Хаотическое поведение атомов при высоких энергиях как раз совпадает с тем, которого следовало ожидать, исходя из планетарной модели атома. Именно так должны вести себя планетные системы, сталкиваясь с большими скоростями.

ВОЛНОВАЯ ПРИРОДА АТОМНЫХ ЧАСТИЦ

Лучи частиц и лучи света. Мы переходим теперь к самой поразительной, но и самой важной для понимания существа дела группе наблюдений. Они относятся к природе атомных частиц. Рассмотрим простейшую форму, в которой обнаруживаются атомные частицы, например электроны. Мы можем их наблюдать, когда они удалены из атома и свободно движутся в пустом пространстве. Если все электроны движутся в одном и том же направлении и с одинаковой скоростью, мы назовем их совокупность электронным лучом. Такие лучи возникают в любой радиолампе и, в частности, в телевизионной трубке. Они ударяются изнутри о телевизионный экран и создают изображение. Электронные лучи следует создавать в вакууме, так как в обычном воздухе электроны будут сталкиваться с молекулами воздуха, изменяя свое направление.

Можно было бы ожидать, что такие электронные лучи обладают очень простыми свойствами. Это группы частиц, движущихся по параллельным траекториям с одинаковой скоростью. Частицы движутся в пустом пространстве по прямым линиям; если они встречают препятствие, то рассеиваются по всем

направлениям. Однако при их изучении мы сталкиваемся с очень странными и неожиданными явлениями.

Прежде чем описывать эти явления, рассмотрим луч другого типа, луч света, например хорошо сфокусированный луч прожектора. Предположим далее, что наш луч имеет один цвет. Сравним оба эти луча. Мы ожидаем, что они совершенно различны. Световой луч — это пучок электромагнитных волн, распространяющихся в пространстве в определенном направлении; никакое вещество при этом не движется, изменяется только состояние электромагнитного поля в пространстве. Электронный же луч состоит из малых единиц материи, движущихся прямо вперед. Можно думать, что они так же отличаются друг от друга, как бегущая по озеру волна и плывущая в нем в том же направлении стая рыб.

Вспомним опыты, в которых мы продемонстрировали волновую природу света, в частности установку, в которой на пути луча было поставлено препятствие. Для света схема такого опыта показана на рис. 14, для электронного луча — на рис. 24. Последнюю схему можно считать идеальной для демонстрации различия между «лучом волн» и «лучом частиц». Если на пути «луча частиц» поставить препятствие, то ударившиеся о него частицы не попадут на экран, а частицы, прошедшие мимо экрана, достигнут его; те же частицы, которые пройдут у самого края препятствия, рассеются и отклонятся от своего пути. Следовательно, при использовании экрана, применяемого в телевизоре, мы увидим область тени и область света, с нерезкой границей между ними из-за рассеяния на краю препятствия. В отсутствие волн мы не ожидаем появления полос.

Как же были удивлены физики, когда они, выполнив этот опыт и ряд аналогичных опытов, нашли, что электронный луч проявляет волновые свойства, подобные волновым свойствам светового луча! На фото II была показана картина, которую дает световой луч в устройстве, изображенном на рис. 14. Она идентична картине, изображенной на фото IV и полученной на описанной выше установке (см. рис. 24). Это лишь один из множества удивительных ре-

зультатов, с несомненностью показавших, что электронный луч должен в какой-то степени обладать волновой природой; распространение пучка частиц, по-видимому, носит такой же характер, как и распространение волн. Движение электронов должно быть как-то связано с некоторой волной.

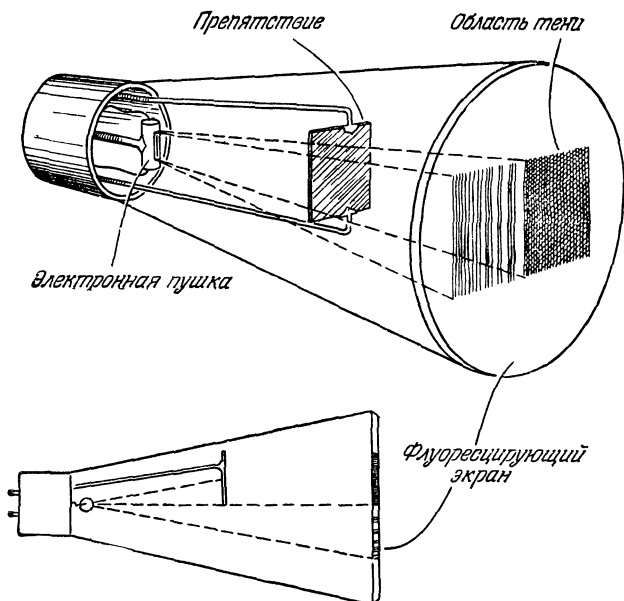


Рис. 24. Схема установки для наблюдения дифракции электронов, аналогичной установке для наблюдения дифракции света (рис. 14).

Количественное изучение полученной таким способом интерференционной картины позволяет измерить длину этой таинственной «электронной волны». Ее длина зависит от скорости электрона: чем больше скорость, тем меньше длина волны; для электронов с энергией в несколько электронвольт длина волны примерно равна размеру атома. Это действительно очень малая величина, и поэтому так трудно обнаружить волновую природу электронных лучей. В большинстве практических приложений электронных

лучей (например, в телевизионных трубках) их волновая природа вообще не играет никакой роли.

Тем самым было сделано фундаментальное открытие — обнаружена волновая природа частиц. Полученный результат весьма поразителен и в высшей степени неожидан. Было выполнено множество экспериментов, прежде чем физики действительно убедились в том, что волновые эффекты не были вызваны какой-либо иной причиной. Однако все эти опыты делали все более ясным участие волн в движении электронов и других атомных частиц, например протонов.

Теперь возникает очевидный вопрос: как электрон может быть одновременно и частицей и волной? Волна — это нечто, непрерывным образом распределенное в пространстве, тогда как частица строго локализована. В любой момент частица находится здесь, а не там, а волна есть «натяжение» в пространстве, которое должно захватывать по крайней мере несколько длин волн, чтобы представлять то, что мы можем назвать волной. Можно ли сделать решающий опыт, чтобы получить однозначный и недвусмысленный ответ? Чем же в действительности является электрон — частицей или волной?

Это, вероятно, наиболее интересный вопрос современной физики. Но прежде чем обсуждать его, мы должны узнать самую поразительную вещь об электронных волнах, а именно то, что двойственная природа электронов как частиц и волн дает ключ к загадке строения атома! Неожиданные свойства электронов, вращающихся вокруг атомного ядра, прямо связаны с их волновой природой.

Свойства волн в ограниченном пространстве. Для того чтобы понять связь между электронными волнами и свойствами атомов, мы должны сначала изучить особенности поведения волн, распространяющихся в ограниченном пространстве.

Возьмем простейший пример — волны, бегущие по длинной веревке. Если веревка очень длинная, то мы можем создать бегущую волну, сообщая веревке небольшой, перпендикулярный ее направлению импульс. Если натянутая веревка привязана за один конец к неподвижному предмету, то импульс побежит

по ней и в конце концов возвратится к нам, отразившись от того конца, где она привязана. Двигая соответствующим образом рукой, мы можем сообщить волне на веревке любую форму — по желанию сделать волну короткой или длинной. При прохождении длинной волны будут происходить медленные колебания, а при коротких волнах веревка будет колебаться быстро. Теперь закрепим веревку между

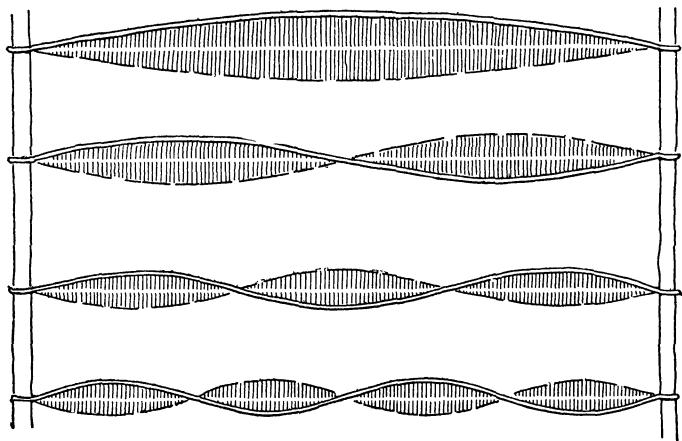


Рис. 25. Стоячие волны.

Колебания струны, закрепленной в двух точках. Возникают только такие колебания, при которых между закрепленными точками укладываются только 1, 2, 3, 4 и т. д. полуволны. Горизонтальная прямая — положение струны в покое.

двумя близкими точками. При этом лучше рассматривать уже не веревку, а струну, натянутую между двумя точками, например струну на скрипке. Форма колебаний такой струны называется *стоячей волной*. Теперь мы уже не можем получать любые частоты колебаний или любые длины волн. Действительно, можно возбудить только такие колебания, полуволна которых один, два или любое целое число раз укладывается в промежутке, разделяющем точки закрепления (рис. 25). При постоянном натяжении струны определены не только формы колебаний, но и их частоты (числа колебаний в 1 сек). Каждое из различных колебаний, которые можно возбудить в такой струне, имеет свою характерную частоту, так

что струна может колебаться только с одной из этого ряда частот. Наименьшая частота, возбудить которую легче всего, отвечает полуволне, в точности укладывающейся один раз на расстоянии между точками закрепления. Ее и получает скрипач, приводя струну в движение смычком. Однако можно возбудить и колебания высших порядков, так называемые флажолетные тона, при которых в струне укладываются две или большее число полуволн.

Даже когда звучит основной тон, движение струны не отвечает только колебаниям низшего типа. Истинное движение струны является комбинацией различных разрешенных типов движения. В действительности обычный музыкальный тон скрипки содержит известное количество высших частот, называемых гармониками. Их присутствие важно для красоты звука. Разница между игрой Пабло Казальса и игрой заурядного виолончелиста заключается в различной примеси высших частот. Но, какова бы ни была эта комбинация, в нее могут входить только те частоты, которые содержатся в наборе разрешенных комбинаций.

Данные, полученные нами при изучении струны, справедливы для волн всех видов. Если волны распространяются в ограниченном пространстве, мы видим систему волн определенных типов с рядом частот, характерных для данной системы. На этом основано большинство музыкальных инструментов. В струнных инструментах используются ряды дискретных частот, характерных для колебаний данной струны. В духовых инструментах используются определенные частоты воздушных волн, заключенных в трубе, будь то тромбон или органная труба.

Другой интересный пример таких волн легко увидеть при наблюдении волн на воде, распространяющихся в ограниченном пространстве, например в стакане. Поразительную картину можно обнаружить, наблюдая за поверхностью воды в стакане. В летящем винтовом самолете, когда частота колебаний мотора становится равной одной из возможных частот колебаний воды в стакане, становится заметной специфическая картина поверхностных волн. При изменении частоты дрожания мотора или при изменении

количества воды в резонанс с дрожанием приходят другие колебания. Вы увидите колебания с характерными частотами, которые связаны с определенными волновыми картинами.

Вполне возможно рассчитать форму этих картин и предсказать, при каких частотах следует ожидать их появления. Для этого нужно только знать форму и размер стакана и свойства волн на поверхности воды.

Электронные волны и квантовые состояния. Вернемся теперь к электронным волнам. Как можно ограничить в пространстве электронные волны и наблюдать явления, подобные описанным? В любой ситуации, ограничивающей движения электронов, будут ограничены и электронные волны. Такая ситуация возникает, например, тогда, когда электрон находится близко от атомного ядра. Положительный заряд ядра притягивает электрон и мешает ему покинуть область, непосредственно примыкающую к ядру; движение электрона ограничено пространством, близким к ядру. Как это скажется на электронных волнах? Такой вопрос поставил Эрвин Шредингер в 1926 г., и он же ответил на него.

Ему удалось рассчитать форму и частоты характеристических волновых картин, которые получаются, когда электрон привязан к ядру. Если известна связь между длиной электронной волны и скоростью электрона, это сводится к простой задаче динамики стоячих волн. Результат дает ряд отдельных колебаний, из которых каждое отвечает определенной волновой картине и определенной частоте. Волновая природа электрона сразу же «объясняет», почему электрон в атоме может обладать только определенными формами движения.

Этот результат имеет фундаментальное значение. Он дает связь между волновой природой электрона и существованием дискретных состояний в атоме. Здесь мы коснулись самого существа природы. Если электрон может двигаться только в ограниченном пространстве вблизи ядра, то его волновые свойства разрешают лишь вполне определенные, заданные формы движения. Поэтому атом не может изменять свое состояние непрерывно, он должен переходить скачком из одного разрешенного состояния в другое,

Атом будет оставаться в состоянии с наименьшей энергией до тех пор, пока он не получит достаточно энергии, чтобы подняться в следующее состояние, как это и наблюдалось в опытах Франка и Герца.

Успех электронно-волновой модели атома особенно замечателен тем, что она позволяет количественно объяснить все детали наблюдаемых фактов. Шредингер сначала решил простейшую задачу о водородном атоме, в котором к ядру «привязан» только один электрон. Он получил ряд колебательных состояний, во всех отношениях отвечающих наблюдаемым квантовым состояниям водородного атома. В частности, частоты колебаний электронной волны в точности соответствуют энергиям квантовых состояний, если воспользоваться при этом знаменитой формулой Планка, связывающей энергию с частотой. Соответствующая энергия E всегда равна частоте ω (омега), умноженной на постоянное число h , т. е. $E = h\omega$. Число h — это так называемая постоянная Планка¹⁾.

Точность результатов, вытекающих из этого соотношения, почти неправдоподобна! Шредингер вычислил частоты колебаний электронной волны, ограниченной притяжением. Он умножил эти частоты на постоянную Планка и получил — с точностью до последнего десятичного знака — энергии квантовых состояний водорода, разрешенные значения энергетического «банковского счета» водородного атома²⁾. Очевидно, что волновая природа электрона должна служить решающим фактором для понимания свойств атома.

Ограничение электронных волн в пространстве обуславливает существование ряда разрешенных состояний и предписанных частот. Если вспомнить соотношение между частотой и энергией, то мы получим ряд состояний с разрешенной энергией. Состояние с наименьшей частотой является важнейшим, потому

¹⁾ h — очень малое число. Если измерять энергию в электронвольтах, а частоту — числом колебаний в секунду, то $h = 4 \cdot 10^{-15}$. Колебания с частотой 10^{15} в секунду соответствуют энергии 4 эв.

²⁾ Каждый, кто знакомится с этим фантастическим открытием, согласится со знаменитым итальянским физиком Энрико Ферми, который в своих лекциях восклицал по этому поводу: «Нет необходимости согласоваться так хорошо!»

что оно обладает наименьшей энергией; это нормальное состояние атома. В таком состоянии волновая природа проявляется наиболее отчетливым образом. Ограниченные в пространстве электронные волны в атомах нельзя наблюдать непосредственно. Можно измерить их длину, частоты (точнее, разности между частотами, определяемые как разности энергий) и другие косвенные параметры. Но весьма поучительно видеть изображения электронных волновых картин. Это не фотографии, снять их, как мы дальше увидим, невозможно, а модели, построенные на основании вычислений. На фото V показаны картины электронных волн, или электронные конфигурации, расположенные в порядке возрастания частоты или энергии, для последовательных квантовых состояний электрона, движение которого ограничено притяжением к ядру. Самое низшее, или основное, состояние является вместе с тем и самым простым: чем выше частота, тем сложнее картина. Основное состояние сферически симметрично. Следующие состояния имеют вид «восьмерки». Более высокие состояния обычно имеют более сложный вид, хотя среди них встречаются и относительно простые.

Эти картины чрезвычайно важны, как фундаментальные формы, по которым строится вещество. Это формы, и притом единственно возможные, которые может принимать «движение» электрона в условиях, господствующих в атоме, т. е. под влиянием центральной силы (притяжение к ядру), связывающей электрон. Следовательно, подобные картины символизируют способ, которым природа связывает все нас окружающее и придает ему форму.

Картины на фото V и присущая им симметрия определяют поведение атомов, на них основано упорядоченное расположение атомов в молекулах и симметричное расположение их в кристаллах. Совершенство кристаллов отражает в большем масштабе фундаментальные формы атомных картин. В конечном счете все закономерности формы и строения, которые мы видим в природе, начиная от гексагональной симметрии снежинок и до сложной симметрии живых форм в цветах и животных, основаны на симметрии атомных картин.

Рассматривая эти картины, мы замечаем, что, чем выше частота (или энергия), тем мельче структура картины, тем меньше расстояния между гребнями и впадинами волн. Длина волны уменьшается. При переходе к очень высоким частотам (энергиям) структура картины становится столь мелкой, что она выглядит почти непрерывной. Следовательно, описываемое ею движение будет почти таким же, как и у обычной частицы, лишенной волновых свойств. Мы снова убеждаемся в том, что наша волновая картина точно воспроизводит ситуацию в атоме. При больших энергиях квантовые явления становятся несущественными и атом ведет себя, как обычная планетная система. Переход к «плазменным» условиям при большой энергии тоже объясняется волновой природой электрона.

Атом водорода в своем основном состоянии колеблется в соответствии с простейшей из возможных картин (см. первый снимок фото V). Другие атомы, однако, даже в своих основных состояниях дают более сложные картины. Это стало понятным после того, как Вольфганг Паули сформулировал в 1927 г. весьма важный принцип. Он гласит, что если в атоме находится больше одного электрона, то каждый из них должен создавать различные картины. Поэтому при добавлении электрона должна возникать следующая (по порядку) конфигурация. Основное состояние сложного атома соответствует возбужденному состоянию более простого.

Здесь мы находим объяснение тому, что прибавление или удаление одного электрона так сильно сказывается в атомном мире. Картина, обусловленная последним электроном, определяет конфигурацию всего атома. Это в свою очередь определяет способ, которым соединяются атомы, т. е. то, образуют ли они кристалл, жидкость или газ. Наблюдаемая картина может заметно изменяться при переходе от некоторого числа электронов к ближайшему большему (см. фото V). В мире атомов количество переходит в качество, одним электроном больше — и свойства полностью изменяются.

Открытое Шредингером фундаментальное значение электронных волн для строения атома и развитие

этой теории Гейзенбергом, Максом Борном и Паули составили поворотный пункт в понимании природы человеком, сравнимый с ньютоновским открытием всемирного тяготения, электромагнитной теорией света Максвелла и теорией относительности Эйнштейна. Свойства атома, казавшиеся столь странными и непонятными на основе планетарной модели, нашли свое место в рамках волновой теории. Стоячая волна принимает некоторые определенные формы и частоты, так же как колебания воздуха в органной трубе, колебания скрипичной струны или дрожание водной поверхности в колеблющемся стакане. Всем этим колебаниям соответствует ряд волновых картин, начиная с самой простой, в которой колебания происходят с наименьшей частотой, и кончая более сложными картинами с высокими частотами. То же относится и к электронным волнам в атоме.

На основе этого нового понимания природы мы можем понять три замечательных свойства атома, перечисленные в конце предыдущей главы. *Устойчивость* атомов обусловлена тем, что для перехода от простейшей картины к более сложной необходимо сообщить им значительное количество энергии¹⁾. Пока количество сообщаемой атому энергии меньше указанного, сам атом остается в наинизшей конфигурации, которая, таким образом, отвечает наибольшей устойчивости. *Тожждественность* атомов обусловлена тем, что волновые картины всегда одинаковы и определяются способом ограничения волны в пространстве. Один атом натрия тождествен другому потому, что во всех атомах электронная волна ограничена теми же условиями, т. е. притяжением ядра и электрическим действием других электронов в атоме. Тожждественность двух атомов золота обусловлена тем, что одинаковое число электронов связано одним и тем же зарядом в центре, и поэтому эти электроны совершают одинаковые волновые движения. Наконец, *воспроизводимость*, т. е. способность возвращения к исходной форме после воздействия, как раз совпадает с той, которую и следует ожидать

¹⁾ Согласно формуле Планка, эта энергия равна разности частот, умноженной на постоянную Планка.

для случая волновых явлений, обладающих устойчивостью. При восстановлении исходных условий колебания электрона снова должны происходить так же, как и до воздействия, поскольку они однозначно определяются условиями, при которых движется электрон, и совершенно не зависят от того, что происходило ранее. Наблюдаемые конфигурации вообще не зависят от предистории атома; мы можем разрушить атом, удаляя несколько электронов, или деформировать его, конденсируя наше вещество до

HARMONICIS LIB. V. 207

omnia (infinita in potentiâ) permeantes actu : id quod aliter à me non potuit exprimi, quam per continuam seriem Notarum intermedia- CAP. VI

The musical notation consists of two rows of staves. The first row contains four staves labeled Saturnus, Jupiter, Mars ferè, and Terra. The second row contains three staves labeled Venus, Mercurius, and Hic locum habet etiam). Each staff contains a series of diamond-shaped notes connected by lines, representing harmonic intervals. The notes are placed on various lines and spaces of the staves, which have different clefs and key signatures.

rum. Venus ferè manet in unifono non æquans tensionis amplitudine vel minimum ex concinnis intervallis. Atqui signatura duarum in communi S. Celeri Octava

Рис. 26. Гармония сфер по Кеплеру.

твердого состояния (как это делалось в примере с натрием в предыдущей главе), но, как только атом вернется в исходные условия, электронные волны примут ту же форму, какую они имели вначале. Существует только одна конфигурация с наименьшей частотой (или энергией).

Замечательно, что мы на самом деле нашли в мире атомов то, что Пифагор и Кеплер тщетно искали в движении планет. Они полагали, что Земля и другие планеты движутся по особым орбитам, единственно возможным для каждой планеты и определенным

каким-то основным принципом, не зависящим от частной судьбы и предистории нашей планетной системы. Такой принцип отсутствует в движении планет, но он существует в движении атомных электронов — это волновой принцип. Мы вспомним здесь пифагорейскую гармонию мира: квантовые состояния атома имеют предопределенные конфигурации и частоты. Каждый атом водорода во Вселенной задевает одну и ту же струну, колебания которой определяются набором характеристических частот. Здесь «гармония сфер» вновь появляется в мире атомов, но на этот раз под нею понимаются колебательные явления в стоячих электронных волнах (рис. 26).

СВЕТОВЫЕ КВАНТЫ

Зернистая структура света. Мы узнали, что электроны и другие атомные частицы проявляют волновые свойства. Пучки частиц ведут себя иногда так же, как и волны. Было показано, что это свойство лежит в основе квантового поведения атомов. В ходе исследований оказалось, что подобная двойственность свойственна не только частицам. Световые волны иногда ведут себя так, как если бы они были частицами.

Все данные о распространении света показывают, что световой луч — это колебания, образующие непрерывную электромагнитную волну. Но когда изучается действие света на вещество, наблюдаются некоторые неожиданные явления, которые, как нам кажется, противоречат представлению о непрерывности светового потока. Что же происходит при падении света на вещество? Если объект, на который падает свет, прозрачен, как, например, оконное стекло, то свет частично отражается и частично проходит сквозь него. Если же этот объект непрозрачен (кусочек угля) или частично прозрачен (цветное стекло), то большая часть света и не проходит сквозь него, и не отражается, как бы исчезая в объекте. Так как свет есть форма энергии, то он может исчезнуть, только передавая каким-либо способом свою энергию веществу. Такое его исчезновение называется поглощением света.

Энергия поглощенного света должна проявиться в какой-нибудь другой форме. Когда солнечный свет поглощается нашей кожей, мы чувствуем тепло. При поглощении света некоторыми металлами его энергия часто передается электронам; последние получают иногда так много энергии, что покидают металл. Этот эффект называется фотоэлектрическим эффектом; мы используем его на практике при преобразовании световых импульсов в электрические.

Энергию, переданную веществу при поглощении света, можно измерить с большой точностью. Эти измерения дали в высшей степени неожиданный результат; оказалось, что световая энергия может поглощаться только порциями определенной величины; доля такой порции никогда не поглощается. Такие световые единицы, или порции, называются световыми квантами, или фотонами. Если дело идет о действии света на вещество, то мы можем сравнить световой луч с потоком снарядов. В каждом снаряде содержится одно и то же количество взрывчатого вещества. Когда снаряд попадает в объект, то его действие определяется количеством взрывчатого вещества. Более сильное освещение означает большее число таких же взрывов, но не более сильные взрывы.

При фотоэлектрическом эффекте каждый квант, попадающий в металл, заставляет электрон вылетать из металла. Энергия вылетающего электрона служит мерой величины кванта (мерой количества взрывчатого вещества в каждом снаряде). Число вылетающих электронов служит мерой интенсивности светового пучка.

Количество энергии в световом кванте зависит от света, с которым мы имеем дело. Оно различно для света разных длин волн: для более длинных волн это количество меньше, для более коротких — больше (рис. 27).

Энергия кванта видимого света очень мала. Она составляет всего лишь несколько электроновольт, около 10^{-12} (миллионная доля одной миллионной) энергии, потребной для создания едва воспринимаемого ощущения от прикосновения к вашему пальцу. Квант радиоволн (тоже вид излучения) еще в милли-

ард раз меньше, так как длины их волн во столько же раз больше. Конечно, сетчатка нашего глаза во много раз чувствительнее к свету, чем кончики пальцев. И все же нельзя увидеть отдельного кванта, так как он слишком мал для этого. Если бы мы могли увидеть отдельный квант, то очень слабый источник света казался бы нам мигающим, так как мы видели бы свет только при попадании кванта на сетчатку.

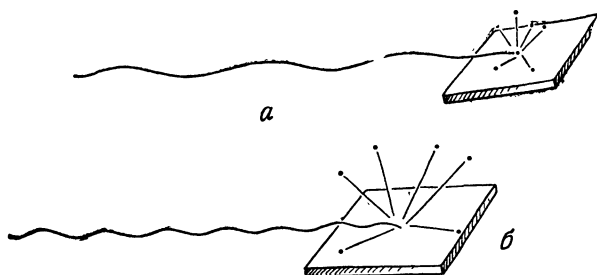


Рис. 27. Фотоэлектрический эффект.

a — свет с большой длиной волны, падая на металл, вырывает медленные электроны; *b* — свет с малой длиной волны выбивает быстрые электроны.

Хотя свет — это электромагнитная волна, его действие на вещество, на наш глаз, на фотоэлемент, квантовано. Он действует так, как если бы световой луч состоял из маленьких зерен, или корпускул, одного размера. Это подчеркивает корпускулярно-волновой дуализм природы. Электроны представляют собой частицы с волновыми свойствами, свет — волну с корпускулярными свойствами.

Подойдем теперь к вопросу о квантах с количественной стороны. Величина кванта световой энергии связана с частотой света той же формулой, формулой Планка, которую мы уже встречали. Энергия кванта E дается соотношением $E = h\omega$, где ω — частота света¹⁾, а h , — как и ранее, постоянная Планка.

¹⁾ Частота света есть число колебаний электрического поля в секунду. Большие длины волн отвечают низким частотам, короткие волны — высоким частотам. Частота обычных радиоволн — порядка 10^8 в 1 сек, частота видимого света — порядка 10^{15} в 1 сек.

Квант видимого желтого света ($\omega = 5 \cdot 10^{14}$ колебаний в секунду) оказывается равным примерно 2,1 эв.

Как бы ни были малы кванты, они сравнимы по величине с энергиями атомов. Они по порядку величины такие же, как энергии квантовых состояний атомов. Например, квант желтого света (2,1 эв) точно равен энергии, необходимой, чтобы перевести атом натрия из основного состояния в первое возбужденное.

Атомы и световые кванты. Каким бы странным ни казалось представление о световых квантах, оно открывает новую сторону вопроса о том, как атом испускает и поглощает свет, как свет производится атомами и как он влияет на них. Рассмотрим совместно понятие о световых квантах и понятие квантовых состояний атомов. Мы нашли, что атом может находиться только в определенных квантовых состояниях с определенными энергиями, характерными для атомов каждого сорта. Следовательно, атом может получать или отдавать энергию только в количествах, соответствующих разностям энергии между квантовыми состояниями. Если атом поглощает или испускает свет, энергия этого света должна равняться одной из таких разностей. Следовательно, атом может поглощать или испускать свет, кванты которого имеют «правильную» величину, а именно величину, равную одной из разностей энергий между атомными состояниями.

Это свойство сразу же объясняет, почему атомы поглощают и испускают только свет с определенной, характерной для них частотой. Например, атом в основном состоянии может воспринимать свет, квант энергии которого как раз равен энергии, необходимой для перевода атома в одно из более высоких квантовых состояний. Атом может поглощать свет только тех частот, которым соответствуют эти кванты. То же относится и к испусканию света. Атом может испускать свет, только находясь в каком-либо состоянии выше основного, причем квант этого света должен соответствовать разности энергий между данным и более низким состояниями. Атом может получать или отдавать только такие кванты, чтобы баланс энергии отвечал переходу в одно из квантовых

состояний. Поэтому свет, поглощенный или испущенный атомом, должен иметь частоту, отвечающую разности двух характеристических значений энергии.

Рассмотрим в качестве примера атом натрия. В холодном газообразном натрии все его атомы находятся в основном, или невозбужденном, состоянии. Излучение не испускается. Газ прозрачен для света; он непрозрачен лишь для света, частота которого соответствует одному из квантов, способных перевести атом в возбужденное состояние. Например, согласно рис. 23, первое возбужденное состояние натрия на $2,1 \text{ эв}$ выше основного. Следовательно, квант света с частотой ω , равной $\frac{2,1 \text{ эв}}{h} = 5,2 \cdot 10^{14}$, имеет требуемую величину, и такой свет будет поглощаться газообразным натрием. Это характерный желтый свет. Сообщим теперь газообразному натрию энергию, нагревая его или пропуская через него электрический разряд, как это делается в желтых натриевых лампах, применяемых для освещения некоторых шоссежных дорог. При этом часть атомов натрия перейдет в более высокое возбужденное квантовое состояние. Такие атомы могут теперь испускать свет. Атомы в первом из возбужденных квантовых состояний испускают тот же желтый свет, который поглощает холодный газ. Именно этот свет мы и видим в излучении натриевых ламп. Если температура газа или энергия разряда повышается, создаются все более высокие квантовые состояния и излучается свет, окрашенный несколькими цветами.

Весьма замечательно, что результаты опытов по излучению света великолепно согласуются с опытами Франка и Герца. Все без исключения частоты, испускаемые или поглощаемые атомами, соответствуют переходам из одного квантового состояния в другое.

ДОПОЛНИТЕЛЬНОСТЬ КОРПУСКУЛЯРНОЙ И ВОЛНОВОЙ КАРТИН

Вернемся теперь к самому основному вопросу: как электрон может быть одновременно и волной и частицей? Дать простое объяснение здесь очень трудно. Как показала неожиданная двойственная

характеристика вещества, наши обычные представления о движении частиц не годятся для описания того, что происходит в мире атомов. В конце концов, эти понятия возникли в результате опыта человека, полученного при изучении видимых предметов, которые во много миллиардов раз больше атомных частиц.

Для того чтобы понять, что происходит в этом микромире, надо быть готовым оставить привычный способ мышления и заменить его новыми понятиями, навязанными нам природой.

Одна из черт классической физики, которую надо исследовать в связи с атомными явлениями, относится к их «делимости». Существует представление, что каждый физический процесс можно мысленно разложить на последовательность отдельных частных процессов. Согласно этому представлению, каждый процесс можно проследить шаг за шагом в пространстве и во времени, по крайней мере теоретически. Орбиту электрона вокруг ядра мы представляем себе как последовательность малых перемещений. Совместимо ли такое описание с тем, что на самом деле находится в атоме?

Согласно нашему обычному взгляду на вещи, электрон должен быть либо частицей, либо волной. Он не может быть одновременно и тем и другим. Внимательно следя за электроном вдоль всего его пути, мы должны решить этот вопрос и отнести электрон к одной или к другой категории. Вот здесь и возникает проблема делимости атомных явлений. Можно ли осуществить такую слежку? При этом возникают и технические трудности. Для того чтобы тщательно «рассмотреть» детали строения орбиты, следует применять свет с очень малыми длинами волн, ибо можно увидеть лишь такие объекты, размер которых значительно больше длины волны используемого для наблюдения света. Однако свет с такой малой длиной волны отвечает весьма большой частоте, т. е. очень большому кванту энергии. Действительно, у света с длиной волны порядка диаметра атомной орбиты квант энергии настолько велик, что его более чем достаточно, чтобы выбить электрон из атома. Попадая на электрон, он столкнет его с орбиты и разрушит самый объект нашего исследования.

Этот результат характерен не только для тех случаев, когда при исследовании электронных орбит применяется свет. В самом общем случае все результаты измерений, на основе которых должно быть вынесено решение о волновой или корпускулярной природе электрона (или протона, или любой другой частицы), обладают тем же свойством. Если произвести такое измерение, объект полностью изменит свое состояние вследствие самого этого действия, и полученный результат будет относиться не к исходному состоянию, а к тому, в котором оказался объект благодаря измерению. Однако это последнее состояние имеет столь большую энергию, что больше не проявляет волновых свойств.

Квантовая природа, или зернистость, света и всех других средств наблюдения не позволяет отличить волновую картину от корпускулярной. Она не дает возможности разделить орбиту на последовательность перемещений, независимо от того, идет ли речь о смещениях частиц или о волновых колебаниях. Если мы насильственно подразделим интересующий нас процесс и попытаемся посмотреть на волну более пристально, чтобы увидеть, где «на самом деле» находится электрон, то мы где-то обнаружим его как реальную частицу, но разрушим при этом неуловимую индивидуальность квантового состояния. Волновая его природа исчезнет, а с нею вместе исчезнут и характерные свойства атома. В конце концов, ведь именно эта волновая природа обуславливает типичные свойства квантовых состояний: простую форму, возвращение к первоначальной форме после возмущения и все другие специфические свойства атомов.

Утверждение о волновой природе электрона сделано на основании представления о неделимости квантовых состояний. Весьма важное новое понимание квантовой физики состоит в признании того, что индивидуальные квантовые состояния образуют неделимое целое, которое существует только до тех пор, пока на него не воздействуют проникающие средства наблюдения. В своем квантовом состоянии электрон не является ни волной, ни частицей в старом понимании. Квантовое состояние — это форма существования предоставленного самому себе электрона

в условиях, характеризующихся малой энергией. Он является некоторой определенной индивидуальностью, конфигурация которой отвечает волновому движению со всеми его особыми свойствами, распространяющимися на ограниченную область пространства. Любая попытка увидеть детали этой волны путем прямого наблюдения неизбежно разрушит ее, так как средства наблюдения сообщат системе столь большое количество энергии, что условие малости последней перестанет быть справедливым.

На данной стадии нашего обсуждения становится вполне естественным вывод, что предсказание атомных явлений иногда должно носить лишь вероятностный характер. В качестве примера этого положения попытаемся предсказать точное место, в которое должен попасть электрон после разрушения его квантового состояния под действием излучения большой энергии. Если квантовое состояние исследовалось тонким пучком света, то можно сказать, что электрон будет находиться где-то в области соответствующей ему волны, но нельзя точно предсказать его место. В таком случае можно делать только вероятностные предсказания, например, можно сказать, что с наибольшей вероятностью электрон будет находиться там, где соответствующая ему волна обладает наибольшей интенсивностью ¹⁾.

¹⁾ Невозможность измерения некоторых величин, относящихся к атомным частицам, служит основой знаменитого принципа неопределенности Гейзенберга. Согласно этому принципу, невозможно вполне точно определить одновременно и положение и скорость электрона. Конечно, если бы это было возможно, то электрон следовало бы считать частицей, а не волной. Принцип Гейзенберга утверждает, что невозможно с достаточной степенью точности произвести опыт, позволяющий решить, обладает ли электрон волновой или корпускулярной природой. Этот принцип выражает отрицательное утверждение, что некоторые измерения невозможны. Однако здесь следует ясно понять весьма важное положение, а именно то, что невозможность некоторых измерений есть нечто большее, чем просто техническое ограничение, которое когда-нибудь удастся преодолеть, воспользовавшись более хитроумными средствами и способами измерения. Если бы такие измерения можно было выполнить, то не пришлось бы говорить о существовании волновых и корпускулярных свойств, так как измерения исключили бы одну из этих возможностей, как ошибочную. Результаты множества измерений и наблюдений показывают, что наши объекты обладают как волновыми, так и корпускулярными свойствами. Поэтому

Квантовая механика дала нам неожиданный, но чудесный ответ на очень важный вопрос. С одной стороны, атомы суть малые частицы вещества; считается, что они неделимы и наделены всеми характерными свойствами вещества, частицами которого они являются. С другой стороны, атомы имеют какую-то определенную структуру; они состоят из электронов и ядер, которые обязательно должны совершать механические движения, похожие на движения, совершаемые планетами вокруг Солнца. Следовательно, трудно себе представить, чтобы атомы обладали указанными выше свойствами.

Ответ на этот вопрос был получен после открытия квантовых состояний, которые до известной степени удовлетворяют первому требованию. Волновые свойства наделяют атом свойствами тождественности, целостности и специфичности, но область, в которой сохраняются эти характеристики, ограничена. Только если атомы подвержены воздействию, меньшему некоего характеристического порога, они сохраняют свою тождественность и свои специфические свойства. При более сильном воздействии они теряют свои типично квантовые свойства и их поведение становится нетипичным, а именно таким, какого следовало бы ожидать, исходя из механических свойств их внутренней структуры.

Квантовые состояния нельзя описать в рамках механической модели. Это новое состояние материи, отличное от того, которое дает нам опыт с крупными объектами. Оно обладает особым свойством ускользать от обычных наблюдений, так как подобные наблюдения обязательно изменяют условия существования квантовых состояний. Великий датский физик Нильс Бор, который сделал больше всех для разъяснения этих представлений, ввел для описания создавшейся ситуации специальный термин — *дополнительность*. Два описания атома — подобное

ограничения Гейзенберга должны иметь более глубокий смысл: они с необходимостью вытекают из двойственной природы атомных объектов. Если бы эти ограничения оказались несправедливыми, то все наше истолкование огромной области атомных явлений превратилось бы только в длинную цепь ошибок и в основе всего поразительного успеха квантовой теории лежали бы случайные совпадения.

волне квантовое состояние, с одной стороны, и планетарная модель, с другой,— являются дополнительными описаниями, причем каждое из них одинаково правильно, но применимо в различных условиях.

Квантовые состояния могут существовать только до тех пор, пока атом свободен от внешних воздействий или пока энергия этих воздействий меньше квантового порога. Тогда атом находится в состоянии, характерном только для него, и ведет себя, как неделимое целое. Так обстоит дело, когда наше вещество находится в нормальных условиях. Однако, если мы попытаемся рассмотреть детали квантового состояния при помощи какого-либо точного инструмента, мы обязательно сообщим атому слишком большое количество энергии. При этих условиях атомы ведут себя так, как если бы они находились при весьма высокой температуре, т. е. в виде плазмы. Тогда мы увидим, что электроны превратились в обычные частицы, движущиеся под действием силы притяжения ядра, без каких-либо квантовых явлений, в точности так, как можно было бы ожидать, имея дело с обычными «старомодными» частицами.

Атомные явления представляют нам действительность гораздо более богатой, чем мы привыкли видеть ее в классической, макроскопической физике. Волновые свойства квантовых состояний, неделимость таких состояний, тот факт, что мы не можем полностью описать атом при помощи привычных понятий и объектов, например частиц или классических волн,— со всем этим нам не приходится сталкиваться в макром мире. Поэтому описание атома не может быть в такой же степени отделено от процесса его наблюдения, как и описание классическое. Мы можем описать атомную реальность, только честно сказав, что происходит, когда мы наблюдаем явление различными способами, хотя непосвященному может показаться невероятным, что один и тот же электрон ведет себя так различно, если его наблюдают в двух взаимно дополнительных ситуациях. Но эти свойства не делают электрон менее реальным, чем что-либо, наблюдаемое в природе. Квантовые состояния электрона — это основа реальности, которую мы видим вокруг себя.

ГЛАВА VI

ХИМИЯ

ХИМИЧЕСКАЯ СВЯЗЬ

В предыдущей главе мы рассмотрели строение атомов и показали, что волновая природа электронов наделяет атомы их типичными свойствами. Мы смотрели на каждый атом как на отдельную единицу, но не изучали вопроса о том, что происходит при сближении двух атомов. Однако мы знаем, что наименьшими единицами многих веществ служат не атомы, а молекулы, т. е. группы атомов, тесно связанных друг с другом. Если мы хотим понять строение материи, то нам надо узнать не только строение атома, но и причину соединения атомов в молекулы. Мы должны понять природу того, что называется химической связью, которая держит вместе атомы в молекуле, и познакомиться с некоторыми типичными молекулами и их свойствами.

До создания квантовой механики ученые полагали, что существует особая «химическая сила», ответственная за химическую связь. Эта сила должна была обладать совершенно особыми свойствами, так как некоторые атомы соединяются друг с другом очень хорошо, а другие совсем не соединяются. Например, если два атома водорода и один атом кислорода соединились, образовав одно целое, молекулу воды, то к ней уже нельзя присоединить добавочный атом. Молекула насыщена; химические силы как бы исчезли и не могут больше действовать на другие атомы.

Квантовая механика дала полное объяснение химическим явлениям. Здесь не действует никакая новая сила. Химическая связь между атомами возникает в результате взаимодействия электронных

конфигураций различных атомов. Химическая связь возникает тогда, когда эти конфигурации хорошо подходят друг другу, как зубцы шестерни или куски разрезанной картины в головоломке. Конфигурации смешиваются и переплетаются, когда атомы приведены в соприкосновение, и в результате появляются новые конфигурации.

Одни атомные конфигурации очень хорошо подходят друг другу, другие — не так хорошо. Химическая связь очень сильно зависит от рода соединяющихся атомов. Иногда атомы подходят друг к другу

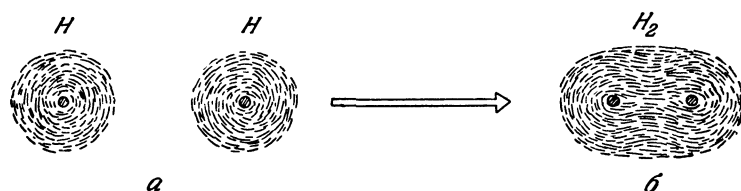


Рис. 28. Два атома водорода, каждый с простейшей электронной конфигурацией (см. фото V), образуют молекулу водорода, в которой обе электронные конфигурации сливаются в одну эллиптическую. Точки в центре — ядра водорода.

так хорошо, что при их сближении возникает одна крупная округлая единица, напоминающая первую картину на рис. 28, но только несколько большая и более компактная. В этих случаях образуется насыщенная молекула, не присоединяющая других атомов. Насыщенная молекула напоминает сложенную из кусков картину-головоломку, все части которой находятся на своих местах и где нет места еще каким-то кусочкам.

Так как это происходит от соединения и смешивания электронных волновых картин, химическая связь в своей основе имеет электрическую природу. Ее прочность обусловлена квантовой устойчивостью совокупной электронно-волновой картины образовавшейся молекулы. Рассмотрение различных конфигураций, показанных на фото V, позволяет легко понять, что существуют многочисленные способы соединения и переплетения электронных конфигураций. Вследствие этого мы ожидаем, что есть множество химических соединений разных типов.

МОЛЕКУЛЫ

Рассмотрим несколько специальных примеров. Среди многих способов, которыми соединяются атомы друг с другом, можно выделить связи двух важнейших типов. Один из них — связь типа «электронные близнецы», другой — типа «затычка и дыра»¹⁾). Характерный пример связи первого типа — связь в самой простой молекуле — молекуле водорода H_2 , состоящей всего из двух атомов водорода. Здесь две электронные картины, по одной от каждого атома, сливаются в одну новую картину, в результате чего сами атомы соединяются (см. рис. 28). Это слияние как будто противоречит принципу Паули, согласно которому каждую данную конфигурацию может принять только один электрон. На самом же деле противоречия нет; электрон обладает еще одним интересным свойством, о котором мы упомянем здесь только мимоходом: он вращается вокруг собственной оси. Это вращение называется электронным спином. Далее, здесь возможны только два вида вращения — вправо и влево вокруг данной оси. Поэтому каждую электронную картину надо считать дважды, потому что ее может принимать электрон, вращающийся как в одну, так и в другую сторону. Следовательно, два электрона могут принимать одну и ту же конфигурацию, только если они вращаются в противоположных направлениях. Вот почему электронный спин совместно с принципом Паули играет столь важную роль: две и только две электронные конфигурации могут слиться в одну общую. Молекула водорода может состоять только из двух атомов, но не из трех. Химическая связь становится насыщенной при наличии двух электронов на одной орбите.

Характерным примером связи типа «затычка и дыра» служит связь в молекуле воды H_2O , состоящей из одного атома кислорода и двух атомов водорода. Атом кислорода имеет 8 электронов. Но оказывается, что 10 электронов, обращающихся вокруг ядра, образуют очень компактную и округлую сово-

¹⁾ В научной литературе приняты термины «гомеополярная» и «донорно-акцепторная» связь. (Прим. перев.)

купность. Элемент неон, имеющий 10 электронов, химически очень неактивен и не образует никаких молекул, но в атоме кислорода до этой компактной конфигурации не хватает двух электронов. Поэтому ансамбль из 8 электронов можно описать как компактную округлую конфигурацию с двумя дырками в ней. Форма дырки определена, она отвечает конфигурации недостающего электрона. В случае

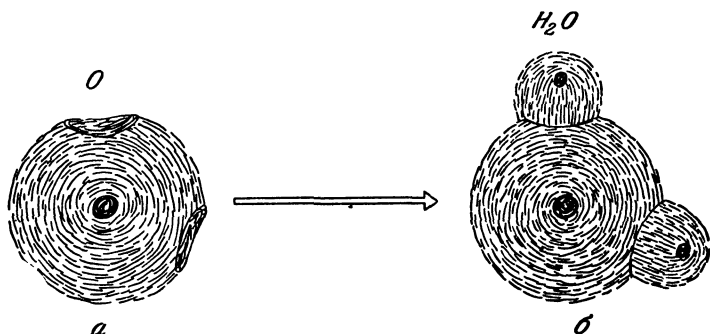


Рис. 29. Атом кислорода (а) и молекула воды (б).

электронная конфигурация кислорода имеет две дырки, простирающиеся от ее поверхности до ядра и расположенные под прямым углом. В молекуле воды дырки в кислородном атоме «затыкаются» электронами водорода. Ядра водорода заключены внутри электронных конфигураций водорода (маленькие черные кружки — ядра водорода, большой черный кружок — ядро кислорода).

кислорода дырки простираются от поверхности конфигурации до ее центра и расположены под прямым углом одна к другой (рис. 29, а). Теперь мы можем понять строение молекулы воды. Электроны водородных атомов попадают в эти две дырки, атомы водорода служат затычками. Поэтому линии, соединяющие центр атома кислорода с водородными атомами, должны были бы составлять угол 90° . Положительные заряды протонов водородных атомов слегка отталкивают друг друга, что увеличивает этот угол до 108° (рис. 29, б). Это типичная связь типа «затычка и дыра».

Другим интересным примером атома, образующего молекулы, служит атом азота. Он имеет 7 электронов, из которых 4 составляют компактную сферическую конфигурацию вокруг ядра; остальные 3 электрона

образуют конфигурации с тремя выступами в трех взаимно перпендикулярных направлениях, например: вверх, вперед и вбок (рис. 30, а). Эта картина позволяет легко понять строение важной молекулы аммиака NH_3 , в которой три водородных атома дают три связи типа «электронных близнецов», по одной с каждым выступом. Электроны водородных атомов сливаются с электронами выступов, и получается

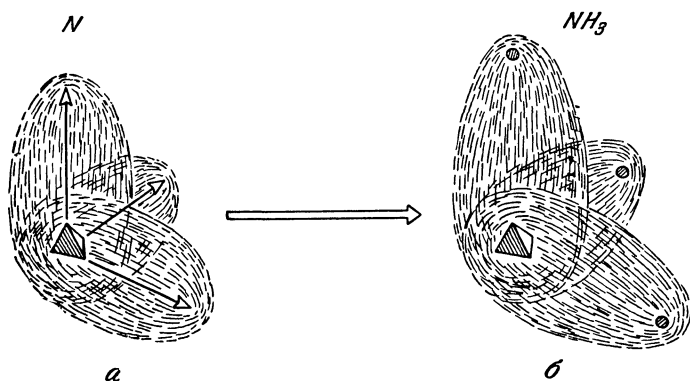


Рис. 30. Атом азота (а) и молекула аммиака (б).

В атоме азота мы имеем три электронных выступа, направленных вдоль стрелок под прямыми углами друг к другу. В молекуле аммиака каждый электронный выступ азота сливается с электроном водорода и образует связь типа «электронные близнецы». Густо заштрихованный треугольник — ядро азота; маленькие черные кружки — ядра водорода.

структура, изображенная на рис. 30, б, где ядра водорода сидят на кончиках выступов азота.

Атом углерода особенно приспособлен к образованию молекул. Он имеет шесть электронов, расположенных следующим образом: два электрона находятся близко от ядра и образуют маленькую округлую конфигурацию, остальные четыре могут располагаться симметричным образом, причем каждый дает радиальный выступ, направленный от центра; концы этих выступов расположены по углам правильного тетраэдра (рис. 31, а). Полученная картина позволяет нам понять расположение атомов в молекуле метана CH_4 , состоящей из одного атома углерода и четырех атомов водорода. Метан является главной составляющей светильного газа. Электроны

водородных атомов сливаются с четырьмя выступами в связи типа «близнецы», образуя структуру с ядром

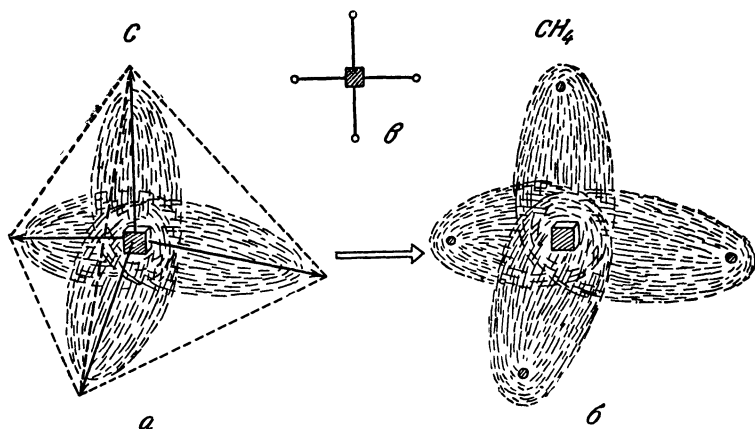


Рис. 31. Атом углерода с четырьмя электронными выступами, направленными по углам правильного тетраэдра (а), молекула метана CH_4 (б) и ее схематическое представление (в).

Каждый электронный выступ углеродного атома сливается с электроном водорода и образует связь типа «электронные близнецы». Темный квадрат — ядро углерода, маленькие кружки — ядра водорода. Направления связей «близнецы» показаны на (в) отрезками прямых.

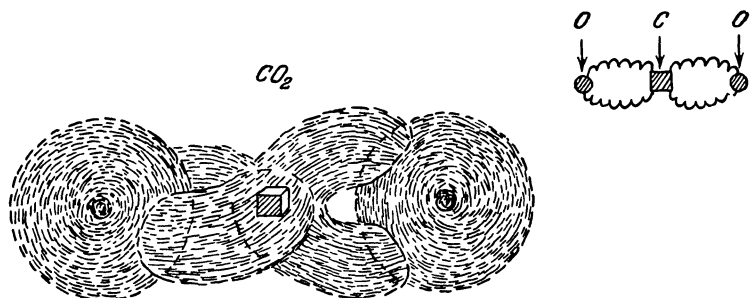


Рис. 32. Молекула двуокиси углерода CO_2 .

Четыре выступа углерода «затыкают» дырки в кислородных атомах. На схеме связи типа «дыра и затычка» показаны волнистыми линиями.

углерода в центре и четырьмя протонами по углам тетраэдра (рис. 31, б).

Другая важная молекула, в которую входит углерод, — это двуокись углерода, состоящая из одного

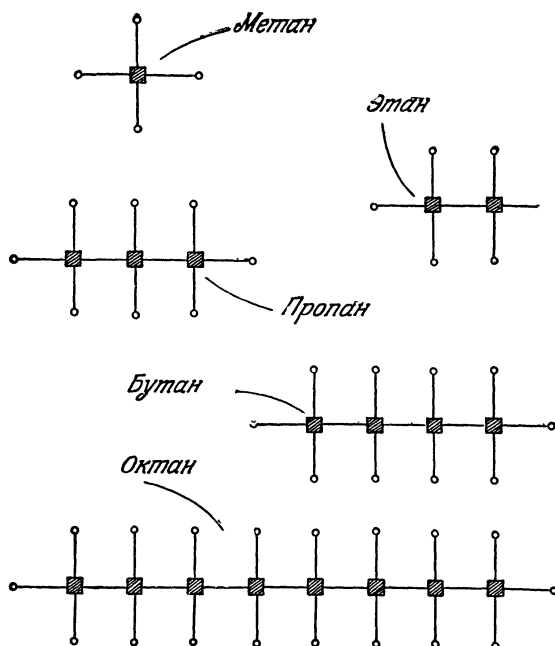


Рис. 33. Схематические изображения молекул углеводородов.

Квадратики — атомы углерода, маленькие кружки — атомы водорода, прямые соединительные линии — связи типа «электронные близнецы».

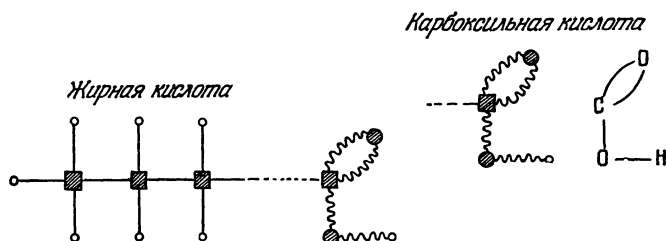


Рис. 34. Схематическое изображение молекул жирных кислот.

Длинный углеводород с карбоксильной группой на правом конце. Карбоксильная группа, COOH , состоит из одного атома углерода, двух атомов кислорода и одного атома водорода, соединенных связями типа «дыра и затычка». Квадратики — атомы углерода, большие кружки — атомы кислорода, маленькие кружки — атомы водорода. Прямые линии — связи типа «электронные близнецы», волнистые — типа «дыра и затычка».

атома углерода и двух атомов кислорода. Здесь все четыре выступа слегка изогнуты; два входят в качестве «затычек» в один атом кислорода, остальные два — в другой. В результате получается вытянутая структура из одного углеродного атома и двух кислородных по бокам (рис. 32).

Углеродный атом со своими четырьмя выступами может давать нескончаемый ряд молекул. Это объясняет, почему на Земле так широко распространены соединения углерода и почему они играют столь важную роль в живой материи. Рассмотрим некоторые соединения углерода. Простейшее из них — метан (рис. 33) с одним водородом на каждом выступе. Можно построить и молекулу из двух атомов углерода и шести атомов водорода. Здесь все связи типа «близнецы». Эта молекула называется этаном. Тот же принцип построения можно продолжить (см. рис. 33), и мы получим ряд молекул, называемых углеводородами: пропан с тремя атомами углерода, бутан с четырьмя и т. д. Эта структура, подобная цепи, может иметь любую длину. Короткие молекулы — это газы, более длинные — жидкости и очень длинные — твердые тела. Они служат горючим в виде газа, нефти или парафина, и мы увидим далее, почему они здесь хороши. Углеводородные цепи очень важны и для нашего питания, если они оканчиваются характерной группировкой атомов, называемой карбоксильной группой (рис. 34). Эти цепи называются жирными кислотами, входящими в состав животного жира.

Другие характерные углеродные структуры — это молекулы спиртов, показанные на рис. 35. Здесь связи с кислородом образованы по типу «дыры и затычки».

Еще одна важная группа молекул с длинными цепями — это углеводы. Их цепи подобны углеводородным, но к каждому звену цепи присоединен кислород. Он, как всегда, соединяется по типу «дыры и затычки». Простейший углевод — глюкоза, один из

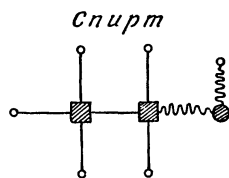


Рис. 35. Молекула спирта C_2H_5OH .

Квадратики — атомы углерода, большие кружки — атомы кислорода, маленькие кружки — атомы водорода; прямые линии — связи типа «электронные близнецы», волнистые — типа «дыра и затычка».

видов сахара (рис. 36). Целлюлоза — также углевод, но с очень длинной цепью. Она встречается в больших количествах в древесине и в других растительных структурах.

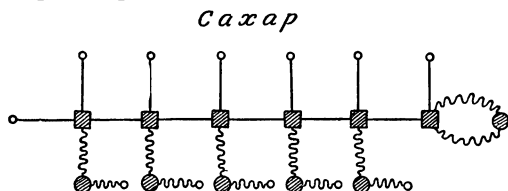


Рис. 36. Сахар. Молекула глюкозы $C_6H_{12}O_6$.

Теперь мы переходим к рассмотрению наиболее важной группы молекул — аминокислот, служащих кирпичиками, из которых построена почти вся живая материя. На рис. 37 показан общий принцип

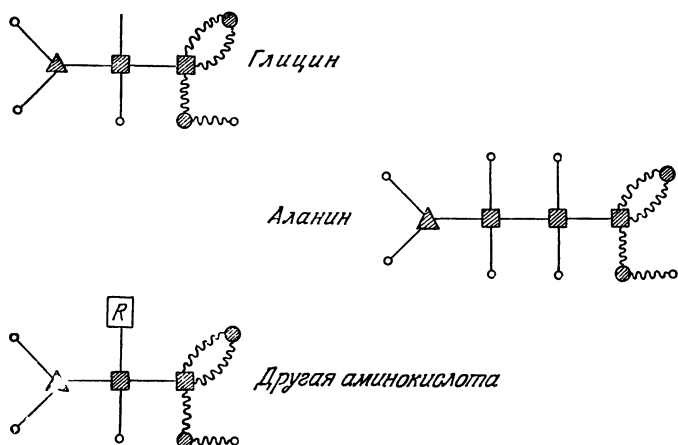


Рис. 37. Аминокислоты.

Аминокислоты имеют с одного конца карбоксильную группу, а с другого — аминогруппу NH_2 . Символом R обозначены химические соединения различного типа.

построения таких структур. В скелет этих молекул опять-таки входит углерод с его четырьмя электронными выступами. Наиболее характерны, однако, две их конечные группы. Но одном конце молекулы

(на рис. 37 справа) находится карбоксильная группа, на другом — аминогруппа NH_2 . Между двумя конечными группами находится множество других; для каждой аминокислоты характерна ее средняя часть. На рис. 37 показаны две простейшие аминокислоты: глицин и аланин — и общее строение более сложных аминокислот. Две концевые группы аминокислот обладают весьма характерным свойством. Они легко могут соединяться. Аминогруппа и карбоксильная группа связываются друг с другом (так называемая «пептидная связь»), так что аминокислоты легко образуют длинные цепи: одна аминокислота как бы зацепляется за другую. Такие цепи называются белками; как мы узнаем из гл. VIII, они играют важную роль в жизни живых организмов.

ХИМИЧЕСКАЯ ЭНЕРГИЯ, ХИМИЧЕСКОЕ ГОРЕНИЕ

До сих пор мы давали общее описание некоторых наиболее распространенных молекул. Условия нашей среды на Земле таковы, что молекулы непрерывно разлагаются и снова образуются. Если бы температура Земли была значительно выше, например, если бы она достигала температуры поверхности Солнца, то молекулы никогда не образовывались бы из-за слишком сильного теплового возбуждения: атомы не могли бы оставаться друг возле друга. Если бы ее температура была гораздо ниже, молекулы соединились бы, образуя твердые тела и кристаллы, и никакие изменения не происходили бы. Температура на Земле такова, что имеется иногда достаточно энергии для разрушения некоторых молекул, однако количество этой энергии не слишком велико, и поэтому большинство соединений может существовать в течение некоторого времени. Создание и разрушение молекул характеризует окружающую нас среду, сообщая ей постоянные изменения, которые мы видим, и создавая тем самым возможность жизни.

Одно из важнейших следствий образования молекул состоит в высвобождении энергии. Этот процесс особенно ясно виден при сжигании угля или других веществ. Горение любого типа связано с образованием

новых молекул, в результате чего выделяется тепловая энергия. Мы должны теперь выяснить более точно, как и почему освобождается энергия при соединении атомов в молекулы. Химическая связь представляет энергию в таком смысле: для разрыва связи требуется некоторое количество энергии, следовательно, то же ее количество высвобождается при

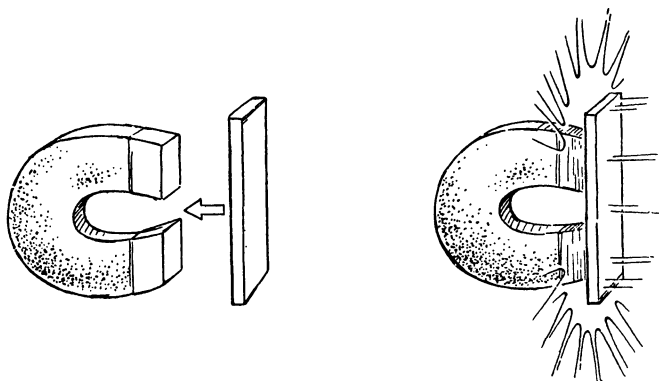


Рис. 38. Когда железка ударяется о магнит, энергия магнитного притяжения превращается в тепло и звук.

образовании связи. В качестве простейшего примера связи, отличной от химической, рассмотрим магнит, удерживающий кусок железа силой магнитного притяжения (рис. 38). Чтобы удалить железо от магнита, требуется некоторая энергия. Когда железо возвращается к магниту, то же количество энергии выигрывается. Это количество энергии создается притяжением к магниту. При удалении железа от магнита энергию поставляют наши мышцы. Где появляется энергия, производимая при возвращении железа к магниту? Часть ее выделяется в виде звука, когда железо ударяется о магнит, часть — в виде тепла, так как при ударе железа о магнит оно нагревается. Эту энергию можно использовать и для выполнения механической работы: если мы прикрепим к железу веревку, перекинутую через блок, а на другой ее конец подвесим грузик, то увидим, что притяжение к магниту будет совершать работу (рис. 39).

Аналогичный обмен энергией происходит и в случае химической связи. Нужно затратить энергию, чтобы разделить молекулу на атомы, и энергия выделяется, когда атомы образуют молекулу. Полученная энергия принимает различные формы. Например, она может проявиться в виде колебаний. Когда атомы соединяются, получившаяся молекула начинает колебаться в результате сильного столкновения атомов. Может получиться и энергия поступательного

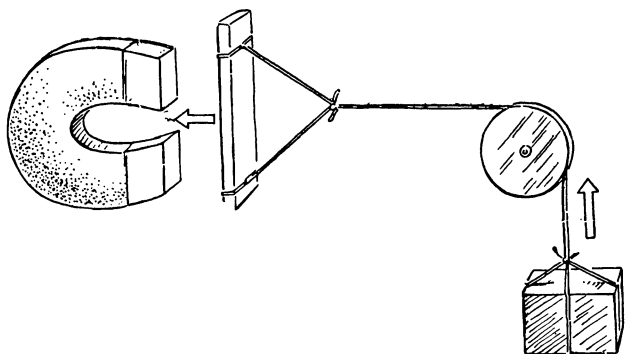


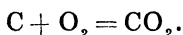
Рис. 39. При таком расположении магнита и пластинки энергия притяжения используется для подъема груза.

движения: когда атомы сталкиваются и сливаются, их энергия передается соседним молекулам, скорость которых увеличивается. Вообще, когда бы атомы ни образовали молекулу, энергия освобождается и обычно проявляется в форме движения, что эквивалентно теплу.

Есть некоторые особые случаи, когда энергия связи не превращается в тепло. Это аналогично тому, что притягиваемый к магниту кусок железа производит полезную работу. Некоторые химические реакции присоединения могут происходить таким образом, что энергия, выигранная при образовании молекул, передается молекулам другого рода и переводит их в состояние с большим содержанием энергии. Тогда энергия образования молекулы запасается в другой молекуле вместо того, чтобы растрачиваться в виде тепла. Этот случай важен для поддержания жизни.

Одни химические связи прочны, другие — слабы, рыхлы. Когда образуются прочные связи, освобождается больше энергии. В общем случае связи типа «затычка и дыра» прочнее связей типа «электронные близнецы». Атом водорода труднее оторвать от молекулы воды, чем от молекулы метана.

Рассмотрим более подробно хорошо известный химический процесс, процесс горения угля. Что при этом происходит? Углерод угля и кислород воздуха образуют углекислый газ — двуокись углерода. Кусок угля — это совокупность атомов углерода, расположенных в правильном порядке, кристалл углерода. Кислород воздуха состоит не из отдельных атомов, он существует в виде молекул кислорода, состоящих из двух атомов со связью типа «электронные близнецы». Поэтому химическая реакция горения угля имеет вид



Эта реакция должна происходить в два этапа: сначала разрывается связь в молекуле O_2 , а затем два атома кислорода присоединяются к углероду. Первый этап требует затраты энергии. Он не может происходить при тех энергиях, которые имеются при обычной температуре. В конце концов, уголь может соприкасаться с воздухом без горения. При обычных

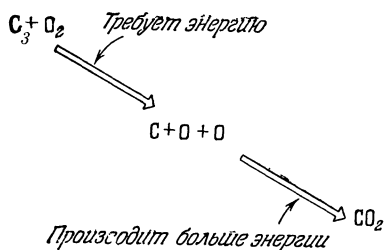


Рис. 40.

температурах тепловой энергии недостаточно для расщепления молекулы кислорода на два атома. Но если мы подведем тепло извне от зажженной спички или горячей щепки, то реакция начнется. Надо подвести тепло только для возникновения реакции, так как на втором ее эта-

пе, при образовании CO_2 , выделяется больше энергии, чем требуется для расщепления O_2 (рис. 40). Первая связь принадлежит к типу «затычка и дыра», вторая — к типу — «электронные близнецы». Поэтому энергия, необходимая для дальнейшего расщепления

O_2 , поставляется самим процессом горения. Таким образом, при горении угля энергия выделяется в виде тепла, хотя часть энергии, освобождаемой на втором этапе, идет на инициирование дальнейших реакций. Полезное тепло равно избытку энергии, выделяющейся во второй стадии, над энергией, потребной для первой.

Раз начавшись, образование двуокиси углерода продолжается до тех пор, пока не израсходуется весь углерод. Выделяется большое количество тепла; чистый выигрыш энергии составляет 0,67 эв на каждую молекулу образовавшейся двуокиси углерода. Нагревание столь сильно, что атомы и молекулы начинают испускать свет. Пламя, которое мы видим при горении угля, состоит из молекул CO_2 и атомов углерода, выброшенных в результате сильного нагрева и испускающих характеристическое излучение. Поэтому пламя не вид вещества, как некогда полагали; это накаленная материя, полученная в химической реакции, в которой выделяется очень много энергии.

Горение угля — это простейшая форма выделения химической энергии. Аналогичный процесс происходит и при горении метана или других углеводородов. И здесь требуется начальное тепло, чтобы расщепить не только молекулы O_2 , но и молекулы углеводорода. После этого углерод соединяется с кислородом и дает двуокись углерода, а водород соединяется с кислородом и дает воду. Химическая реакция горения метана показана на рис. 41.

Так как в CH_4 и O_2 связи принадлежат к типу «электронных близнецов», а в CO_2 , H_2O — к типу «затычка и дыра», чистый выигрыш энергии в этой реакции очень велик. Поэтому метан и другие углеводороды дают сильное пламя и много тепла. Однако в отличие от горения угля, получается не только CO_2 , но и вода. В пламени содержится вместе с

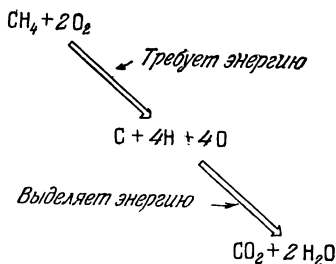


Рис. 41.

раскаленным CO_2 водяной пар. Если подержать холодный кусок стекла в пламени свечи или горящего дерева, то мы увидим на стекле конденсированный водяной пар, которого не получится в пламени чистого угля.

Таким же образом любая молекула, состоящая из углерода, водорода и кислорода, может гореть, т. е. превращаться в углекислый газ и водяной пар, соединяясь с кислородом воздуха. Такие молекулы, как молекулы спирта или сахара, нуждаются в меньшем

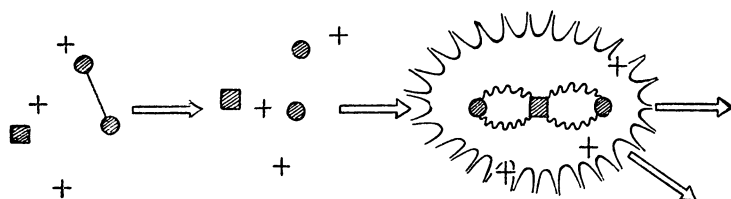


Рис. 42. Горение углерода.

Слева мы видим один атом углерода (квадратик), одну молекулу кислорода (два кружка, соединенные связью типа «электронные близнецы») и три другие молекулы, символизированные крестиками. В середине тепловое движение молекулы «крестика» разорвало связь в молекуле кислорода. Справа углерод и два кислородных атома соединились в молекулу CO_2 . Освободившаяся при этом энергия частично переходит в тепловую энергию молекул «крестиков», частично в энергию колебаний молекулы CO_2 , что показано «ореолом».

количестве кислорода для горения, так как в них самих содержится известное количество кислорода.

Химические реакции, производящие энергию, всегда должны начинаться с превращения молекул со слабыми связями в молекулы с прочными связями. Разница в энергиях сильной и слабой связи высвобождается. CO_2 и вода — это молекулы, с прочными связями; то же относится и к большинству молекул, в которых атомы связаны с кислородом. Однако молекулы, содержащие углерод и водород, связаны слабо, они легко разрушаются и рекомбинируют, могут образовывать длинные цепи и способны собираться в сложные структуры. Если их слабые связи превращаются в сильные связи с кислородом в результате какого-либо сложного процесса, то выделяется энергия. Благодаря этим свойствам они играют важную роль в живой материи.

АГРЕГАТНЫЕ СОСТОЯНИЯ

Химическая связь держит атомы связанными в молекулы. Существуют ли силы между молекулами? Да, они существуют на самом деле, но они слабее химической связи. Когда две молекулы сближаются, электронные конфигурации в каждой из них стремятся колебаться в унисон. Благодаря этому возникает притяжение (так называемые ван-дер-ваальсовы силы). Его сила зависит от типа движения электрона: одни молекулы притягиваются сильно, другие — очень слабо. Эта межмолекулярная сила другим характерным образом проявляет особые свойства электронных конфигураций.

Межмолекулярные силы держат молекулы близко друг от друга, и поэтому они ответственны за агрегацию молекул, наблюдаемую в жидком или твердом веществе. В этих веществах молекулы слипаются, тогда как в газах каждая движется сама по себе. Почему же молекулы иногда собираются в твердые тела, иногда в жидкости, а иногда, если вещество газообразно, совсем не собираются? Агрегатное состояние сильно зависит от температуры. При очень низких температурах почти все вещества становятся твердыми, при очень высоких все переходят в газообразное состояние, а при известных промежуточных температурах они жидки. Значения температур, при которых происходят эти превращения (точка плавления, точка кипения), зависят от силы притяжения между молекулами.

При очень низких температурах тепловое движение весьма незначительно, и поэтому молекулы выстраиваются в строго правильные ряды и удерживаются в таком виде межмолекулярными силами. Получается твердое тело. Правильное расположение молекул часто эффектно проявляется в кристаллах. В гл. IV мы видели, как ионный микроскоп показывает правильное, упорядоченное расположение атомов вольфрама. Кристаллы — это твердые тела, в которых правильное расположение атомов сохраняется в больших объемах и непосредственно проявляется в виде прямых ребер и правильно расположенных граней и вершин. Так как при этом

порядок в малом увеличивается в огромное число раз, кристаллы дают нам непосредственную картину симметрии самых малых единиц. Если попытаться деформировать кристалл, изгибая или ломая его, чувствуется сопротивление — при перемене взаимного расположения атомов надо преодолеть межмолекулярные силы, которые удерживают атомы в определенных «правильных» местах.

Молекулы и атомы в твердых телах столь близки, что они часто сливаются; соседние электронные конфигурации при этом перекрываются так сильно, что все твердое вещество следует рассматривать как одну большую молекулу. Для металлов, например, характерно, что внешние электроны атомов образуют конфигурации, простирающиеся по всему куску металла. Поэтому металлы служат хорошими проводниками электричества; электроны свободно переходят от одного атома к другому.

При более высоких температурах тепловое движение усиливается и разрушает упорядоченное расположение молекул или атомов в твердом теле. Молекулярные силы все еще держат молекулы плотно упакованными, но уже не могут заставить их располагаться упорядоченным образом. Поэтому в таких телах сопротивление деформированию или изгибанию отсутствует. Однако молекулы все еще остаются друг возле друга, они образуют жидкость. Переход от твердого тела к жидкости зависит от силы межмолекулярного взаимодействия. Если оно велико, как в горной породе или в металле, то нужна высокая температура, чтобы преодолеть связи, удерживающие молекулы в правильном порядке; если же оно мало, как в воде или воздухе, переход в другое агрегатное состояние происходит при меньших температурах.

Если температура становится выше точки плавления, то тепловое движение усиливается настолько, что преодолевает не только упорядочивающее, но и связывающее действие межмолекулярных сил. Тогда молекулы отрываются друг от друга вследствие теплового движения и разлетаются по всем направлениям, сталкиваясь между собой и налетая на стенки сосуда. Они больше не упакованы плотно,

а распределены по всему доступному объему. Тогда мы получаем уже газ. Температура, при которой образуется газ, также зависит от сил между молекулами. В воздухе эти силы столь малы, что не могут удерживать молекулы вместе уже при обычных температурах. В некоторых металлах и горных породах они так велики, что для перехода этих веществ в газообразные состояния нужна температура, примерно равная 2000°C .

Увеличение температуры ослабляет характерные свойства и степень организации вещества. В твердом состоянии вещества имеют типичные формы (кристаллов), обладают специфическим строением и твердостью и их легко распознать. В жидком состоянии собственная форма и структура утеряны — вещество принимает форму сосуда, сохраняются только характерная плотность, цвет и ограничивающая поверхность. Переход в другое агрегатное состояние виден особенно четко, когда снежинка с ее сложной гексагональной структурой превращается в аморфную каплю воды. Газообразное состояние еще менее специфично. Газообразное вещество утратило свою характерную плотность и поверхность, остались только его цвет и запах. Однако во всех трех состояниях вещество построено из одних и тех же молекул или атомов; одни и те же атомы металла входят в твердый, жидкий или газообразный металл; одни и те же молекулы образуют лед, воду и пар.

КВАНТОВАЯ ЛЕСТНИЦА

РАЗМЕР И УСТОЙЧИВОСТЬ

В предыдущей главе мы показали, что все нас окружающее есть комбинация 92 атомных ядер и их электронов. Все вещества и формы всего существующего суть результаты взаимодействия различных электронных волновых конфигураций и их комбинаций. Электроны принимают свои характерные конфигурации, когда они собираются вокруг ядра; таким путем образуются атомы, которые соединяются в молекулы. Эти конфигурации обуславливают специфические свойства веществ и придают каждому веществу особый характер.

Конфигурации могут деформироваться и разрушаться в результате столкновений частиц с большими энергиями или вследствие других сильных воздействий, но они обладают известной типичной устойчивостью. Мы видели, например, что при температурах, которые наблюдаются на поверхности Земли, энергия теплового движения недостаточна для разрушения атомных и большинства молекулярных волновых картин. Вот почему вещества, находящиеся в окружающей нас среде, обладают специфическими свойствами. Предел устойчивости атома или молекулы различен для разных видов атомов и молекул. Он зависит от ряда факторов, но главным образом от размера атомов и молекул. Крупные единицы менее устойчивы, чем мелкие. Большие молекулы легче расщепить, чем маленькие. Чрезвычайно крупные молекулы, входящие в состав органических веществ, например мяса и овощей, разрушаются в процессе

пищеварения, происходящем при относительно низкой температуре нашего желудка. Однако, как мы видели в гл. VI, расщепление значительно меньших молекул кислорода требует температуры пламени. Удаление электрона из атома водорода, самого маленького атома, требует еще больших энергий. Оно не происходит в пламени, но наступает в сильном электрическом разряде.

Связь между размером и устойчивостью есть прямое следствие волновой природы частиц. Вспомним, что длинная струна рояля дает более низкую ноту и более низкие обертоны, чем короткая. Аналогичным образом длинноволновая конфигурация также должна соответствовать более низким частотам. Согласно фундаментальному соотношению между частотой и энергией, более низкая частота отвечает и меньшей энергии. Мы ожидаем, что волновая картина больших размеров обладает меньшей энергией и чувствительна к более слабым возмущениям. Вот почему соотношение между размером и устойчивостью носит столь универсальный характер. Чем меньше система, тем больше ее устойчивость, тем больше энергии требуется для нарушения ее характерной структуры.

СТРОЕНИЕ ЯДЕР

Как мы видели, вещество состоит из электронов и атомных ядер. Каждый элемент имеет свое собственное атомное ядро, несущее определенное число единиц заряда. Этот заряд ответствен за свойства атома, так как он определяет число электронов в атоме и принимаемую ими конфигурацию. Здесь мы считаем ядро атома неделимым целым, заряд и масса которого характерны для данного типа атомов. Атомы каждого элемента имеют свое, типичное для них ядро. Вещество состоит из множества разных «элементарных частиц»; электронов и различных характерных для каждого элемента ядер.

Но такое положение дел неудовлетворительно. Удобнее было бы допустить, что различные типы атомных ядер построены из нескольких простых компонент. Тогда все атомные ядра являлись бы

структурами, состоящими из таких компонент, и именно эти последние, а не ядра естественно было бы считать элементарными частицами.

До сих пор мы рассматривали атомные ядра как массивные частицы, наделенные только положительным зарядом, но, по-видимому, лишенные какой бы то ни было структуры. Может ли быть, что их бесструктурность только кажущаяся, так же как и у атомов, находящихся ниже порога возбуждения? Из нашего соотношения между размером и устойчивостью вытекает, что малый размер ядра должен означать очень высокий порог возбуждения, значительно превышающий порог возбуждения атома. Вероятно, следует ожидать, что внутренняя структура ядра несущественна для динамики атома, и ее удастся наблюдать только при более высоких энергиях, чем те, с которыми мы имели дело в атомных и молекулярных проблемах.

Одним из важнейших успехов современной физики было экспериментальное открытие квантового мира внутри маленького ядра, мира, подобного тому, который существует в значительно большем атоме. Оказалось, что атомные ядра действительно обладают структурами и что они построены из частиц двух сортов — протонов и нейтронов. Протон идентичен наиболее легкому ядру, ядру водородного атома: он несет единичный положительный заряд, и его масса в 1840 раз больше массы электрона. Нейтрон имеет почти такую же массу, как протон, но не несет никакого заряда.

Таким образом, заряд ядра равен числу содержащихся в нем протонов, так как каждый протон несет единицу заряда. Поэтому число протонов в каждом ядре совпадает с атомным номером элемента Z . Маленькая таблица значений Z на стр. 81 дает число протонов, содержащихся в ядрах элементов. Нейтроны не имеют заряда, они дают вклад только в массу ядра. В общем случае в ядре несколько больше нейтронов, чем протонов.

Должна существовать сила, которая удерживает нейтроны и протоны в столь малом объеме, как атомное ядро. Ядерная сила, действующая между нейтронами и протонами, соединяет их внутри ядра. Это

очень большая сила притяжения, она не только должна превосходить электрическое отталкивание между положительно заряженными протонами, но и ограничивать движение частиц исключительно малой областью пространства.

Человеку не приходилось прямо сталкиваться с этой силой, как с другими двумя. Каждый из нас видел действие силы тяжести на тела, наблюдал результаты действия электрических или магнитных сил. Тяготение и электрические силы действуют на любом бесконечно большом расстоянии. Гравитационное и электрическое притяжение уменьшается с расстоянием в соответствии с хорошо известным законом обратных квадратов, но эти силы заметны на любом расстоянии. Обнаружить ядерные силы гораздо труднее, главным образом из-за очень короткого радиуса их действия. Они полностью исчезают на очень малом расстоянии. Найдено, что они действуют только на отрезках длиной около 10^{-13} см, что в 100 000 раз меньше размера атома. Поэтому, конечно, в обычном мире, мире человека, нельзя непосредственно заметить действие ядерных сил.

Однако косвенно роль ядерных сил огромна. Если бы их не было, нуклоны (ядерные частицы) разлетелись бы во все стороны. Без ядерных сил не могли бы существовать никакие атомные ядра, кроме ядра водорода (протон), следовательно, водород был бы единственным элементом. Кроме того, как мы увидим далее, солнечная энергия, дающая нам тепло, в конечном итоге возникает в результате действия ядерных сил; наконец, недавно человеку удалось воспользоваться (и даже злоупотребить) делением ядер, которое тоже происходит от действия ядерных сил.

Ядерная физика развивалась в тех же направлениях, что и атомная. В тридцатых годах, всего через 10 лет после открытия волновой природы атомных электронов, были найдены характерные квантовые состояния и у ядер.

Это легко понять на основе наших знаний о кванте. Ядерные силы заставляют протоны и нейтроны двигаться в малой области, в пределах объема ядра. Такое ограничение движения подобно ограничению

движения электронов в пределах объема атома за счет притяжения атомного ядра. Ограничивающее действие ядерных сил должно создавать конфигурации протонных и нейтронных волн, подобные конфигурациям электронных волн в атоме. Известно, что волновые свойства зависят от массы движущейся частицы; чем она тяжелее, тем короче волна и тем труднее заметить волновые эффекты. Однако волновые эффекты приводят к характерным волновым картинам, как только движение частицы ограничивается.

Мы видим повторение в ядре волновых эффектов, наблюдавшихся в атоме. Квантовые состояния, пороги устойчивости, характерные конфигурации, тождество ядер одного сорта — все это наблюдается в мире значительно меньших размеров, или, учитывая соотношение между размером и энергией, в мире гораздо больших энергий.

Для того чтобы изучать строение ядер, необходимо преодолеть пороговые энергии для квантовых состояний ядра. Оказалось, что эти энергии лежат в области сотен тысяч и миллионов электроновольт. Такие энергии получить очень трудно. Первые опыты по расщеплению ядра были выполнены с альфа-частицами, которые испускаются с большими энергиями некоторыми радиоактивными веществами. Эти частицы тождественны ядрам гелия: они состоят из двух протонов и двух нейтронов, прочно связанных между собой в единое целое. Это те же частицы, при помощи которых Резерфорд в 1911 г. открыл атомные ядра. Несколькими годами позднее, в 1919 г., Резерфорд, снова применив альфа-частицы, сделал другое фундаментальное открытие. Направляя пучок альфа-частицы в газообразный азот, Резерфорд нашел, что они могут разбить ядро азота на части. Ему удалось показать, что от ядра азота отщепляется *протон*; тем самым он установил, что в состав ядра входят протоны.

После этой памятной даты был накоплен огромный запас данных о строении атомных ядер. После 1930 г. были изобретены и построены машины для ускорения протонов и альфа-частиц до весьма больших энергий, и больше не надо было применять радиоактивные ве-

щества для исследования атомных ядер. Эти машины называют по-разному: циклотроны, синхротроны, электростатические ускорители и т. д.; их популярное название (в США) — «агромодробители», хотя их следовало бы назвать «дробителями ядер». Атом легко разрушается нагреванием или электрическим разрядом. При зажигании спички многие атомы вещества, покрывающего спичечную головку, теряют во время этого миниатюрного взрыва по одному из своих электронов. Именно ядро, а не атом противостоит разрушению структуры, пока не достигаются энергии порядка миллионов электроновольт.

Однако в некотором смысле название «агромодробитель» правильно. Атомное ядро — это не только центр атома, но и его основная часть. Почти вся масса атома сосредоточена в ядре. Масса окружающих его электронов меньше $1/2000$ всей массы атома. Больше того, электроны можно удалить и заменить. Именно заряд ядра определяет электронную волновую картину вокруг него и тем самым свойства атома. Ядро наделяет атом его специфическими свойствами. Когда Резерфорд и его сотрудники впервые превратили одно атомное ядро в другое (они бомбардировали азот альфа-частицами), альфа-частицы проникали в ядра азота и отрывали от них протоны; полный заряд ядра увеличивался на единицу, в результате чего ядро азота превращалось в ядро кислорода. Так они осуществили великую мечту алхимиков — преобразование одного элемента в другой (рис. 43).

Открытие ядерной силы было важным шагом в познании природы. Ранее мы узнали только о двух силах природы — силе тяжести и электромагнитной силе. Сила тяжести управляет движением очень больших единиц вещества, движением небесных тел и падением тел на Земле. По атомной шкале эта сила чрезвычайно мала и поэтому не играет никакой роли внутри атомов и молекул. Большое достижение квантовой механики заключалось в доказательстве того, что свойства вещества, строение атомов и молекул можно целиком объяснить электрическими силами между электронами и ядрами и электронными конфигурациями, обусловленными этими силами.



Рис. 43. Старинный рисунок, изображающий алхимиков за работой.

Теперь, изучая атомные ядра, мы натолкнулись на новую силу природы — ядерную силу, силу, которая действует между составляющими ядра и соединяет их между собой.

После этого ядерная физика приняла вид, во многом напоминающий атомную физику. Было показано,

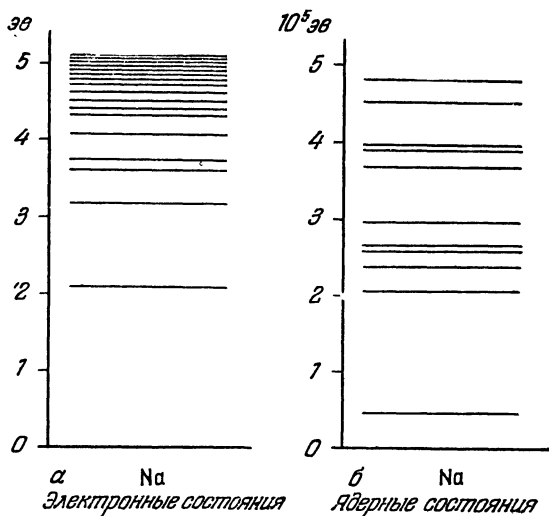


Рис. 44. Квантовые состояния натрия (а) и ядра натрия (б).

Состояния а те же, как и на рис. 23 гл. V. Отметим, что на рис. б цена деления в 100 000 раз больше.

что и ядра имеют свои волновые картины, в ядрах были найдены характеристические квантовые состояния. Было установлено, что излучение, испускаемое и поглощаемое ядрами, имеет характеристические частоты, точно отвечающие разностям энергий между двумя квантовыми состояниями ядер (рис. 44). Переходя из более высокого энергетического состояния в более низкое, ядро, так же как и атом, освобождает разность энергий в форме кванта излучения, частота которого ω отвечает разности энергий E согласно формуле Планка $E = h\omega$. Различие с атомом — в величине освобождаемой энергии. Переходя из одного квантового состояния в другое, атом обычно

испускает видимый свет; атомные ядра испускают «свет» гораздо более высокой частоты, потому что разность ядерных энергий в сотни тысяч раз больше атомных. Эти лучи подобны очень сильно проникающим рентгеновским лучам и называются «гамма-лучами».

Есть еще одно различие между квантовой механикой атома и квантовой механикой атомного ядра. В случае атома мы точно знаем природу силы, привязывающей электрон к ядру, это сила электростатического притяжения. Можно точно рассчитать волновые картины и предсказать энергию и конфигурацию квантовых состояний. В случае атомного ядра притягивающая сила нова по природе и нам неизвестна. Мы не можем достаточно хорошо рассчитать волновые картины. Все, что мы можем в настоящее время, — это определять свойства этой новой силы, изучая наблюдаемые волновые картины. Трудность подобной задачи становится понятной, если учесть, что атомные ядра в 10 тысяч раз меньше атомов. Однако удалось накопить достаточно важные сведения о новой силе. В настоящее время мы знаем радиус ее действия, величину, а также некоторые ее более тонкие особенности; кроме того, нам известен следующий замечательный факт: почти всюду (в пределах радиуса ее действия) эта сила является притягивающей, но при слишком сильном сближении нуклонов она становится отталкивающей.

Ядерная физика преподавала нам урок исключительной важности. Вся материя состоит из элементарных частиц трех типов: протонов, нейтронов и электронов. Все в природе есть комбинация этих трех единиц. Протоны и нейтроны соединяются, образуя атомные ядра, электроны в соответствии со своими волновыми картинами движутся вокруг ядер, и получаются атомы; атомы соединяются в молекулы, а молекулы — в вещества, которые мы видим вокруг себя. Это было большое достижение — свести все многообразие веществ к трем элементарным единицам, которые образуют различные комбинации под влиянием ядерных и электромагнитных сил и создают все вещества во Вселенной.

ИЗОТОПЫ, РАДИОАКТИВНОСТЬ

Атомное ядро состоит из протонов и нейтронов, удерживаемых вместе ядерными силами. Протон заряжен, а нейтрон электрически нейтрален, поэтому заряд ядра определяется числом протонов. Величина этого заряда играет очень важную роль, так как она определяет род атома, построенного вокруг ядра, и поэтому характеризует элемент, которому принадлежит данное ядро. Нейтроны служат только «клеем», они помогают удержать протоны в ядре.

Ядерные силы действуют наиболее эффективно в тех случаях, когда число нейтронов приблизительно равно или несколько больше числа протонов. Так устроено большинство ядер. Например, ядро гелия (его заряд — две единицы) состоит из 2 протонов и 2 нейтронов; ядро углерода содержит 6 протонов и 6 нейтронов, ядро азота — 7 протонов и 7 нейтронов.

Иногда определенное число протонов образует ядра с различным числом нейтронов. Эти различные ядра принадлежат одному и тому же элементу (элемент определяется числом протонов), но с различным весом. Два вида одного и того же элемента отличаются друг от друга только числом нейтронов в их ядрах и, следовательно, атомным весом; они называются изотопами. Например, существуют изотоп обычного углерода — его ядро содержит 6 протонов и 7 нейтронов — и изотоп обычного азота — его ядро содержит 7 протонов и 8 нейтронов. Изотопы углерода обозначаются символами C^{12} и C^{13} , а изотопы азота — N^{14} и N^{15} . Верхний индекс показывает общее число частиц (нейтронов и протонов), составляющих ядро. Изотопы C^{13} и N^{15} встречаются гораздо реже обычных C^{12} и N^{14} .

Почему в ядро углерода нельзя поместить больше (например, 8) или, наоборот, меньше (например, 5) нейтронов? Тогда мы получили бы изотоп углерода с общим числом частиц, равным 14 или 11, т. е. C^{14} или C^{11} . Это и на самом деле возможно, C^{11} и C^{14} можно получить в ускорителях. Однако в таких ядрах с их аномальным избытком или недостатком частиц одного рода происходит странное явление.

Это явление, наблюдаемое во всех случаях, когда между числом нейтронов и числом протонов нарушается баланс, называется радиоактивностью. Медленно, но верно протон сам собой превращается в нейтрон, если протонов слишком много, как в C^{11} , или нейтрон превращается в протон, если есть аномальный избыток нейтронов, как в C^{14} . Тогда из C^{11} получается ядро с 6 нейтронами и 5 протонами, т. е. ядро бора B^{11} ; C^{14} превращается в ядро с 7 протонами и 7 нейтронами, т. е. в ядро азота N^{14} (рис. 45).

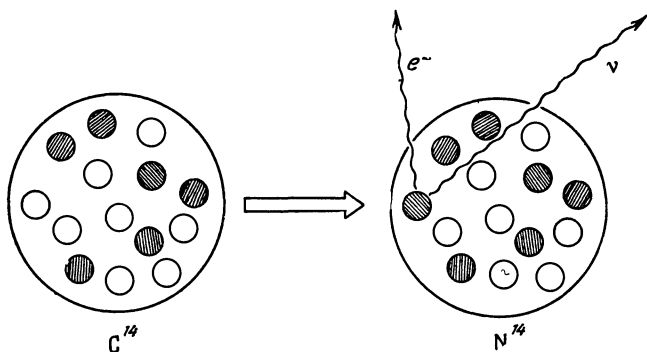


Рис. 45. Радиоактивное превращение C^{14} в N^{14} . Один нейтрон превращается в протон, испуская отрицательный электрон (e^-) и нейтрино (ν). Светлые кружки — нейтроны, темные — протоны.

Этот процесс превращения имеет особый интерес. Он происходит медленно и непрерывно с определенным временем полураспада, которое составляет 20 мин для C^{11} и 4700 лет для C^{14} . Мы применяем термин «полураспад», потому что после 20 мин половина ядер C^{11} станет ядрами B^{11} ; за следующие 20 мин превратится еще половина оставшихся ядер и т. д. Тот же закономерный процесс происходит и с C^{14} , но для него соответствующие промежутки времени равны 4700 лет.

Каждое превращение сопровождается испусканием частиц. Прежде всего, электрический заряд не может внезапно уменьшиться с 6 до 5 единиц или возрасти с 6 до 7 без того, чтобы не изменилось что-нибудь еще. Ядро должно как-то приспособиться к

изменению заряда. Испускаются две частицы, одна из них — электрон, положительный¹⁾ или отрицательный, другая — «нейтрино». Нейтрино, незаряженный партнер электрона, очень легок, вернее, его масса просто равна нулю²⁾). Так как нейтрино не несет заряда и, следовательно, на него не действуют силы электрического притяжения или отталкивания, он очень легко проникает в вещество. Испущенный электрон положителен, если протон превратился в нейтрон, как в C^{11} , и отрицателен, если нейтрон превратился в протон, как в C^{14} . Это компенсирует изменение заряда ядра.

Обе испущенные частицы обладают большой энергией. В превращении $C^{11} \rightarrow B^{11}$ пара электрон—нейтрино получает около миллиона электроновольт; в случае превращения $C^{14} \rightarrow N^{14}$ эта энергия равна 15 000 эв. Освобождение таких количеств энергии объясняется тем, что ядра конечных продуктов (B^{11} или N^{14}) имеют меньшую энергию, чем исходные ядра. Как мы видели в предыдущей главе, переход от менее прочно связанной системы к более прочно связанной всегда дает выигрыш в энергии. У B^{11} и N^{14} отношение числа протонов к числу нейтронов сбалансировано лучше, чем у исходных ядер, и поэтому они связаны крепче.

Радиоактивные ядра имеют большое значение в медицине, потому что электроны с большой энергией действуют на живые ткани. Существует много практических приложений радиоактивности и помимо медицинских. При помощи современных ускорителей сравнительно легко получать ядра радиоактивных

¹⁾ До сих пор мы слышали только об отрицательных электронах. Все электроны в атомах несут отрицательный заряд. Однако положительные электроны тоже существуют, и они имеют интереснейшее свойство: встречая где-либо отрицательный электрон, положительный аннигилирует с ним, а их общая масса превращается в энергию света (электромагнитного поля). Их исчезновение сопровождается взрывом. Положительный электрон — это так называемая «античастица» отрицательного.

²⁾ Другая частица с нулевой массой — световой квант. С нейтрино он больше ничего общего не имеет. Возможность существования частиц с нулевой массой была предсказана теорией относительности. Электрон уносит не всю энергию распада, часть ее достается нейтрино. (Прим. перев.)

элементов. Для создания ядер с аномальным избытком нейтронов или протонов достаточно бомбардировать обычные ядра протонами или нейтронами. У некоторых из этих радиоактивных изотопов период полураспада составляет лишь несколько секунд, у других он равен часам или годам; у немногих изотопов он достигает миллиардов лет. Такие долгоживущие изотопы не надо производить искусственно: их находят в земной коре; в качестве хорошо известного долгоживущего изотопа назовем радий. Эти изотопы¹⁾ образовались в то время, когда вещество Земли подвергалось естественной бомбардировке протонами и нейтронами, в далеком прошлом при взрыве каких-то звезд. Благодаря большому периоду полураспада этих веществ мы по-прежнему встречаем их на Земле.

Радиоактивность²⁾ — это превращение несбалансированного, неустойчивого ядра в более устойчивое, сопровождающееся испусканием электрона и нейтрино. Подобный процесс весьма загадочен. Мы не знаем ни его значения, ни его связи с другими ядерными явлениями. Идет он очень медленно. Годы, часы, даже секунды — это очень длинные промежутки времени для ядерной системы, где движение происходит исключительно быстро. Резерфорд однажды сказал, что радиоактивные превращения идут так медленно, что практически вообще не происходят! Однако они есть. Даже отдельный свободный нейтрон живет всего лишь 10 мин, если он не «встроен» в ядро. Он самопроизвольно превращается в более устойчивый протон, испуская при этом электрон и нейтрино. Но как часть нерадиоактивного ядра нейтрон столь же устойчив, как и протон.

¹⁾ Точнее, уран, из которого непрерывно образуется в земной коре радий. (*Прим. перев.*)

²⁾ Термин «радиоактивность» включает в себя еще одно явление, которое не имеет ничего общего с только что описанным. Некоторые тяжелые ядра, например ядра урана и тория, не вполне устойчивы и после весьма долгого времени распадаются, испуская альфа-частицу большой энергии. Эта частица тождественна ядру гелия. Резерфорд применил в своих опытах пучки таких частиц. До изобретения ускорителей это был единственный способ получения частиц большой энергии.

ЯДЕРНАЯ ЭНЕРГИЯ, ЯДЕРНОЕ ГОРЕНИЕ

Тепло от горения угля происходит из соединения атомов кислорода и углерода, образующих молекулу, в которой они прочно связаны друг с другом. Энергия освобождается во всех случаях соединения атомов в прочно связанную единицу. Можно ли применить тот же принцип к связям в ядре? Энергия производится при соединении нейтронов и протонов в ядра. Ядерное пламя должно существовать и быть значительно сильнее обычного пламени, так как энергии, участвующие в ядерных явлениях, в сотни тысяч раз больше энергии электронов на атомных орбитах.

Рассмотрим простой пример ядерного горения. Ядро гелия состоит из двух протонов и двух нейтронов, связанных ядерными силами. Ядро углерода состоит из шести протонов и шести нейтронов, которые прочно связаны друг с другом; поэтому можно представить себе, что ядро углерода — это три тесно связанных ядра гелия. Если бы можно было втиснуть три ядра гелия в такой малый объем, чтобы между ними начали действовать ядерные силы, то ядра гелия слились бы воедино, образуя ядро углерода и выделяя большую энергию. Итак, в ядерном пламени гелий сгорал бы в углерод.

Почему же гелий на Земле не горит в ядерных пламенах? В обычных условиях очень трудно заставить три ядра гелия сблизиться столь тесно. Во-первых, они окружены электронами; во-вторых, будучи заряжены положительно, они отталкивают друг друга. Только при чрезвычайно высоких температурах, порядка миллиардов градусов, электроны отрываются, а ядра получают достаточно энергии для преодоления электрического отталкивания и сталкиваются друг с другом. Такие температуры нужны, чтобы зажечь гелиевый огонь, который, однажды загоревшись, будет выделять огромные количества энергии, а его температура будет в миллионы раз выше, чем у обычного пламени. Мы полагаем в настоящее время, что в центре некоторых звезд горит такой гелиевый огонь, снабжающий звезду энергией, которую она затем излучает. Такова звезда в верхнем левом углу созвездия Ориона.

Есть и другие виды ядерного огня. Очень важно горение тяжелого водорода. Тяжелый водород — это изотоп обычного водорода. Ядро тяжелого водорода, называемое дейтроном, состоит из одного протона и одного нейтрона, связанных ядерными силами. Приведенные в тесный контакт, два дейтрона сольются, образуя плотно связанное ядро гелия¹⁾ из двух протонов и двух нейтронов. Итак, тяжелый водород горит, а его зола — это гелий. Для того чтобы зажечь этот ядерный огонь, тоже необходима очень высокая температура, но она не столь высока, как для гелиевого огня (два дейтрона отталкиваются друг от друга слабее, чем два ядра гелия). И действительно, человеку удалось зажечь тяжелый водород, но пока только для целей разрушения в водородной бомбе²⁾.

Наиболее важно для нас горение обычного водорода (рис. 46). Мы полагаем, что огонь такого рода горит в недрах Солнца и поддерживает Солнце горячим, давая ему необходимую энергию. Сразу не очевидно, каким образом может гореть водород, так как его ядра — это протоны, а для образования других ядер нужны и нейтроны.

Здесь вступает в игру таинственное явление — радиоактивность. В больших массах горячего водорода иногда случается, что два ядра — два протона — сближаются и временно образуют ядро, состоящее из двух протонов, — дипротон. Это соединение не очень устойчиво, но простые вычисления показывают, что один из двух протонов изредка испытывает радиоактивное превращение в нейтрон, и тогда в качестве конечного продукта получается дейтрон (протон

¹⁾ Детальное изучение показало, что два дейтрона не дают непосредственно ядра гелия, как описано в тексте. Они сначала сталкиваются с другим протоном, давая изотоп гелия He^3 , а затем два ядра этого изотопа соединяются в ядро обычного гелия He^4 и освобождают два дополнительных протона.

²⁾ В водородной бомбе реагируют не два дейтрона, а дейтрон с ядром сверхтяжелого ядра водорода H^3 . Оно в свою очередь получается в результате попадания нейтрона, освобождаемого делением урана, в ядро легкого изотопа лития по схеме $\text{Li}^6 + n \rightarrow \text{H}^3 + \text{He}^4$. Реакция H^3 (трития) с дейтроном дает гелий и нейтрон с энергией 14 Мэв, который в свою очередь попадает в уран и вызывает в нем новое деление; нейтроны последнего опять реагируют с литием и т. д. (Прим. перев.)

плюс нейтрон), который в дальнейшем сгорает в гелий, как уже описывалось.

Итак, обычный водород в больших количествах и при высоких температурах тоже сгорает, превращаясь в гелий. Этот процесс идет очень медленно, потому что дейтроны должны образоваться до того, как

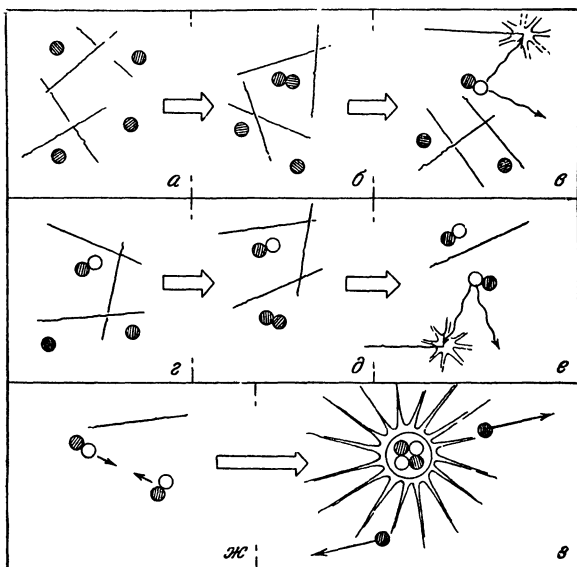


Рис. 46. Восемь стадий сгорания водорода в гелий.

а — четыре протона (ядра водорода) и четыре электрона (их движение символизируют прямые линии); *б* — два протона сблизилась, образуя на мгновение дипротон; *в* — один из протонов превращается в нейтрон (светлый кружок), испуская положительный электрон и нейтрино (положительный электрон встречается отрицательный и аннигилирует в световой вспышке, см. ниже, стр. 158); *г* — получается дейтрон и два протона; *д* — вторая пара протонов образует дипротон; *е* — дипротон радиоактивно превращается во второй дейтрон, как и в стадии *в*; *ж* — оба дейтрона сталкиваются; *з* — они образуют ядро гелия; выделившаяся энергия частично излучается (орбел), частично передается другим протонам (в последнем случае электроны не показаны).

начнется настоящее горение. Топливо медленно поступает по каплям. Таким образом, и этот результат мы можем считать лишь благотворным: водородный огонь в Солнце выделяет и будет выделять тепло еще в течение миллиардов лет без опасности внезапного взрыва.

Основной процесс ядерного горения, т. е. образование бóльших ядер из меньших — углерода из гелия, гелия из дейтронов, называется ядерным синтезом, или слиянием. Существует еще один процесс, в котором можно получать ядерную энергию, — это деление тяжелых ядер. Он не очень важен для понимания процессов, происходящих во Вселенной, так как в природе он встречается очень редко. Однако недавно человеку удалось использовать его как для получения энергии в ядерных реакторах, так и для собственного истребления в атомных бомбах.

Ядерные силы, как мы видели, удерживают протоны и нейтроны в ядре. Но есть и разрушающая ядро сила, а именно сила электрического отталкивания между протонами. Во всех существующих ядрах эффект связывания ядерными силами больше действия разрушающей силы электрического отталкивания. В противном случае ядра не существовали бы. Но радиус действия ядерных сил очень мал; они проявляются только при очень малых расстояниях между частицами ядра, тогда как силы электрического отталкивания действуют на больших расстояниях. Если разделить ядро таким образом, чтобы две его части были разделены промежутком, хотя и малым, но превосходящим радиус действия ядерных сил, то эти части уже не будут притягиваться, а разлетятся под действием сил электрического отталкивания.

Обычно ядро «расщепить» очень трудно, но некоторые из очень тяжелых ядер, например ядро одного из изотопов урана или ядро искусственно приготовленного элемента плутония, почти готовы распасться сами по себе. Удара одного нейтрона достаточно, чтобы разбить ядро на две половинки, не соединенные друг с другом. Они разлетаются с большой энергией, нагревая всю окружающую их среду до высокой температуры. Это и есть процесс деления. Он идет так энергично, что при делении из ядра выбиваются один или два нейтрона, которые играют очень важную роль. В большом блоке материала, способного делиться, для возникновения реакции достаточно одного нейтрона. Один нейтрон расщепляет первое ядро, выбитые нейтроны вызывают расщепление следующих ядер и т. д. до тех пор, пока не расщепится большая

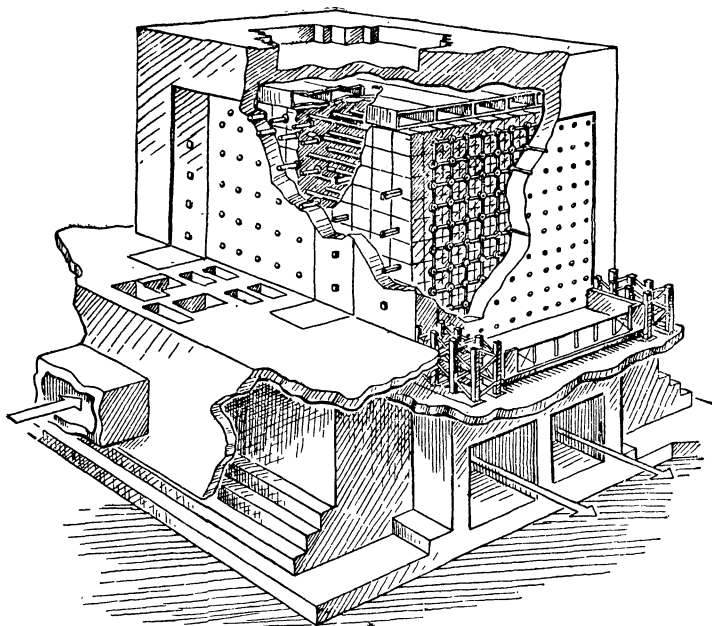


Рис. 47. Схема брукхэвского ядерного реактора.

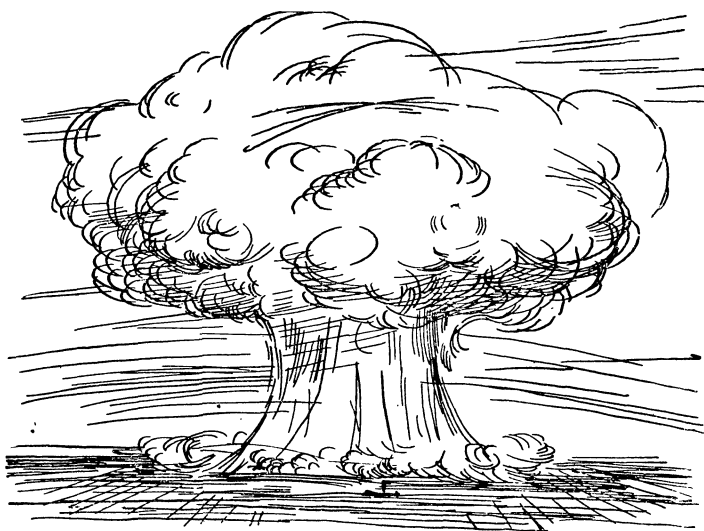


Рис. 48. «Гриб», образующийся при взрыве атомной бомбы.

часть делящегося материала. Этот процесс мы называем цепной реакцией. Он может происходить только в блоке столь большого размера, чтобы выбитые вторичные нейтроны не вылетали из него, не успев расщепить другое ядро. Минимальный размер блока называется критическим; обычно это несколько килограммов материала. При ударе одного нейтрона в любом объеме делящегося материала, превышающем критический, развивается цепная реакция и возникает огромное количество энергии. Атомные реакторы — это устройства, в которых количество делящегося материала точно равно критическому (рис. 47).

Две половинки ядра, полученные при делении, сами являются меньшими ядрами с аномальным отношением числа протонов к числу нейтронов. В большинстве случаев они содержат избыток нейтронов и поэтому радиоактивны. Вот почему ядерный реактор производит так много радиоактивных веществ.

«КВАНТОВАЯ ЛЕСТНИЦА»

Рассмотрим теперь с более общей точки зрения то, что мы узнали о строении вещества. Поучительно взять специальный пример, в качестве которого мы выберем газ, состоящий из атомов. Большинство газов состоит из молекул, но некоторые элементы, например неон, натрий и литий, лишь с трудом образуют молекулы в газовой фазе. Эти атомарные газы известны нам по их применению в источниках света. Так называемые неоновые трубки, которые украшают наши улицы, наполнены атомами в газовой фазе: неоном, парами натрия или лития; каждая из них светится своим цветом, когда в трубке происходит электрический разряд. Все эти газы состоят из свободных атомов.

Допустим, что в трубке находятся пары натрия. При выключении тока температура газа совпадает с температурой окружающей среды. При этой температуре энергия теплового движения атомов составляет около $\frac{1}{30} \text{ эв}$, что значительно меньше порога устойчивости атомов натрия. Поэтому, когда атомы сталкиваются друг с другом или со стенками, они отскакивают, как твердые бильярдные шары, не меняя своего

квантового состояния. При этих температурах атомы ведут себя, как элементарные частицы: они не проявляют никакой внутренней структуры. Их электронные конфигурации остаются неизменными; все атомы совершенно одинаковы.

Повысим теперь температуру газа, возбудив в трубке электрический разряд. Когда энергия, переданная атомам разрядом, начинает превосходить предел устойчивости, возбуждаются другие квантовые состояния, кроме основного. Возвращаясь в наиболее низкое квантовое состояние, атомы испускают характеристическое излучение; так, атомы натрия дают желтый свет, атомы лития — красный. На этом различии характерных цветов основано разнообразие городских огней. Возбуждением атомов в высшие квантовые состояния начинается нарушение тождественности атомов. Уже не все атомы оказываются одинаковыми, одни из них находятся в основном состоянии, другие — в различных возбужденных состояниях.

Теперь повысим температуру так, чтобы энергия столкновения атомов начала значительно превышать предел их устойчивости и чтобы электроны совсем оторвались от атомов. Тогда все квантовые состояния разрушатся и электроны будут двигаться, как частицы, без характерных волновых картин. Газ переходит в состояние плазмы, где электроны и ядра движутся весьма стремительно и беспорядочно. Нельзя найти даже две одинаково движущиеся частицы; свет, испускаемый плазмой, не имеет характеристических частот — это обычное тепловое излучение. Однако атомные ядра и электроны все еще сохраняют свою индивидуальность и тождественность. Они представляют собой элементарные частицы плазмы.

Перейдем к еще более высоким температурам, значительно превышающим температуры, достигаемые в лаборатории, таким, при которых начинают разрушаться стеклянные или металлические стенки обычных сосудов. Пусть температура столь высока, что энергии частиц превосходят предел устойчивости ядер. Такие температуры существуют только в центрах звезд. При этом ядра теряют свою тождественность, некоторые из них перейдут в более высокие

квантовые состояния и начнут испускать свое характеристическое излучение — гамма-лучи большой энергии. Если температура станет еще выше, то энергия частиц станет столь большой, что ядра начнут разваливаться на составные части. При этом полностью утрачивается индивидуальность ядер и вещество превращается в газ, состоящий из хаотически движущихся протонов и нейтронов, смешанных с электронами, оторванными от атомов при значительно меньших температурах. В таких условиях вещество станет смесью элементарных частиц трех сортов ¹⁾: протонов, нейтронов и электронов, движущихся совершенно беспорядочным образом.

Последовательность состояний, о которой мы здесь говорим, мы называем «квантовой шкалой», или «квантовой лестницей». Она устанавливается путем постепенного увеличения передаваемой энергии. На первой ступеньке этой лестницы вещество состоит из атомов, представляющих собой индивидуальные единицы; их внутренняя структура неизменна и жестка, а сами атомы движутся, как бильярдные шары. На следующей ступеньке атомы распадаются на электроны и ядра, и теперь уже эти частицы оказываются индивидуальными единицами, неизменными и жесткими. На третьей ступеньке ядра распадаются на протоны и нейтроны; здесь единицами вещества являются протоны, нейтроны и электроны.

Существование квантовой лестницы позволило постепенно раскрыть строение неорганической материи. Исследуя явления при энергиях атомных порядков, мы не должны заботиться о внутреннем строении ядер, а изучая механику газов при обычных температурах, мы можем не интересоваться внутренним строением атомов. В первом случае мы можем считать ядра одинаковыми и неизменными единицами, т. е. элементарными частицами, во втором случае теми же свойствами обладают атомы. При этом наблюдаемые явления как бы упрощаются, и мы можем понять их,

¹⁾ И, разумеется, световых квантов, которые тоже «материя», хотя они не имеют массы и могут испускаться и поглощаться. Кроме того, при условиях, о которых говорит автор, в веществе будет находиться очень много положительных электронов — позитронов. (*Прим. перев.*)

не зная внутренней структуры компонент, которые ведут себя как инертные единицы.

Квантовую лестницу можно продолжить и в сторону более низких энергий. Если охладить газообразный натрий до очень низких температур, то атомы натрия выстроятся правильными рядами, кристаллизуясь в металл натрия. В других веществах ступенька, находящаяся ниже атомной, еще интереснее. В большинстве веществ отдельные атомы существуют только при очень высоких температурах, характерных для пламен. При обычных температурах большинство атомов (но не атомы натрия, лития или неона) соединяется в группы и образует молекулы, которые находятся на следующей, более низкой ступеньке нашей квантовой лестницы. Они представляют характерные индивидуальные единицы; порог их устойчивости ниже, чем у атомов, вследствие большего размера молекул. Молекулу легче разложить на атомы, чем расщепить атом на ядро и электроны.

Интересно проследить за аналогичными явлениями на различных ступеньках квантовой лестницы. Мы наблюдаем, например, выделение энергии при соединении атомов в молекулы — химическое горение — и выделение энергии при слиянии маленьких ядер в большие — ядерное горение. Это два вида горения, очень несходные по количеству выделяемой энергии, но подобные в принципе; одно из них происходит на молекулярном уровне, другое — на ядерном.

Еще ниже на квантовой лестнице находятся макромолекулы; они представляют собой комбинации ряда особым образом расположенных обычных молекул. При известных условиях макромолекулы собираются в виде больших единиц, которые обладают удивительнейшими свойствами, — о них мы будем говорить более подробно в следующей главе. Это та ступень квантовой лестницы, на которой находится жизнь.

Последняя и низшая ступень занята веществом, находящимся при очень низкой температуре. Почти все вещества кристаллизуются при достаточном охлаждении; при этом их молекулы или атомы располагаются в правильном порядке. Тепловое движение исчезает, и устанавливается полный порядок, порядок совершенной неподвижности.

Когда мы достигаем самых низших ступенек квантовой лестницы — макромолекул и кристаллов, соотношение между размером и устойчивостью следует применять с некоторыми предосторожностями. Так как макромолекулы и кристаллы очень велики, мож-

но подумать, что они крайне неустойчивы. Однако здесь неустойчивость, которая следует из соотношения размер — устойчивость, относится только к несущественным свойствам этих объектов. Например, макромолекулы не обладают жесткостью, их можно изгибать и складывать с очень небольшой затратой энергии; в кристаллах можно возбуждать внутренние колебания, затрачивая весьма малые энергии, — такие колебания возникают при действии обычных звуковых волн. Однако важные структурные свойства подобных объектов, например атомная структура макромолекул

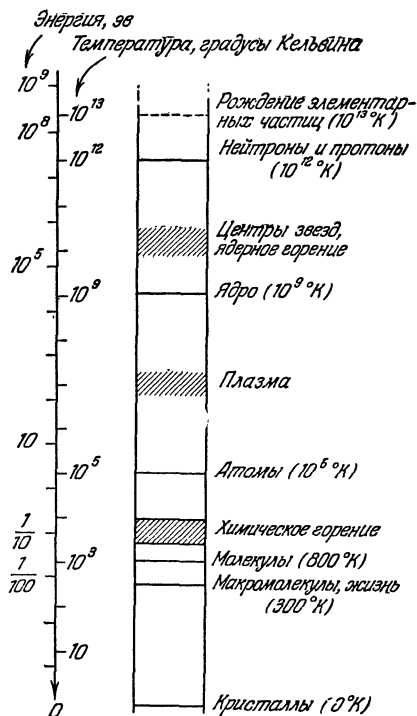


Рис. 49. «Квантовая лестница».

кул или правильное расположение атомов в кристаллической решетке, вполне устойчивы. Такие свойства определяются электронными конфигурациями атомов, и, следовательно, их устойчивость равносильна устойчивости электронных конфигураций в атомах.

Каждая ступенька на квантовой лестнице отвечает состоянию материи при определенных условиях (рис. 49). Чем ниже ступенька, тем выше организация и дифференциация материи. Каждый шаг вниз по

лестнице позволяет материи приобретать специфические формы, которые становятся тем разнообразнее, чем ниже мы спускаемся. На самой высшей ступеньке, о которой мы только что говорили, протоны, нейтроны и электроны движутся совершенно беспорядочно. На ближайшей более низкой ступеньке, в плазме, протоны и нейтроны находятся в упорядоченном виде в ядрах, но электроны по-прежнему находятся в беспорядочном движении. Еще ниже электроны присоединяются к ядрам и образуют атомы; они принимают свои типичные волновые конфигурации, характерные для атомов.

На следующей, более низкой ступеньке атомы соединяются в молекулы. Появляется широкая дифференциация, существует бесчисленное множество способов соединения атомов в молекулы, каждый соответствует появлению определенного вещества. На уровне макромолекул разнообразие еще больше: на этой ступеньке появляется живая материя в ее самых различных формах и с ее широчайшими возможностями. Обмен энергией достаточно мал для существования крупных комплексов молекул, клеток и организмов, но в то же время достаточно велик для стимуляции роста и развития этих объектов. На самой низшей ступеньке все разнообразие, любая дифференциация застывает, образуя неизменные картины закристаллизовавшегося вещества.

ЭЛЕМЕНТАРНЫЕ ЧАСТИЦЫ

Есть ли на квантовой лестнице ступенька, находящаяся выше состояния с отдельными протонами и нейтронами? Ответ на этот вопрос приводит нас к границе современной физики элементарных частиц.

Вспомним, что для разложения атомного ядра нужны энергии порядка многих миллионов электронов-вольт. Современные исследования в области высоких энергий не остановились на этом пределе. За последние 10 лет были построены ускорители, на которых достигались энергии во много сотен миллионов электронов-вольт. На некоторых устройствах удалось преодолеть даже миллиардный рубеж. В Женеве усилиями четырнадцати европейских наций был построен

ускоритель, дающий 28 миллиардов электроновольт. Аналогичное несколько большее устройство работает в Брукхэвенской национальной лаборатории на Лонг-Айленде.

Основное назначение этих устройств уже не состоит в изучении структуры ядра. Скорее на них изучается строение нейтронов и протонов. Здесь сделан шаг на следующую, более высокую ступеньку квантовой лестницы. Ставится вопрос: существует ли предел устойчивости нуклонов, есть ли такая энергия, выше которой становится заметным внутреннее строение протонов и нейтронов? Мы исследуем природу самих элементарных частиц. Вследствие очень малых размеров этих единиц мы ожидаем весьма высокого предела устойчивости, значительно более высокого, чем для атомных ядер. Действительно, достаточно было применить энергии в несколько сот миллионов электроновольт, чтобы были найдены указания на внутреннюю структуру.

При воздействии на вещество столь больших энергий наблюдаются явления, которые до сих пор еще не совсем понятны. Они показывают, что нуклоны обладают структурой, но мы не знаем как следует, что это за структура. В нашей книге мы ограничимся кратким описанием таких явлений, не особенно вдаваясь в их детали.

При этих энергиях наблюдаются явления и факты, которые можно отнести к четырем группам. Перечислим их:

1. Образование квантов ядерного поля — мезонов.
2. Существование антивещества.
3. Появление «странных» частиц.
4. Короткое время жизни частиц.

Первое явление мы можем объяснить довольно хорошо. В качестве свидетельства творческой изобретательности человеческого разума укажем, что японский физик Юкава еще в 1935 г. предсказал существование этих мезонов до того, как они были открыты на опыте. Его теоретические рассуждения до сих пор остаются верными. Протон и нейтрон, рассуждал он, служат источниками ядерных сил, которые удерживают нуклоны в ядре. Поле ядерных сил

окружает протон и нейтрон таким же образом, как электрическое поле окружает электрон. Электрон излучает свет, если он испытывает внезапный толчок и приводится в движение. Часть электрического поля как бы отторгается и распространяется в виде световых лучей, или, как мы теперь установили, в форме световых квантов. Аналогичным образом мы полагаем, что часть ядерного поля тоже отторгается при ударе нуклона с высокой энергией. Мы ожидаем найти ядерное излучение, кванты которого аналогичны световым.

Юкава предсказал существование этих квантов поля; исходя из свойств ядерных сил, он даже рассчитал минимальную энергию, необходимую для испускания такого кванта. Иными словами, он предсказал предел устойчивости протонов и нейтронов. Если протон или нейтрон испытывают столкновение с энергией, превышающей несколько сот миллионов электроновольт, то во всех направлениях испускаются мезоны — рождаются кванты поля ядерных сил. Такие кванты называют π -мезонами, чтобы отличать их от других частиц, которые тоже носят название мезонов. Испускание π -мезонов — это один из самых поразительных эффектов, наблюдаемых при очень высоких энергиях ¹⁾.

Вторая группа фактов особенно удивительна. В 1930 г. английский физик-теоретик П. А. М. Дирак предсказал существование антиэлектрона, позитрона, и его предсказание было вскоре подтверждено Карлом Д. Андерсоном, нашедшим позитрон в космических лучах. Мы уже говорили об этой частице, рассматривая радиоактивность; позитрон испускается вместе с нейтрино, когда протон превращается в нейт-

¹⁾ Автор говорил уже, что ядерные силы имеют очень малый радиус действия. Юкава учел, что, согласно принципам квантовой механики, радиус действия сил обратно пропорционален массе кванта, переносящего энергию поля этих сил. Электромагнитные силы имеют бесконечный радиус действия, и им отвечают световые кванты с нулевой массой. Радиус действия ядерных сил отвечает массе кванта, которая в 280 раз больше массы электрона. Согласно соотношению Эйнштейна между массой и энергией, для рождения такого кванта в свободном состоянии, т. е. для его испускания в результате удара, требуется энергия 140 миллионов электроновольт. (Прим. перев.)

рон. Антиэлектрон почти тождествен обычному электрону, но имеет противоположный заряд (положительный) и противоположные магнитные свойства. Но интереснее всего следующее: если антиэлектрон (позитрон) сталкивается с обычным электроном, то происходит нечто вроде взрыва, и обе частицы исчезают. Они взаимно аннигилируют, и энергия, заключенная в их массе, превращается в свет. Наоборот, при достаточной энергии свет также может при известных обстоятельствах преобразоваться в пару электрон — позитрон; таким образом, электроны и позитроны могут создаваться за счет чистой энергии. Масса одного электрона отвечает энергии в полмиллиона электроновольт. Следовательно, создание одной пары электрон—антиэлектрон требует энергии, не меньшей 1 *Мэв*.

Атомы содержат не только электроны, но и ядра, которые в свою очередь состоят из протонов и нейтронов. Возникает вопрос: существуют ли антипротоны и антинейтроны? Поскольку массы нейтронов и протонов очень велики, для создания такой пары, частица—античастица, потребуется значительно большая энергия, чем для создания пары электрон—позитрон; она должна достигать нескольких миллиардов электроновольт. Когда в Беркли была построена установка на 6 *Бэв* (рис. 50), физики всего мира с беспокойством ожидали результата решающего опыта — существует ли антипротон?

Ответ был утвердительным. То, что протон и нейтрон имеют античастицы, было показано Сегре, Чемберленом, Вигандом и Ипсилантисом. Тем самым было установлено, что все частицы, из которых состоит вещество, имеют своих антидвойников. Это открытие доказало, что существует антивещество, состоящее из антипротонов, антиэлектронов и антинейтронов. Если антивещество придет в соприкосновение с обычным веществом, начнется взрывная аннигиляция. Антипротоны и протоны взаимно аннигилируют, и большое количество энергии, заключенной в массе, перейдет к разлетающимся квантам ядерных сил, мезонам. Вот почему антивещество никогда не встречается на Земле, если только оно не произведено на наших установках. Оно может существовать только до момента соприкосновения с обыкновенным веществом.

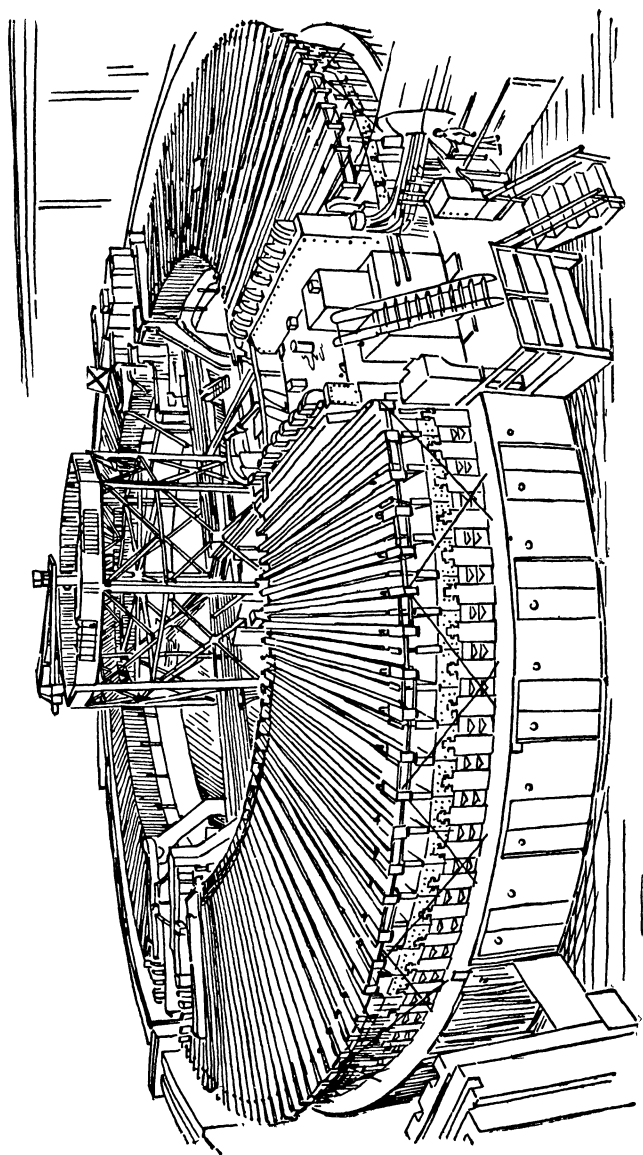


Рис. 50. Бэатрон в Беркли.

Перейдем теперь к третьей группе высокоэнергетических явлений, к появлению странных частиц. Когда протоны или нейтроны бомбардируют частицами очень высоких энергий, они иногда превращаются в частицы нового типа, называемые гиперонами. Гиперон обладает большей энергией, чем протон, и может рассматриваться как более высокое квантовое состояние протона. Атом тоже можно перевести в более высокое квантовое состояние, сообщая ему необходимый добавок энергии. Однако положение здесь не так уж просто: образование гиперонов всегда сопровождается одновременным рождением K -мезонов, которые, по-видимому, тоже являются квантами ядерного поля, но обладают большей энергией, чем π -мезоны. Физики все еще только стремятся понять смысл этого явления.

Четвертая группа наблюдений характерна для физики высоких энергий. Все недавно открытые частицы: π -мезон, K -мезон, гипероны — неустойчивы. Они имеют очень короткое время жизни, существуя около одной миллиардной доли секунды или даже меньше, а потом превращаются в другие частицы. Например, квант ядерного поля, π -мезон, живет только 10^{-8} сек. После этого он превращается в пару электрон — нейтрино. Положение здесь осложняется тем, что в этой паре мы имеем не обычный электрон, а тяжелую его разновидность с массой, примерно в 200 раз превышающей массу обычного электрона. Его принято называть μ -мезоном, но такое название не очень удачно, так как мезоны суть кванты поля, а тяжелый электрон — это обычная частица.

Сам тяжелый электрон живет 10^{-6} сек, после чего он претерпевает новое превращение. Он превращается в нейтрино с одновременным испусканием пары электрон — нейтрино. Таким образом, π -мезон кончает тем, что превращается в электрон и три нейтрино ¹⁾.

¹⁾ В настоящее время получены указания на то, что один из двух нейтрино при μ -мезонном распаде отличен от нейтрино при π -мезонном. Имеются два сорта нейтрино: μ -мезонный испускаемый при $\pi \rightarrow \mu$ -распаде, и электронный, испускаемый при обычном радиоактивном распаде ядер. При распаде μ -мезона испускаются два нейтрино обоих различных видов. (Прим. перев.)

Природа этих странных превращений еще не ясна, но они кажутся взаимосвязанными. Краткость времени жизни частиц здесь обманчива. В условиях, существующих в ядрах, миллиардная доля секунды — это очень большой промежуток времени. В конце концов, естественным интервалом времени в ядре можно считать, например, тот промежуток времени, за который нуклон проходит сквозь ядро под действием ядерных сил. Такой промежуток времени гораздо короче одной миллиардной доли секунды, он составляет около 10^{-22} сек. Следовательно, неустойчивость новых частиц — это слабый эффект, и он указывает на какое-то специфическое слабое взаимодействие. Распад этих новых частиц очень похож на радиоактивный распад нейтрона в протон. В обоих случаях участвуют нейтрино. Объяснение этих явлений и их взаимосвязи — основная проблема современной физики ¹⁾.

Наивысшая ступень квантовой лестницы оказывается наиболее загадочной. Если мы поймем связанные с ней, но пока не объясненные явления, то нам удастся ответить на еще более фундаментальные вопросы: почему вещество состоит только из частиц трех видов: протонов, нейтронов и электронов? Почему существует только одна элементарная единица заряда — заряд электрона, равный по величине и противоположный по знаку заряду протона? Почему любая вновь открытая частица всегда имеет заряд, просто равный или равный, но противоположный по знаку, заряду электрона?

И наконец, следует задать еще один вопрос: если мы изучим и объясним явления на наивысшей ступеньке квантовой лестницы, можно ли будет подняться на следующую ступень? Только дальнейшее исследование природы позволит когда-нибудь ответить на этот вопрос. Надо продолжать поиски, и тогда мы сможем получить ответ.

¹⁾ О теории слабых взаимодействий в настоящее время известно почти столько же, сколько об электромагнитных взаимодействиях. Весьма далек от ясности вопрос о связи тех и других, но это с теми же основаниями можно считать признаком недостаточности наших знаний о теории электромагнитного поля. Главные трудности пока что встречаются в теории ядерных, сильных, взаимодействий. Например, идея Юкавы так и не получила количественного выражения. (Прим. перев.)

ГЛАВА VIII

ЖИЗНЬ

В предыдущих главах мы пытались выяснить строение вещества. Мы изучали атомы, ядра и различные комбинации атомов в молекулы. Условия на Земле таковы, что большинство атомов находится в характерных для каждого атома низших квантовых состояниях и соединяется в молекулы. Поэтому мы и находим на Земле так много веществ с точно определенными свойствами: минералы, металлы, вода, воздух и т. д. Но таких условий нет на поверхности Солнца. Там температуры столь высоки, что молекулы не могут существовать. Они будут немедленно разорваны на атомы. Поэтому мы должны ожидать, что на Солнце есть только элементы и нет молекул и что все находится в виде горячих паров. Среда, окружающая нас на Земле, к счастью, значительно более разнообразна, так как мы живем среди самых различных веществ, находящихся в твердом, жидком и газообразном состояниях.

Природные материалы и химические вещества инертны и неактивны. Они изменяют свою форму и химический состав только под влиянием внешних причин: воздух движется в результате нагревания Солнцем, вода — под действием ветра или силы тяжести, твердые тела — под влиянием механических или химических воздействий, таких, как ветер и непогода, химические процессы инициируются нагреванием и охлаждением, вызванным Солнцем и атмосферными факторами, а также потоком тепла из земных недр. В качестве примера укажем на ущелье, покрытое валунами, по которому течет река (рис. 51).

В ложе ущелья встречаются куски породы самых разных размеров — от малых зерен до больших

валунов; форма их зависит от того, что с ними происходило, пока их нес поток с какой-нибудь разрушающейся горы. Каждый валун состоит из маленьких кристалликов, строение и твердость которых определяются свойствами двуокиси кремния — вещества, из которого состоит большинство горных пород. На поверхности кусков породы видны следы химических реакций с кислородом воздуха, с водой потока или с дождевой водой. Однако при всем разнообразии объектов, при всех свидетельствах изменений, смещений



Рис. 51. Покрытое валунами ущелье, по которому течет речка.

вверх и вниз, непрерывных химических воздействий именно покой есть то свойство открывающейся нам картины, которое производит на нас наибольшее впечатление. Ничто не движется, кроме журчащей воды, когда-то поднятой в атмосферу в результате испарения и теперь гонимой вниз в зеленую долину под действием силы тяжести. Порыв ветра может переместить крупинки песка или перекатить с места на место несколько камушков, но это чисто механическое движение, которое не затрагивает внутреннюю структуру материи.

Однако на Земле существует и нечто другое, что вызывает изменение и движение и представляет совсем иную форму проявления материи. Куда мы ни посмотрим, мы везде увидим *жизнь*. Явления жизни никак не укладываются в те рамки, в которых может существовать обычное вещество, состоящее из атомов и молекул. Живая материя не инертна и не пассивна. Она растет, размножается, движется по земле,

в воде и в воздухе, ее активность, по-видимому, предопределяется внутренними, а не внешними причинами. Живые объекты обладают характерными формами, сильно отличающимися от форм всех объектов, состоящих из обычной материи. Формы и размеры живых объектов воспроизводятся и повторяются и очень мало зависят от случайных условий в окружающей их среде. Существует очевидная единица живой материи — отдельный организм. Имеет вполне определенный смысл говорить о 1000 бактерий, о 1000 розовых кустов, о 1000 львов; эти единицы значительно крупнее естественных единиц материи — молекул.

Химический анализ показал, и в этом нет ни тени сомнения, что живые объекты состоят из тех же атомов, что и неживые. В самом деле, живая материя состоит в основном из четырех элементов: углерода, кислорода, водорода и азота; она содержит также и следы других элементов: железа, фосфора и магния. Нет ни малейших указаний на то, что в живой материи присутствует какое-либо специфическое вещество или что в ней иные законы взаимодействия между атомами.

Таким образом, явления жизни должны быть результатом обычных взаимодействий между атомами и молекулами, конечно, весьма специфическими молекулами, которые отличаются своим сложным строением от молекул неживого.

Сейчас мы еще очень далеки от того, чтобы полностью понимать, как взаимодействие этих молекул может порождать жизнь. Однако в последние два десятилетия биологи выполнили столько новых исследований молекулярного строения живых систем, что мы и сейчас уже можем составить представление о том, что происходит в живом веществе. Современные успехи, достигнутые в понимании жизни, следует считать одним из крупнейших достижений науки, сравнимых с работами Ньютона и Максвелла и с тем, что дала квантовая механика. Живые структуры имеют для нас особый интерес не только потому, что наш организм состоит из живой материи, но и потому, что иные формы жизни составляют наиболее существенную часть окружающей нас среды.

МОЛЕКУЛЫ ЖИЗНИ

Жизнь существует во многих формах. Рассмотрим сначала простую форму жизни — бактерию ¹⁾ (фото VI). Она имеет в длину около 25 сотысячных сантиметра, вытянута наподобие сосиски и состоит из оболочки со студнеобразным содержимым. Такая единица называется «клеткой». Для того чтобы понять существенные черты живого объекта, сравним его с неживым объектом примерно той же формы, например с пластмассовой оболочкой в форме колбаски, наполненной каким-то студнеобразным веществом, вроде желатина или жира. Стенки и содержимое такого макета должны быть однородными; они должны состоять из множества тождественных молекул одного сорта. Молекулы пластмассы образуют оболочку, молекулы желатина или жира — содержимое макета. Однако в клетке ситуация значительно сложнее, а дифференциация несравненно шире. Единицы, из которых построено вещество клетки, представляют собой сложные комбинации целого ряда молекул, так называемые макромолекулы. В одной клетке содержится не один и не два сорта таких макромолекул, а не менее пяти тысяч, причем каждый сорт имеет свою строго определенную специфическую структуру.

Но эта сложность еще не составляет основного различия между живым и неживым. Поместим оба объекта — пластмассовый мешочек с жиром или желатином и настоящую бактерию — в так называемый питательный раствор, т. е. в раствор сахара, фосфата и аммиака. Пластмассовый мешочек изменится очень незначительно. Немного содержимого мешочка может просочиться сквозь оболочку наружу, а немного раствора может попасть внутрь. Бактериальная же клетка изменится весьма сильно: она будет расти, внутри оболочки образуется больше макромолекул. Молекулы раствора просочатся в клетку сквозь ее оболочку, там они разложатся, и составляющие их атомы перестроятся в новые макромолекулы. Если этот процесс продолжится еще некоторое

¹⁾ Мы описываем бактерию *Escherichia coli*. Существует много видов бактерий, и их свойства неодинаковы.

время, произойдут еще более странные вещи. Клетка разделится на две части, и каждая часть начнет расти сама по себе. В конце концов, когда израсходуется весь питательный материал, все сравнительно простые его молекулы — сахар, фосфат, аммиак — превратятся в сложные макромолекулы клеток. Это и есть процесс жизни.

В основном в клетке содержатся макромолекулы двух сортов — *белки* и *нуклеиновые кислоты*. Большая часть клетки состоит из белков; нуклеиновых кислот в ней значительно меньше, но они играют чрезвычайно важную роль.

Начнем с описания белков. Это большие единицы, макромолекулы, построенные из молекул аминокислот того же типа, что и описанные в гл. VI. Аминокислоты нанизаны, как бусины на струну, одна за другой; они как бы выстроились по прямой в ряд; число таких бусинок часто достигает 1000. Здесь мы встречаемся с типичным свойством жизни макромолекул. Они представляют собой цепи из более мелких единиц, расположенных во вполне определенном порядке, — длинные цепи, в которых одна молекула следует за другой.

Порядок чередования этих единиц очень важен. В белках мы находим 20 видов аминокислот. Они имеют свои названия, например глицин, аланин и т. д., но мы будем называть их просто буквами алфавита: *а*, *б*, *с* и т. д.; всего нам понадобится 20 букв. Теперь мы можем описать белок, перечислив его аминокислоты в том порядке, в каком они расположены (рис. 52). Любое расположение букв, например *с*, *ф*, *т*, *и*, *а*, *д* и т. д., определит некий белок. Для описания очень больших молекул белка понадобятся тысячи букв. Имеется бесчисленное множество способов расположения 20 различных видов аминокислот в ряд из 1000 членов. Каждому расположению соответствует один определенный белок. Мы можем получить представление о том, насколько велико число возможных белков, если напомним, что 1000 букв занимает около двух третей книжной страницы. Каждый способ заполнения этих страниц буквами, независимо от того, образуют ли они осмысленные и бессмысленные слова, отвечает другому белку.

Белки, находящиеся в живой материи,— это лишь малая часть всех возможных белков. Они содержат только «осмысленные» комбинации аминокислот, используемые в структуре и химии клетки. Они отвечают тексту, состоящему из содержательных фраз. Но все же число возможных белков огромно. Например, белки, входящие в состав кожи человека, различны

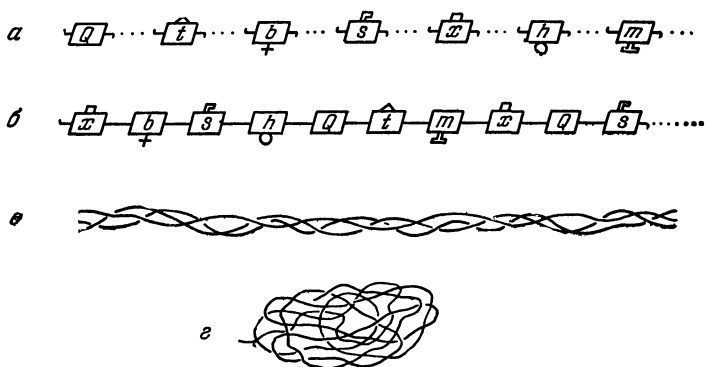


Рис. 52. Строение белка.

а — упрощенная схема различных аминокислот; крючки с одной стороны символизируют карбоксильную группу, крючки с другой — аминогруппу; крючки зацепляются друг за друга и связывают аминокислоты; б — цепь аминокислот; в и г — эти цепи изображены линиями, в — волокнистый, или фибриллярный, белок; его цепи свиваются наподобие волокон веревки; г — глобулярный белок, его цепи свернуты в клубок.

у каждого индивидуума. Поэтому нельзя пересаживать кожу от одного человека другому, кроме тех случаев, когда они однояйцевые близнецы.

Бактериальная клетка — одна из простейших живых единиц, и поэтому она содержит значительно меньшее число белков. В ней «только» 5000 различных видов белков. Они во многих отношениях различны. Одни из них негибки и похожи на волокна; они служат материалом для клеточной стенки, для внутренних мембран и перегородок (эти белки похожи по своему строению на белки кожи человека). Другие белки гибки настолько, что длинные аминокислотные цепи спутаны в клубки. Они называются глобулярными белками и способны перемещаться; из них состоит почти все студнеобразное содержимое клетки.

Глобулярные белки химически активны; как мы увидим далее, они могут участвовать в химических

реакциях, нужных для процесса роста. Для таких специальных целей нужны сложнейшие механизмы, вот почему некоторые белки являются такими сложными комбинациями молекул.

Перейдем теперь к макромолекулам второго типа — к нуклеиновым кислотам. Они представляют только малую, но, как мы увидим, наиболее существенную часть клетки. Важнейшая нуклеиновая кислота — это дезоксирибонуклеиновая, сокращенно ДНК (фото VII). ДНК также представляет собой линейную последовательность отдельных единиц, расположенных одна за другой. Но эти единицы уже не аминокислоты, а молекулы, называемые нуклеотидами. Существует только четыре сорта таких молекул: цитозин, гуанин, тимин и аденин. Здесь нас не интересуют детали их строения; они содержат атомы углерода, азота, кислорода и фосфора. Назовем их просто *Ц*, *Г*, *Т* и *А*. Элементы, или единицы, цепи, образующие макромолекулу ДНК, на самом деле несколько сложнее. Это пары нуклеотидов. Звеньями такой цепи служат пары *Ц* с *Г* и *А* с *Т*.

Из-за расположения пар нуклеотидов лучше, быть может, описывать нуклеиновые кислоты как лестницы, а не как цепи (рис. 53). Каждая ступенька лестницы — это одна из пар. Небезразлично, какой из нуклеотидов пары находится с правой и какой с левой стороны ступеньки. Поэтому существует четыре сорта ступенек: *ЦГ*, *ГЦ*, *ТА* и *АТ*; они следуют друг за другом во вполне определенном порядке, характеризующем дезоксирибонуклеиновую лестницу. Кроме того, эта лестница закручена в спираль, так что вся молекула выглядит, как винтовая лестница, в которой каждой ступенькой является пара нуклеотидов. В живых клетках эти молекулы имеют огромную длину — они содержат от десяти до ста миллионов пар нуклеотидов в ряд. В клетке спирали все свиты в плотный клубок. Размотав клубок, мы увидим, что в бактериальной клетке полная длина винтовой лестницы достигает сантиметра, а в клетках человеческого тела — нескольких метров (фото VIII).

Здесь надо остановиться и подумать. Мы встретились с молекулярной структурой длиной в несколько сантиметров или метров, т. е. с объектом макроскопи-

ческого размера, столь же большим, как и предметы на нашем письменном столе. А ведь это одна-единственная молекула. Конечно, она столь длинна, так как состоит из огромного числа нуклеотидов; каждая

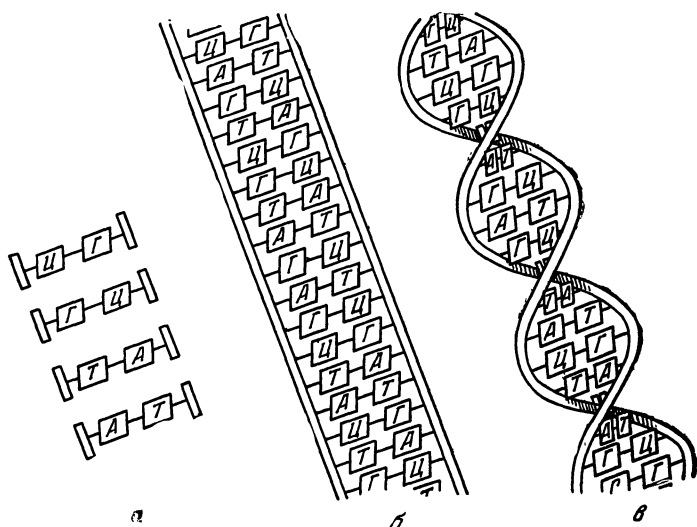


Рис. 53. Схематическое изображение молекулы ДНК.

а — четыре звена ее цепи; б — лестница без скручивания; в — истинная форма скрученной винтовой лестницы.

пара нуклеотидов очень мала, так же мала, как и обычная неживая молекула, длину которой мы считаем примерно равной 10^{-7} см. Но если выстроить в ряд 10 или 100 миллионов таких пар, то мы получим уже макроскопические размеры.

Есть известный смысл в том, что поддержание жизни требует столь длинных молекул. Мы покажем это в дальнейшем более подробно. Пока же удовлетворимся тем, что подчеркнем колоссальное число различных возможных вариантов расположения молекул в ДНК. Мы уже видели, каким огромным числом способов можно построить белковую цепь из 1000

бусинок (аминокислот), если имеется 20 типов бусинок.

В случае ДНК мы имеем только 4 типа звеньев, но всего их может быть 10—100 миллионов! Важно понять, что ограничение числа типов до 4 (вместо 20 у белков) уменьшает число возможных расположений, но не очень сильно. Это уменьшение с избытком перекрывается значительно большим числом звеньев. Вместо 20 букв мы теперь имеем только 4. Но можно записать текст, пользуясь только двумя буквами, как, например, в азбуке Морзе, где применяются только тире и точки. Конечно, для этого требуется в среднем по три или четыре знака на букву, и, следовательно 1000 сигналов будет отвечать только одной пятой части страницы. Однако в молекуле ДНК (помимо того, что имеются четыре, а не два символа) содержится от 10^7 до 10^9 ступенек, в несколько тысяч раз больше, чем в белке, что соответствует книге в 1000 или в 10 000 страниц. Поэтому число возможных способов построения молекулы ДНК так же велико, как и число возможных расположений букв (в осмысленном и бессмысленном порядке) в книге, состоящей не менее чем из 10 000 страниц!

Мы скоро увидим, что это разнообразие связано с разнообразием жизни, что расположение четырех типов пар в молекуле ДНК и есть та книга, которая говорит клетке, что ей делать и как развиваться. Остается только узнать, как прочесть эту книгу.

ХИМИЧЕСКИЙ ПРОЦЕСС ЖИЗНИ

Вернемся теперь к тому, что мы называли процессом жизни,— к росту бактериальной клетки и ее делению на две новые при погружении в питательный раствор сахара, фосфата и аммиака. Этот процесс наиболее интересен и загадочен.

Молекулы сахара и аммиака очень просты. Поэтому в бактериальной клетке должен существовать механизм, способный выполнять два процесса: во-первых, строить 20 видов аминокислот и 4 нуклеотида из сахара и аммиака и, во-вторых (этот второй этап значительно труднее), соединять аминокислоты в правильном порядке, обеспечивающем образование

тысяч различных белков и точное повторение нуклеиновых кислот в процессе деления.

Первое задание — производство «бусинок» — выполняют, как мы уже упоминали, некоторые белки клетки. Эти белки обладают способностью разлагать молекулы питательного раствора после того, как они просочились сквозь оболочку, и переставлять образовавшиеся атомы так, чтобы они превратились в аминокислоты или нуклеотиды.

Второе задание — расположение бусинок в правильном порядке, обеспечивающем получение новых белков или новых нуклеиновых кислот, — выполняется при участии длинных цепей из нуклеиновых кислот.

Детали этого механизма известны не особенно хорошо. Он очень сложен и поэтому требует так много чрезвычайно сложных белков и нуклеиновых кислот. Основные принципы этого механизма были открыты только в последние два десятилетия. Мы попытаемся представить их в несколько упрощенном виде.

Для этого процесса необходимо одно — энергия. Когда образуются аминокислоты и когда они присоединяются друг к другу, нужна энергия, чтобы поставить их части на правильные места и связать их должным образом.

Рассмотрим процесс получения энергии. Молекулы сахара, находящиеся в питательном растворе, в который погружена бактерия, содержат энергию. Мы знаем, что при сжигании сахара может освободиться много энергии в виде тепла, если он превращается в углекислоту и воду. Но в данном случае тепловую энергию никак нельзя использовать, потому что она сводится к беспорядочному тепловому движению, которое нельзя применить для целеустремленного создания молекул. В гл. VI мы говорили, что специальным способом можно превратить энергию горения из тепла в энергетические квантовые состояния некоторых молекул. В клетке это осуществляют определенные специфические белки. Они способны притягивать молекулы сахара к своей поверхности. Здесь молекулу сахара вынуждают распасться на группы атомов, которые белки перестраивают так,

чтобы получилась углекислота и вода. Этот процесс эквивалентен «горению». Что же происходит с энергией, освобождаемой при таком процессе? Белок притягивает к себе молекулы другого рода, которые держатся близ распадающегося сахара. Эти молекулы (всегда присутствующие в клетке) называются аденозинтрифосфатами или сокращенно АТФ. Они могут находиться в двух квантовых состояниях: одном с большей и другом с меньшей энергией — и поэтому служат хранилищами энергии, извлеченной из сахара. Как только сахар «сжигается» белком, молекулы АТФ переходят в высшее квантовое состояние. Если для молекулярного синтеза в клетке где-либо потребуется энергия, молекула АТФ направится туда и отдаст свою энергию, переходя обратно в состояние с более низкой энергией ¹⁾.

Носители энергии АТФ имеют еще одно преимущество. Они несут очень малые количества энергии. Энергия, освобождаемая при сгорании одной молекулы сахара, распределяется примерно между 40 молекулами АТФ. Энергия разменивается, так сказать, на мелкие монеты и легче распределяется между всеми нуждающимися в ней.

Теперь мы переходим к следующему вопросу: как молекулы и макромолекулы присоединяются друг к другу в клетке? Начнем с бусинок, образующих белковые цепи, т. е. с аминокислот. Все атомы, содержащиеся в аминокислотах, можно найти в питательном растворе; все они есть в молекулах солей, сахара и аммиака. Эти молекулы проникают в клетку через поры ее оболочки. Поэтому требуется только разложить простые молекулы питательного раствора и сложить их части так, чтобы образовались аминокислоты. Этот существенный шаг также осуществляют белки. Определенная группа специфических белков производит определенный тип аминокислоты, в результате чего получается весь набор требуемых аминокислот. Белки этой группы обладают свойством притягивать нужные молекулы питательных веществ

¹⁾ В действительности состоянию с меньшей энергией соответствует аденозиндифосфат (АДФ). Запасание энергией сопровождается приобретением еще одного атома фосфора, так что состоянию с большей энергией соответствует аденозинтрифосфат.

и с помощью энергии, поставляемой АТФ, перетасовывать атомы до тех пор, пока из них не получится должная аминокислота. Это получается следующим образом: когда белок встречает сахар и аммиак, атомы последних присоединяются к белку под известными углами. Эти углы таковы, что атомы, однажды присоединившись, вынуждены попадать в соответствующие места образующейся аминокислоты.

Есть и другие белки, которые таким же способом производят нуклеотиды из молекул питательной среды.

Все эти процессы иллюстрируют удивительные свойства белков. Последние могут осуществлять и направлять такие химические реакции, как перенос энергии от сгорающего сахара к АТФ или образование аминокислот и нуклеотидов. Белки, обладающие такой способностью, обычно называют ферментами. Они гораздо сложнее простых белков, которые не являются ферментами и служат только для создания определенной клеточной структуры и для регулировки потока веществ. Белки могут сами воспроизводить все свои компоненты, но они не способны соединять их. Белки делают буквы, но не могут складывать их в слова. Буквы есть, но где же автор, который составляет из них слова и предложения?

ГЕНЕРАЛЬНЫЙ ПЛАН, УПРАВЛЯЮЩИЙ ЖИЗНЬЮ

Теперь мы должны ответить на самый важный вопрос: как аминокислоты соединяются в белки? В этом этапе сосредоточены все секреты жизни бактерии, ибо, как мы уже видели, именно различные типы белков выполняют все важнейшие процессы в химической жизни клеток. Где же в клетке спрятан генеральный план построения каждого из многих тысяч белков, план, определяющий порядок чередования аминокислот вдоль ряда? Напомним, что каждый белок — это цепь примерно из 1000 аминокислот (иногда их больше, иногда меньше) и если мы приписываем каждой аминокислоте одну букву алфавита, то ряд аминокислот будет отвечать ряду из 1000 букв, занимающему около полустраницы нашей книги. Для

того чтобы задать порядок аминокислот в 5000 белках потребуется несколько тысяч таких страниц. Где же находится эта информация в клетке? Надо только вспомнить, что макромолекулы нуклеиновых кислот несут в себе возможность передать содержание многих тысяч страниц книги. Такую информацию нам может дать порядок расположения четырех типов пар нуклеотидов вдоль витков спирали. Существует достаточно возможностей расположения ступеней в нуклеиновой кислоте длиной в несколько сантиметров для задания всех 5000 белков, входящих в состав бактерии.

Здесь сам собой возникает большой вопрос: каким же образом порядок нуклеотидов в нуклеиновой кислоте задает порядок аминокислот в белках? Как информация, заключенная в ступенях спирали, передается вновь образующимся белкам? Как может клетка «читать» эту книгу, насчитывающую много тысяч страниц, и следовать ее указаниям в процессах роста и деления?

Об этом немного пока известно. Мы знаем только, что такая передача информации происходит. Очень упрощенно мы можем изобразить воспроизведение белков следующим образом. Определенная группа ступенек спиральной лестницы притягивает один сорт аминокислот, следующая группа — другой сорт и так далее ¹⁾. Ступеньки расположены так, что аминокислоты сами выстраиваются в том порядке, в котором, как предполагается, они должны находиться в белке. Белки образуются вдоль лестницы нуклеиновых кислот, которая достаточно длинна, чтобы на ней поместились все 5000 белков, необходимых бактерии. Это описание воспроизведения белков чрезвычайно упрощено. Мы знаем, что истинные процессы гораздо сложнее и что большинство их деталей еще неизвестно. Тем не менее нарисованная нами картина

¹⁾ Так как существует четыре различных типа нуклеотидов, сочетания из двух пар дают только 16 комбинаций и не могут однозначно отвечать 20 аминокислотам. Как минимум, необходимы сочетания из трех пар нуклеотидов. В настоящее время доказано, что это действительно так, и найдено, каким тройкам соответствуют какие аминокислоты. Подробнее см. сборник «Живая клетка» под редакцией Г. М. Франка, ИЛ, 1962. (Прим. перев.)

поможет читателю уяснить сущность того, что, по нашему мнению, является основными процессами в бактериальной клетке ¹⁾.

Подведем некоторые итоги. Клетка состоит из многих типов белков. Наиболее простые белки образуют оболочку и структурный остов клетки. Другие белки сжигают сахар и способствуют образованию несущих энергию молекул АТФ; наиболее сложные белки производят аминокислоты из веществ питательной среды. Клетка содержит также несколько крупных молекул нуклеиновых кислот, которые способны соединять аминокислоты в правильном порядке, что обеспечивает образование новых белков всех сортов, требуемых в процессе роста.

Когда клетка достигает определенных размеров, какие-то еще плохо известные факторы вызывают перегруппировку белков, и клетка делится на две одинаковые клетки меньших размеров. На этой стадии необходимо удвоить важные во всех отношениях нуклеиновые кислоты, так как все клетки нуждаются в определенном их наборе для дальнейшего роста. Удвоение такой длинной и строго упорядоченной молекулы — процесс нелегкий. Мы еще точно не знаем, как он происходит в природе, но можем представить себе возможный путь его осуществления. Вот простой механизм удвоения винтовой лестницы, воспроизводящей длинную молекулу ДНК.

¹⁾ На самом деле белки не составляют непосредственно на молекуле ДНК. Сначала образуются копии тех частей ДНК, которые содержат информацию об одном определенном белке. Эти копии находятся в виде других нуклеиновых кислот, РНК (рибонуклеиновых кислот), представляющих собой цепи одиночных нуклеотидов, а не пар, как в ДНК. Каждая из таких копий, конечно, гораздо короче исходной ДНК, так как она содержит только часть, относящуюся к одному белку. Мы называем ее РНК-переносчиком. Для каждого типа белка имеется особый переносчик. Они движутся от «ядра» клетки, где находятся ДНК, и попадают в так называемые рибосомы, специальные места клеток, отведенные для производства белков. Здесь РНК-переносчик находит различные аминокислоты, которые затем выстраиваются в правильном порядке, требуемом для образования определенного белка. Группа звеньев в цепи РНК притягивает один вид аминокислот, следующая группа звеньев — другой и т. д. В рибосомы входят еще такие вещества, которые нужны для того, чтобы помочь аминокислотам найти правильные места вдоль РНК-переносчиков и соединиться друг с другом.

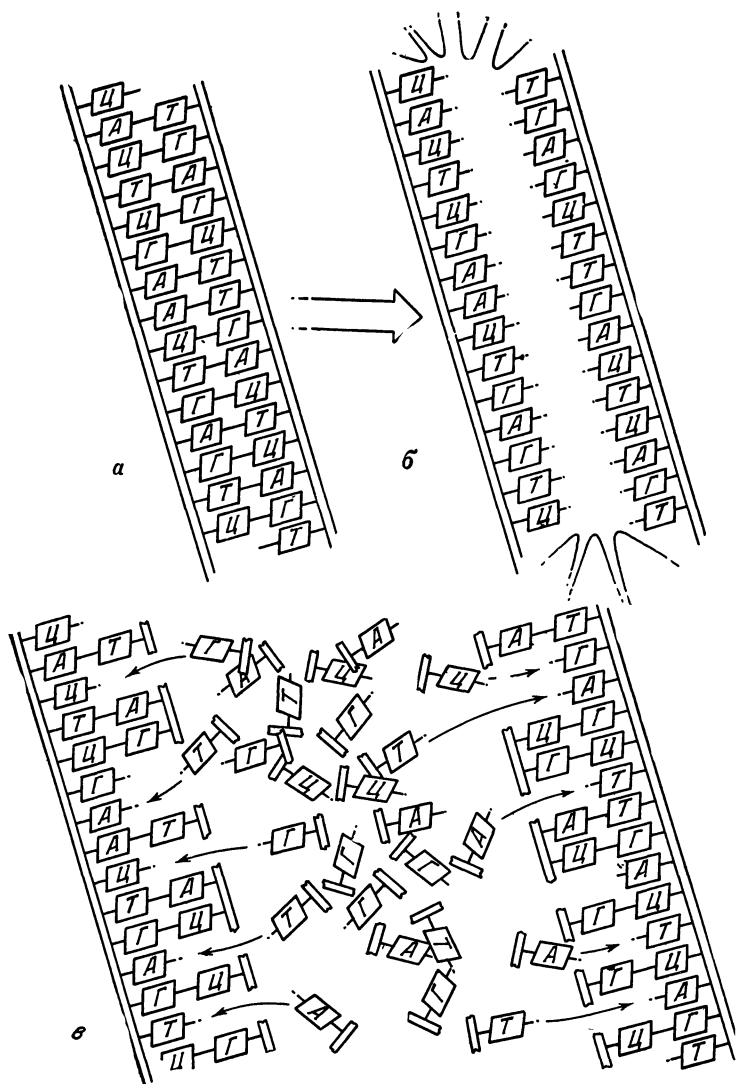


Рис. 54. Воспроизведение ДНК.

a — молекула ДНК, для ясности устранены спиральные витки; *б* — продольное расщепление ДНК; *в* — каждая половина ДНК «собирает» нужные нуклеотиды и образует новую полную молекулу ДНК, тождественную исходной.

Как мы помним, каждая ступенька лестницы — это определенная пара нуклеотидов. При делении клетки лестница расщепляется в длину на две части в результате разрыва каждой ступеньки посередине (рис. 54). Оба члена пары, составляющей ступеньку, просто разделяются, так что образуются две половинки лестницы. Вспомним теперь, что в это время клетка содержит свободно плавающие нуклеотиды, которые производятся особыми белками (ферментами). Поэтому каждая половинка ступеньки находит в клетке соответствующий нуклеотид и снова образует целую ступеньку. В результате этого процесса получаются две лестницы с точно одинаковым порядком ступенек; после деления каждая попадает в одну из вновь образовавшихся клеток.

Теперь мы получили некоторое представление о том, как растет и размножается клетка. Когда несколько бактерий помещены в питательный раствор, процессы жизни превращают простые, но богатые энергией молекулы растворов в более сложные молекулы все большего числа бактерий, и эти процессы продолжают до тех пор, пока все питательные вещества не израсходуются. Такие процессы возможны только благодаря участию макромолекул ДНК, которые не только определяют схему построения белков, но и воспроизводятся при каждом делении клетки, так что «постройка» белков может идти все быстрее и быстрее.

ВИРУС И ЧЕЛОВЕК

До сих пор мы описывали строение бактерии и процесс ее развития. А что мы можем сказать о других формах жизни, от вируса до человека, включая сюда всех животных и все растения? Замечательно, что некоторые существенные черты одинаковы во всех проявлениях жизни, несмотря на огромное разнообразие ее форм и представителей.

Рассмотрим два противоположных конца этой шкалы — вирус (фото IX) и человека. Вирус гораздо меньше бактерии. Он состоит из нуклеиновой кислоты, заключенной в оболочку, образованную простыми белками. В нем нет сложных белков, производящих аминокислоты, АТФ и нуклеотиды. Он в них не нуж-

дается. Вирус ведет жизнь паразита. Он может жить и размножаться, только находясь в какой-нибудь другой клетке. Присоединяясь к оболочке клетки-хозяина, он впускает в клетку свои нуклеиновые кислоты и использует ее аминокислоты и нуклеотиды (а также ее энергетические ресурсы, т. е. АТФ) для собственного размножения и для построения своей новой оболочки. Он действует так быстро, что вскоре клетка заполняется вновь образующимися вирусами; тогда ее оболочка лопается, и сама она погибает (фото X). Эти вирусы вызывают болезни. Они атакуют некоторые клетки нашего организма и убивают их, используя материал самих клеток для своего воспроизведения. Естественно, что нуклеиновая кислота вируса должна «знать» гораздо меньше нуклеиновой кислоты бактерии. Ей нужно лишь производить белки для своей оболочки и воспроизводиться. В других белках вирус не нуждается, потому что клетка-хозяин снабжает его всем остальным. Не удивительно, что у вируса нуклеиновая кислота гораздо короче, чем у бактерии. Винтовая лестница вируса имеет только 100 000 ступенек, что хорошо согласуется с нашим представлением о нуклеиновой кислоте как о носителе информации. Вирус — это простейшая единица живого, он обладает самой короткой цепью ДНК.

Перейдем теперь к наиболее сложному живому существу — человеку и сравним его с бактерией. Прежде всего, бактерия — это единственная клетка, а человек — совокупность колоссального множества самых различных клеток. Однако, несмотря на свое разнообразие, клетки человеческого тела во многих отношениях похожи на бактериальные. Они тоже состоят из белков — простых, имеющих форму волокна, в оболочке и структурных элементах, и сложных, глобулярных белков, обеспечивающих осуществление химических реакций. Они содержат молекулы АТФ, в которых запасена энергия. И наконец, каждая клетка содержит молекулы ДНК. Эти молекулы, как и следует ожидать, очень длинны, примерно в 100 раз длиннее бактериальной ДНК. Если распрямить винтовую лестницу ДНК, содержащуюся в теле человека, то ее длина составит около двух метров. Однако в действительности эти лестницы спутаны в клубки и

занимают очень мало места в клетке. В них насчитывается несколько миллиардов ступенек! Огромное число их, конечно, связано с тем, что человек организован гораздо сложнее бактерий.

Хотя все клетки человека содержат одну и ту же ДНК, в других отношениях они весьма различны. Каждый тип клеток служит различным целям. Клетки кожи защищают тело, клетки желудка выделяют вещества, требуемые для пищеварения, клетки мышц способны сокращаться и производить физическую работу, клетки сетчатки в глазу чувствительны к свету, и, кроме того, есть и нервные клетки.

Нервная система — это, вероятно, важнейшая новая структура, образовавшаяся в процессе превращения бактерий в высшие формы. Нервы представляют собой длинные нити, состоящие из особых клеток, по которым, как по телефонным проводам, передаются сообщения из одного места в другое; но передача сообщения по нервам происходит медленнее и иным механизмом. Когда свет падает на сетчатку, раздражение передается мозгу, при возбуждении кожи оно передается в другие участки мозга. И наоборот, раздражение, возникающее в мозгу, передается по нервам к каждой мышце тела и вызывает ее сокращение. Сам мозг представляет собой сложный клубок колоссального множества нервных клеток, число которых достигает 10 миллиардов. Их расположение и связь между отдельными клетками пока непонятны. Но эта гигантская совокупность нервных клеток способна реагировать на раздражения, приходящие извне. Мы можем думать и чувствовать.

Между бактерией и человеком есть существенное биологическое различие. Когда бактерия растет и размножается, она производит все, что ей требуется, в одной-единственной клетке. При росте человеческого существа должны образовываться самые различные клетки: клетки кожи, мышц, костей, нервные клетки и т. д. Развитие каждой части организма должно происходить по своему генеральному плану.

Отсюда возникает наиболее важная и интересная проблема, которая все еще не решена. По нашим нынешним представлениям, каждая клетка содержит молекулу ДНК, обладающую всей информацией об

организме; она способна производить все белки, из которых состоит этот организм. Но очевидно, что ни одна клетка не может сделать все белки. Откуда же клетка узнает, какая часть программы, заложенной в ДНК, относится к ее собственному росту? Как исключаются другие части программы и используются только те, которые нужны?

Рассмотрим проблему роста и развития индивидуума. Мы знаем, что в самом начале зародыш состоит из одной клетки, которая делится на несколько клеток, подобных друг другу. Однако вскоре возникает специализация, или дифференциация, клеток. Одни клетки, развиваясь, превращаются в позвоночник, другие — в конечности, третьи — в пищеварительный тракт, четвертые — в нервную систему. Хотя все они содержат ту же нуклеиновую кислоту, они развиваются по-разному. Как это происходит?

Мы отмечаем эту избирательную способность клеток, наблюдая заживление раны. Клетки, соседние с ней, каким-то образом «узнают», как расти и размножаться таким образом и в таком направлении, чтобы восстановилась первоначальная структура ткани. Производятся только такие белки, которые отвечают должному образцу и заставляют развиваться нужную структуру.

Очень возможно, что решение этой проблемы состоит в следующем. Нуклеиновая кислота молекулы устроена и расположена так, что эффективность разных ее участков зависит от окружающей среды. В начале развития зародыша эффективны только те участки ДНК, которые производят недифференцированные клетки. Затем присутствие вновь созданных белков так влияет на ДНК, что эффективными становятся другие ее участки и образуется ряд новых белков. Итак, мы видим, что на каждой стадии развития активными становятся разные участки ДНК. В каждой клетке организма человека работает только тот участок ДНК, который отвечает специфическим потребностям данной клетки. Остальные участки поддерживаются неактивными в результате особого химического воздействия окружающей среды; механизм этого воздействия пока очень мало нам известен. Опыты с различными зародышевыми клетками, например,

показали, что при развитии клетки, расположенной там, где из нее должен был бы развиваться хвост, получится голова, если пересадить эту клетку в то место, где должна была бы развиваться голова.

При образовании нового индивидуума порядок чередования нуклеотидов в ДНК не сохраняется в точности прежним. Цепь молекул в ДНК так велика, что небольшие отклонения в разных ее участках не приводят к фундаментальным изменениям в развитии индивидуума, могут возникать только небольшие модификации. Поэтому ни один индивидуум не тождествен другому. Вследствие полового размножения эти модификации смешиваются в каждом новом поколении. В основном дети подобны родителям, но отличаются от них в деталях. Их ДНК — это копия примерно половины ДНК отца и половины ДНК матери. В этом и заключается фундаментальное различие между живыми индивидуумами и атомами. Два атома одного сорта тождественны во всех отношениях — они полностью совпадают по всем своим свойствам. Но два живых существа одного вида никогда не бывают совершенно одинаковыми. Чрезвычайно длинная цепь ДНК дает много возможностей для видоизменений внутри данного вида, и именно это делает жизнь столь захватывающе интересной.

ИСТОЧНИКИ ПИТАНИЯ

Откуда поступает материал, который образует организм человека и заставляет его расти? Для вируса эта задача решается очень просто. Он является паразитом, и его потомство развивается в клетке хозяина. Бактерия более независима; она образует свои аминокислоты и нуклеотиды при помощи специальных белков, но для этого ее нужно поместить в питательный раствор сахара и других веществ. Человек должен есть, чтобы жить и расти. Он ест ткани живых организмов, например овощи и мясо. В этом отношении человек и другие животные менее независимы, чем бактерия. Мы не могли бы жить, питаясь раствором сахара и аммиака, потому что клетки нашего организма не в состоянии синтезировать необходимые аминокислоты. В этом отношении мы

паразиты. Мы должны получать наши аминокислоты и нуклеотиды из другого живого материала. Белки в нашей пище расщепляются в процессе пищеварения в аминокислоты, из которых они состоят. Клетки нашего организма используют их для создания белков, нужных для его роста и химической деятельности.

Что касается наших потребностей в энергии — для работы наших мышц и синтеза белков, — то здесь мы поступаем, как бактерии. В наших клетках тоже есть белки, которые могут использовать энергию, освобождаемую при «сгорании» сахара, и запасать ее малыми порциями в квантовых состояниях молекулы АТФ. Эти молекулы служат носителями энергии в организме человека; они поглощаются мышцами во время сокращения, когда производится работа, или клетками при синтезе новых белков.

Бактерии нуждаются в сахаре, мы нуждаемся в аминокислотах и сахаре. Откуда поступают все эти вещества? И мы, и все другие живые существа, включая бактерии, потребляем сахар, сжигая его в CO_2 и воду. Мы потребляем и аминокислоты: после смерти наш организм разрушается, и содержащиеся в нем аминокислоты распадаются на углерод и другие простые вещества, из которых состоят аминокислоты. И молекулы сахара, и аминокислоты (и нуклеотиды) суть богатые энергией сочетания атомов, т. е. богатые энергией молекулы. Что же поставляет эти молекулы? Должны быть места, где синтезируется сахар, чтобы сделать возможной жизнь, и где создаются аминокислоты. Если бы таких мест не было, живые существа вскоре истощили бы все имеющиеся запасы.

Этот синтез происходит в растениях. Зеленый цвет растений обязан веществу, называемому хлорофиллом, который вместе с ДНК является важнейшей для существования жизни на Земле молекулой. Молекула хлорофилла не так велика, как молекула ДНК, но имеет сложное строение, благодаря которому она способна осуществлять свою важнейшую функцию. При воздействии солнечных лучей хлорофилл поглощает их энергию и восстанавливает богатые энергией молекулы, такие, как сахар, из их «пепла», т. е. из углекислоты и воды. Солнечная энергия превращается в химическую.

Молекулы хлорофилла «работают» в клетках зеленых растений. Растение получает воду из почвы, двуокись углерода из воздуха и энергию от солнечных лучей, падающих на листья.

Сахар содержит меньше кислорода, чем CO_2 и вода. Следовательно, в процессе образования сахара в виде побочного продукта получается кислород. Весь кислород атмосферы был произведен растениями, когда содержащийся в них хлорофилл образовывал сахар. Мы не могли бы дышать, если бы растения не занимались непрерывно производством кислорода.

Молекулы хлорофилла всегда образуются при росте зеленых растений. Клетки растений подобны тем, которые мы здесь описывали, но они еще в большей степени независимы, чем бактерии. Они не только содержат белки, которые производят все необходимые аминокислоты, но создают и хлорофилл, который затем синтезирует сахар при помощи солнечного света. Таким образом, растения живут и развиваются, не нуждаясь в питательном растворе сахара и не «поедая» живой материи. Все, что им нужно, — это свет, двуокись углерода, вода и некоторые неорганические вещества, например аммиак, находящийся в почве. В этом отношении растения — идеальные живые системы. Действительно, растения — это единственная «производящая» живая материя; она сама производит при помощи света все необходимые ей материалы из простых неорганических веществ. Все другие формы жизни следует отнести к «разрушающим». Они нуждаются в богатых энергией веществах, производимых растениями, и используют их для создания собственных структур. Животные и человек наиболее расточительны. Для построения своих клеток они нуждаются не только в таком богатом энергией веществе, как сахар, но и в высокоорганизованном материале — аминокислотах. Человек и животные гораздо выше организованы, чем все другие формы жизни. Особенно мы должны гордиться своей нервной системой, которая координирует восприятие и движение и, наконец, делает возможным мышление.

Что такое жизнь? С нашей точки зрения, это проявление особых молекулярных структур, которые непрерывно воспроизводятся и заставляют другие мо-

лекулярные структуры укладываться в определенную схему, различную для каждого вида живого, но одинаковую в принципе. Атомы могут соединяться в живую материю только при совершенно особых условиях. Температура должна быть достаточно низкой, чтобы тепловое движение не разрушало сложные фабрики макромолекул. Однако она не должна быть и слишком низкой, потому что жизнь возможна только тогда, когда белки и нуклеиновые кислоты сохраняют способность производить химический синтез; для этой деятельности необходимо наличие некоторого теплового движения. Если клеточный материал замерзнет, вся химическая работа остановится. Для синтеза богатых энергией молекул необходим солнечный свет, но его не должно быть слишком много, так как температуры должны оставаться умеренными. У нас на Земле эти условия очевидно выполняются: поверхность нашей планеты богата зелеными растениями и различными странными комбинациями атомов, которые мы называем живыми организмами.

Хотя на многие вопросы развития человека и животных еще нельзя дать ответ, некоторые представления уже можно сформулировать вполне ясно. Каждый вид со всеми своими органами, нервами, костями и мозгом развивается по плану, заложенному в макромолекулах его нуклеиновых кислот. Здесь оказываются тесно связанными атомная физика и жизнь в ее наивысшей форме. Каждый нуклеотид в длинной цепи ДНК находится в точно определенном квантовом состоянии, характеризующем свойства нуклеотида. Специфические нуклеотиды связаны электронами в типичные конфигурации, достаточно устойчивые для поддержания соответствующего порядка в цепи, несмотря на тепловое движение и другие возмущающие эффекты в клетке. На этом порядке основано не только развитие данного индивидуума, но и размножение данного вида. Устойчивость квантовых состояний в ДНК служит гарантией того, что дети в основном повторяют своих родителей, т. е. гарантирует сохранение вида. Различие форм жизни отражает различие в способах расположения нуклеотидов в нуклеиновых кислотах. Постоянство этих форм, их воспроизведение в каждом поколении, отражает устойчивость атомов.

ГЛАВА IX

ЭВОЛЮЦИЯ

ЧТО ПРОИСХОДИЛО ВНАЧАЛЕ?

Изучая природу, как мы это делали в нашей книге, мы неизбежно приходим к вопросу: как произошли вещи? Мы стремимся узнать, как возник наш мир. Вот почему все существующие религии, а также многие философские системы описывают начало мира, а иногда пророчат и его неминуемый конец.

Есть ли какой-нибудь научный ответ на эти вопросы? Как всегда в науке, ответ может быть только частичным. Наши научные познания о природе постоянно растут. Каждое новое научное открытие как-то обогащает их. Но всегда остается множество явлений, которых мы не понимаем. Поэтому, когда мы пытаемся описать то, что происходило очень давно или наступит через много лет, или, наконец, то, что происходит чрезвычайно далеко от нас, наши заключения неизбежно оказываются весьма зыбкими. В частности, рассуждая о материи, находящейся в условиях, очень несходных с земными, мы неизбежно допускаем множество ошибок. Недостаточность наших знаний проявляется при этом значительно острее. Так как мы вынуждены экстраполировать наши сведения и наш опыт, небольшая ошибка или неправильная интерпретация может повести к совершенно ложным заключениям. И тем не менее делать выводы очень заманчиво, и многие ученые пытались нарисовать возможную или вероятную картину прошлого на основе наших нынешних знаний, т. е. пытались рассказать историю того, как мог возникнуть и развиваться мир и как он принял тот вид, какой он имеет сейчас.

Наука есть познание природы, но она предполагает и понимание пределов доступного в настоящее

время. Поэтому нельзя ожидать, что нам удастся создать себе исчерпывающее представление о природе. Например, мы ничего не знаем о настоящем начале природы — если оно вообще существовало. Все что мы можем — это пойти вспять так далеко, как нам позволяют наши нынешние познания, т. е. настолько, насколько мы сможем доверять своим заключениям. Наш рассказ не ответит нам на любой вопрос о начале Вселенной. Мы начнем его с несколько более позднего времени, с периода, когда мир находился в состоянии, о котором мы имеем известную информацию. Самое раннее известное нам состояние вещества — это то, в котором оно находилось в виде разреженного водорода. Наш рассказ будет ограниченным, но тем не менее впечатляющим, так как в нем речь пойдет о развитии материи, о развитии материи от водородной туманности к миру, где есть живые системы.

Среди многих вопросов, на которые сегодня нельзя ответить, один связан с расширением Вселенной. В гл. I мы узнали, что все галактики удаляются от нас. Если это движение происходило таким же образом и раньше, то должен был существовать момент, когда вся материя Вселенной была сосредоточена в одном месте, — «начало» расширения. Мы не знаем, всегда ли расширение оставалось неизменным. Если в прошлом не было изменений, то надо заключить, что 10—20 миллиардов лет назад все галактики находились в весьма малом объеме; концентрация материи тогда должна была быть совершенно необычной. Об этом гипотетическом начале можно сказать очень немного, кроме того, что существовавшие тогда условия весьма резко отличались от всего, нам известного.

Имеется школа ученых, которая отстаивает интересную точку зрения, позволяющую избежать такого аномального состояния. Согласно спекулятивному предположению этих ученых, расширение Вселенной сопровождалось непрерывным созданием материи в пространстве. Предполагается, что, как только при расширении Вселенной между галактиками появляются аномально большие пустоты, в них сразу же образуется материя, которая потом собирается в новые звезды и галактики. Согласно этой гипотезе, количество образовавшейся новой материи как раз

достаточно, чтобы, несмотря на расширение, расстояние между галактиками оставалось примерно одинаковым. Эта интересная идея показывает, что можно по крайней мере представить себе расширяющуюся Вселенную без начала и конца. Не было «нагромождения» галактик много миллиардов лет назад, потому что тогда было меньше галактик; большинство галактик, которые мы видим, было создано в промежутке между кажущимся началом и нынешним временем. И наоборот, не должно быть разрежения галактик в будущем, потому что непрерывно будут создаваться новые галактики. Галактики непрерывно рождаются и разбегаются в бесконечном пространстве. Вот что означает расширение Вселенной согласно этой школе ученых.

Очень мало фактов подкрепляют эту гипотезу, но ничто ей и не противоречит. Конечно, представление о создании материи из ничего противоречит нашим обычным представлениям о сохранении материи и энергии. Однако количество вновь рождающейся материи, необходимой для того, чтобы Вселенная не разрежалась, настолько мало, что его никогда не удастся заметить в лаборатории. Потребовалось бы создание лишь одного водородного атома в год в каждом кубическом километре Вселенной; такое малое количество заметить невозможно.

В настоящее время эти предположения носят чисто спекулятивный характер и не подтверждаются никакими наблюдениями. Возможно, однако, что будущие наблюдения и более глубокое понимание процессов, происходящих в галактиках и между ними, когда-нибудь приведут к появлению более обоснованных представлений о начале и конце мира, основанных на фактах, а не на фантазиях. Несомненно, однако, что спекулятивные идеи о непрерывном создании материи имеют известный интерес, так как из них следует хотя бы логическая возможность существования расширяющейся Вселенной без начала или конца ¹⁾.

¹⁾ Но сама идея о непрерывном возникновении материи из ничего нигде не следует. Задача научной космологии — строить модели мира, согласующиеся с физическими данными, а не противоречащие им, по крайней мере, в принципе. (Прим. перев.)

ЭВОЛЮЦИЯ ЗВЕЗД

Итак, сегодня мы не можем объяснить возникновение и развитие всей Вселенной. Мы слишком мало знаем, как образовались галактики и как они развиваются. Поставим себе более скромную задачу. Мы располагаем достаточными знаниями и достаточной интуицией для описания по крайней мере одного этапа развития — образования материи в том состоянии, в котором мы ее видим на Земле, из разреженного водорода. Наша Галактика, а также все другие галактики заполнены так называемым межзвездным газом, который занимает огромные пространства и состоит почти полностью из водорода. Его так много, что он составляет значительную часть всей массы галактик. О происхождении этого газа нам известно очень мало. Часть его, несомненно, была выброшена во время звездных взрывов, но значительные его количества должны были существовать еще до образования звезд. Отсюда мы начнем наш рассказ; мы хотим показать в нем, как из газообразного водорода возникли все те вещи, которые мы видим вокруг нас и среди которых мы живем.

Однако и здесь необходимо сделать оговорку. Даже эта частичная история Вселенной основана на довольно ненадежных заключениях и теориях, относящихся к поведению материи в весьма необычных условиях. Поэтому многие утверждения, излагаемые в этой главе, весьма гипотетичны и обоснованы гораздо хуже, чем содержание предыдущих глав.

Водородный газ. Начнем с рассмотрения огромного облака газообразного водорода. Большая туманность Ориона — пример такого облака (фото XI). Мы видим ее потому, что она освещена соседними звездами. В таком облаке немного порядка и немного разнообразия. Атомы водорода движутся хаотически, сталкиваясь друг с другом случайным образом.

Облако испытывает медленные изменения под влиянием силы тяжести. Конечно, гравитационное притяжение между водородными атомами крайне мало из-за их малой массы. Но если облако очень велико, то общий гравитационный эффект множества атомов становится важным. За очень долгие периоды

времени случайно происходит сгущение, и возникшее таким способом образование служит более сильным центром притяжения, чем отдельный атом. Поэтому оно притягивает все больше атомов и становится все более сильным центром, который в свою очередь притягивает все новые и новые атомы в занимаемую им область. Наконец, образуется один или несколько сгустков водородных атомов; они становятся все крупнее и крупнее, и их рост не прекращается, пока они не притянут к себе большую часть вещества всей туманности.

Гравитационная сила сближает атомы, так что их сгустки становятся меньше и плотнее. Атомы «падают» к центру притяжения под действием силы тяжести. «Падая», они приобретают скорость; попадая в плотные области, они сталкиваются с другими атомами и передают энергию движения остальному веществу. Таким образом, сжатие сгустков заставляет атомы двигаться все быстрее и быстрее и сталкиваться друг с другом. Гравитационная энергия превращается в энергию беспорядочного теплового движения. Газ в сгустке уплотняется и нагревается.

Первая стадия образования звезд. Гравитационное сжатие увеличивает температуру, и через какое-то время она достигает уровня, при котором энергия, передаваемая при столкновении, превосходит предел устойчивости водородного атома. Тогда атомы переходят в возбужденные квантовые состояния; при возвращении в основные состояния атомы излучают свет. Испускается характеристическое излучение водородного атома. На этой стадии объект становится светящимся — мы видим излучающий газ.

Гравитационное сжатие продолжает действовать и дальше; оно сдавливает атомы все сильнее и вызывает все большее повышение температуры. Наступает момент, когда атомы в центре сгустка сближаются так тесно, что их электронные оболочки начинают мешать друг другу; температура становится столь высокой, что электроны отрываются. Объект начинает излучать огромное количество света, но это уже не чисто водородное излучение — оно содержит свет всех длин волн, испускаемый свободно движущимися электронами и тесно сжатыми атомами. Сгусток

становится настоящей звездой на первой стадии ее развития (рис. 55 и 56).

Вторая стадия образования звезд. Гравитационное сжатие продолжалось бы неограниченно долго, нагревая и уплотняя звезду, если бы не возникал некий новый процесс. Когда температура становится очень высокой, начинаются ядерные процессы. Надо ожидать, что они должны происходить в центре звезды, где температура выше всего. Когда температура звезды становится достаточной для ядерного горения водорода, т. е. примерно достигает 5 миллиардов градусов, начинается вторая стадия в жизни звезды.

Ядерное горение водорода было описано в гл. VII. Напомним, что протоны (ядра атомов водорода) через много времени после того, как они освободились от электронов, сталкиваются друг с другом при высокой температуре и образуют дипротоны, которые становятся дейтронами в результате радиоактивного превращения. Затем пары дейтронов сливаются и образуют ядра гелия (см. рис. 46). Это ядерный пожар, зажженный теплом, развивающимся при сжатии в центре звезды. Он выделяет огромную энергию, и возникающее в центре противодавление останавливает гравитационное сжатие. После этого размер звезды в течение долгого времени остается неизменным.

Горение водорода — процесс медленный, но эффективный. Тепло, выделяющееся при этом пожаре, доходит до поверхности звезды и поддерживает ее свечение. Оно поставляет энергию, необходимую для постоянного испускания света с поверхности звезды в пространство, и сохраняет ее жизнь в течение долгого времени. Проходит несколько миллиардов лет, прежде чем водород в середине звезды истощится и превратится в гелий.

Третья стадия образования звезд. После израсходования большей части водорода в центральной области, горение водорода прекращается, а вместе с ним перестанет действовать и противодавление, уравновешивающее гравитационное сжатие. Снова начнет действовать сила тяжести, что приведет к дальнейшему сжатию. Это всегда связано с повышением температуры, потому что атомы «падают» внутрь звезды и увеличивают свою скорость. Наступает момент, когда

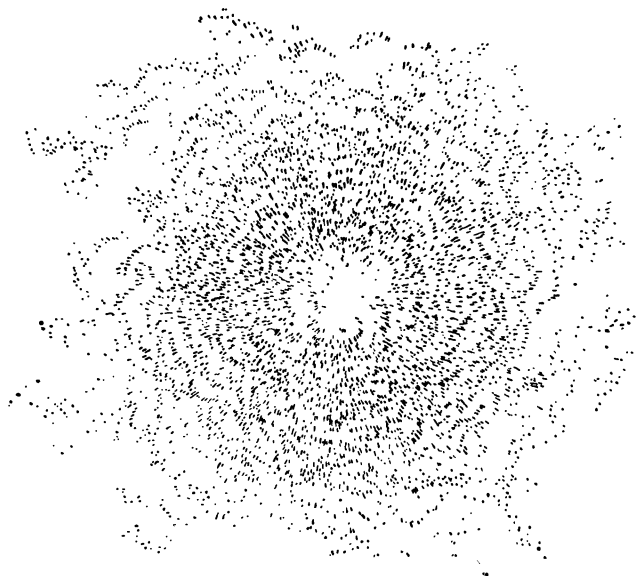


Рис. 55. Облако водородного газа.

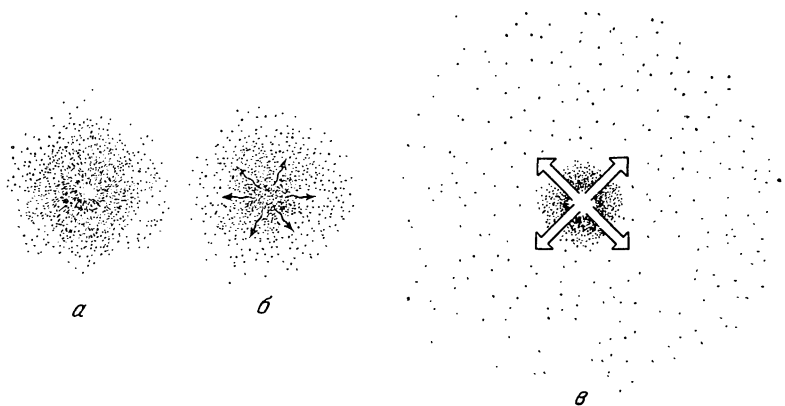


Рис. 56. Первые три стадии образования звезд.

a — газовый водородный шар; *b* — в центре шара происходит горение водорода и развивается противодействие; при этом тепло «вытекает» из центра шара; *в* — красный гигант; горение гелия в центре шара; из центра «вытекает» огромное количество тепла, оно рассеивает окружающее вещество по большой сфере.

в центре достигается температура, примерно равная 100 миллиардам градусов ¹⁾, при которой начинает гореть гелий. Это начало третьего этапа в жизни звезды. Ядерный гелиевый пожар возникает от слияния трех ядер гелия в ядро углерода (см. гл. VII). Гелий горит очень быстро и производит гораздо больше тепла, чем медленное горение водорода. Тепловое давление в центре не только останавливает сжатие, но и заставляет разлетаться остаток вещества звезды. На этой стадии звезда состоит из очень горячего и плотного центра, где идет ядерное горение, окруженного гигантской сферой из очень разреженного материала. Большая часть этого разреженного вещества состоит из водорода, который избежал сгорания на второй стадии, так как не находился в горячем центре. Такие звезды называются красными гигантами; их красный цвет объясняется тем, что большая часть вещества находится так далеко от раскаленного центра, что светится красноватым, а не белым светом, как это было на второй стадии образования звезды.

В стадии красного гиганта развитие звезды идет быстро. Вскоре в центре звезды достигается температура, при которой ядра гелия приходят в тесное соприкосновение с вновь образованными ядрами углерода. При этом возникает новый вид ядерного горения, в результате которого образуется кислород. Его ядро состоит из четырех ядер гелия. Дальнейшее повышение температуры позволяет соединяться пяти, шести и большему числу ядер гелия, давая неон, магний, кремний, серу и т. д.

На этой стадии температура в середине звезды так высока, что ее центр становится как бы печью, производящей элементы. В ней могут образовываться не только соединения ядер гелия, но и ядра других типов. Некоторые из них получаются при столкновении чисто гелиевых по составу ядер с протонами, другие — от присоединения к уже образовавшимся ядрам нейтронов. Нейтроны, пригодные для такого присоединения, испускаются при энергичных ядерных столкновениях, при которых они просто срываются

¹⁾ Достижение такой высокой температуры в звездах сомнительно. (Прим. перев.)

с ядер и движутся в веществе, пока их не захватит другое ядро. Таким способом получаются многие типы ядер; некоторые из них содержат избыток протонов или нейтронов и поэтому радиоактивны. Они превращаются в более устойчивые формы.

Следует помнить, что эти реакции, приводящие к образованию ядер, совершаются только в самом центре звезды. Остальная ее часть слишком холодна для этого. Поэтому вещество звезды в основном состоит из водорода, который служит огромным резервуаром горючего для печи, производящей элементы и находящейся в центре звезды.

Взрыв и возрождение. Мы мало знаем о том, что происходит в звезде, когда третья стадия кончается и ядерный огонь гаснет из-за истощения горючего в центре. Есть много теорий эволюции звезд после третьей стадии. Возможно, что звезда сжимается до очень малых размеров, нагреваясь до сверхвысоких температур и становясь тем, что называют белым карликом. Для наших целей дальнейшее ее развитие не столь интересно, так как оно не приводит к образованию новых элементов. Важно, однако, одно обстоятельство: в конце третьей стадии, когда ядерный пожар догорает, в некоторых звездах, хотя и не во всех, происходит внезапная перестройка вещества, выражающаяся в виде сильнейшего взрыва. Эти взрывы иногда видны, когда какая-либо звезда-гигант внезапно становится исключительно яркой. Такая звезда называется сверхновой. Во время этой вспышки большая часть вещества звезды исторгается в межзвездное пространство и смешивается с исходным водородом. Когда в пространстве, где происходил взрыв сверхновых, снова образуются звезды, входящий в них водород уже не чистый, к нему примешаны следы других элементов, и звезда, развивающаяся из такого газа, уже с самого начала содержит много разных элементов.

Взрыв звезды — сравнительно редкое событие. Вероятно, только несколько процентов звезд проходят через эту стадию сильной перестройки. Тем не менее такие события очень важны, так как ядра, образовавшиеся в центре звезды, распространяются по всему пространству. Они важны и по другой причине:

есть много тяжелых ядер, которые не могут образовываться даже в самых горячих центрах звезд. Таковы, например, золото, свинец, уран. Взрыв звезды создает условия для очень интенсивных ядерных столкновений, при которых могут возникать и сложнейшие ядерные структуры. Поэтому весьма вероятно, что эти тяжелые ядра создавались в процессе взрыва и затем рассеивались во всем мировом пространстве.

Новое, «второе поколение» звезд образовано исходным водородом, в который добавлено вещество, возникшее при взрывах звезд. Развитие звезд второго поколения не сильно отличается от развития звезд первого поколения, так как примесь вещества, отличного от водорода, очень мала. Газ, из которого образуются звезды второго поколения, почти весь состоит из водорода.

Солнце является примером звезды, возникшей из водородного облака, загрязненного остатками взорвавшихся звезд. Оно находится теперь во второй стадии своего развития, так как водород в нем превращается в гелий. Это медленное и постоянное горение водорода поставляет энергию, которую Солнце непрерывно излучает в виде тепла и света уже несколько миллиардов лет. Если бы Солнце образовалось из чистого водородного облака, оно не содержало бы ничего, кроме водорода и гелия. Солнце действительно состоит главным образом из водорода и гелия, но, исследуя свет, излучаемый его поверхностью, мы находим и следы других элементов; наличие этих элементов подтверждает, что Солнце относится к «позднейшему поколению» звезд, что вещество, из которого оно состоит, образовалось в другой, более ранней звезде.

СОЗДАНИЕ ЗЕМЛИ

При образовании Солнца из исходного «загрязненного» водородного облака должны были происходить какие-то особые процессы, в результате которых небольшие клочки материи начали обращаться по орбитам вокруг Солнца. Мы знаем, что Солнце окружено девятью планетами, которые гораздо меньше него (рис. 57). Происхождение этих маленьких клочков материи очень важно для нас, так как мы живем на

одном из них. Мы имеем очень неясные представления о механизме создания этих планет. Один способ их возможного образования таков. При сжатии газового облака и его превращении в звезду остались маленькие кусочки облака. Они уплотнились под действием

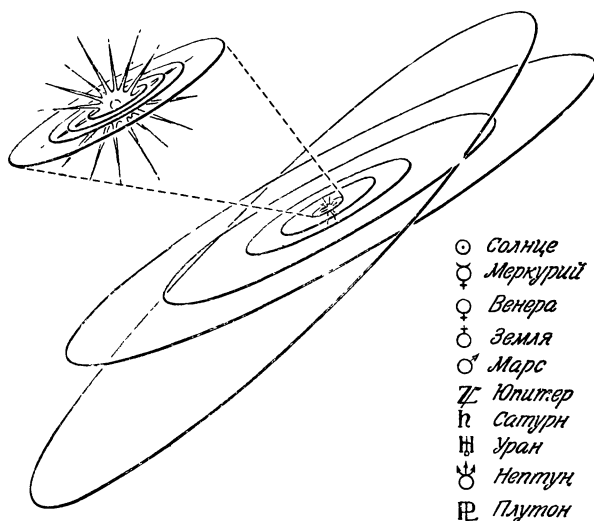


Рис. 57. Орбиты и символы планет.

силы тяготения и образовали сгустки, которые обращаются вокруг Солнца как планеты. Вначале эти сгустки состояли, конечно, из того же материала, что и все остальное, т. е. из водорода, слегка загрязненного более тяжелыми элементами. Когда же они собирались в планеты, началось разделение элементов. Планеты, в особенности самые маленькие, состоят главным образом из более тяжелых элементов и содержат мало водорода и гелия. Это объясняется двумя причинами. Во-первых, тяжелые атомы притягиваются сильнее легких; так как сила притяжения в маленьких сгустках была невелика, легкие элементы, такие, как водород, ускользнули из этого поля тяготения и рассеялись. Во-вторых, вследствие малого размера сгустков их гравитационное сжатие не вызывало сильного нагревания, как в звездах. Поэтому атомы образовали молекулы, и большинство молекул

объединилось в жидкости и твердые тела. Газообразные элементы частично улетучились, а частично образовали газовые слои на поверхности планет — атмосферы. Планеты (в особенности меньшие из них) состоят главным образом из веществ, встречающихся в виде твердых тел (например, железо и горные породы).

Иными словами, при образовании меньших планет, таких, как Земля, большая часть водорода улетучилась и осталось главным образом вещество, примешанное к исходному водороду в результате предыдущего взрыва звезды. Состав нашей Земли обусловлен заражением исходного газового облака солнечной системы. Процесс возникновения Земли освободил большую часть водорода и удержал тяжелые элементы, образовавшиеся в центре какой-то ранее существовавшей звезды. Это не значит, что на Земле совсем не осталось водорода. С нашей планеты улетучился только газообразный водород. Те водородные атомы, которые образовали с другими атомами молекулы жидкостей и твердых тел, остались. Например, множество водородных атомов соединилось с кислородом, давая молекулы воды, и осталось на Земле в виде жидкой воды или льда.

Теперь мы можем набросать историю вещества, составляющего Землю, от его возникновения в чисто водородном облаке до современного состояния.

Исходное водородное облако превратилось в звезды, и по крайней мере одна из них должна была взорваться. Вещество, образовавшееся при взрыве, рассеялось по другим водородным облакам, из которых тоже возникли звезды; одна из них — наше Солнце. Во время образования Солнца малые количества вещества в непосредственной близости от Солнца превратились в сгустки и образовали планеты, которые удержали главным образом тяжелые элементы. Поэтому все, что мы видим вокруг себя — углерод бумаги, графита, карандаша, кремний горных пород, железо инструментов и машин, — пришло из центра взорвавшихся горячих звезд и через миллиарды лет собралось на нашей планете — Земле.

Эти объекты — бумага, горные породы, машины — возникли из простого газообразного водорода, состо-

явшего только из протонов и электронов. Гравитационное сжатие устанавливает в центрах звезд такие условия, при которых протоны втискиваются в конфигурации квантовых состояний атомных ядер, после того как часть протонов в результате радиоактивного процесса превращается в нейтроны. Создаются новые и более дифференцированные единицы — ядра. Они представляют какое-то упорядоченное устройство, в противоположность хаотическому движению в газообразном водороде. Большинство таких единиц образуется во время взрыва звезд.

Позднее, когда ядра изгоняются в холодное пространство, они собирают вокруг себя электроны, которые после этого уже не движутся беспорядочным образом. Эти электроны образуют конфигурации, характерные для тех атомов, вид которых определяется данным ядром. Создается больший порядок, появляется больше специфических единиц — атомов различных элементов. На этой стадии атомы распределены в пространстве беспорядочно. Они представляют только небольшую долю всех атомов газа, беспорядочно движущихся в пространстве. Большая часть этого газа — водород.

Но позднее, когда из него развивается другая звезда, новые атомы отделяются от водорода и собираются в планеты. Благодаря низкой температуре планет происходит дальнейшая дифференциация. Образуются молекулы, которые собираются в жидкости и твердые тела на поверхности планет. Мы видим, как природа спускается здесь по квантовой лестнице, переходя со ступеньки на ступеньку. Она начинает с протонов и нейтронов, образует ядра в центрах звезд, потом атомы в пространстве и, наконец, молекулы и кристаллы на тех немногих планетах, где имеются подходящие температуры.

При этом развитии только небольшая часть водорода превращается в другие элементы. Требуются огромные количества водорода, чтобы создать условия, при которых небольшая его часть объединится в более сложные единицы. Звезды должны собраться, взорваться и вновь собраться для того, чтобы пренебрежимо малая доля исходной материи превратилась в те разнообразные вещества, которые мы видим на Земле.

Сколько времени длилось это развитие? Как мы узнали в гл. II, солнечная система образовалась около 4,5 миллиарда лет назад. Взрыв звезды, при котором освободились различные атомы, должен был произойти раньше; есть указания, что это случилось 7—10 миллиардов лет назад. Длительность жизни звезды считают примерно равной 10 миллиардам лет. Следовательно, первое водородное облако начало образовывать звезды примерно 20 миллиардов лет назад. Потребовалось чрезвычайно много времени и чрезвычайно большое количество материала, чтобы создать вещество нашего мира.

РАЗВИТИЕ ЖИЗНИ

Начала. Мы проследили эволюцию нашего мира от водородного облака до развития звезд с их планетами. Планеты — это собрания вещества в более «прогрессивной» форме, они состоят главным образом из более сложных элементов, чем водород. Земля, например, состоит из множества элементов. В тело Земли входят тяжелые металлы, главным образом железо; наружные ее слои состоят из горных пород и минералов, на поверхности Земли мы видим много воды. Земля окружена слоем газа — атмосферой.

Остальные этапы эволюции нашей планеты происходили под этим защитным слоем газа, на поверхности Земли. Это история дальнейшей дифференциации материи, образования и распространения сложных единиц материи, из которых состоит живой мир на Земле. Любое утверждение о происхождении и ранних стадиях развития жизни может быть только гадательным, так как условия того времени существенно отличались от нынешних.

Рассматривая эту проблему, как и предыдущие проблемы развития звезд и планет, мы находимся в положении исследователей, пытающихся начертить карту неизвестного континента. Их знания отрывочны, они видели только малые участки побережья, наблюдали устья рек и участки их русла в глубине материков. Пытаясь составить карту, они должны были, полагаясь на свое воображение, воспроизвести

неизвестные части побережья и предположить, что наблюдаемые ими устье и отдельные участки реки являются частями одной реки. Это лучшее, что они могут сделать. Позднейшая карта покажет, что они чрезвычайно сильно упростили и исказили картину, и что два водных пространства не принадлежат одной и той же реке. Однако, несмотря на ошибки, в этой карте можно будет узнать в общих чертах контуры материка.

Наши сведения о развитии мира тоже отрывочны. Мы должны прибегать к воображению почти на каждом шагу, чтобы восполнить неизвестное. Многие, из того, что я здесь скажу, позднее, вероятно окажется неверным. Однако есть веские основания полагать, что уже теперь мы правильно представляем себе общий ход событий.

Постараемся увидеть нашу планету такой, какой она была 3 миллиарда лет назад (рис. 58). В целом вид Земли не столь сильно отличался от ее нынешнего вида. Ее орбита вокруг Солнца и ее внутреннее строение были почти такими же, как и теперь. Иной была только поверхность Земли. Были только скалы и вода — ничего больше. Атмосфера содержала азот, двуокись углерода, метан, аммиак, но в ней не было кислорода. Кислород сильно реагирует с большинством веществ и образует стойкие соединения. Следовательно, этот элемент может существовать в атмосфере только в том случае, если он непрерывно воспроизводится в каком-то процессе, освобождающем кислород из химических соединений. В гл. VIII мы показали, что это происходит в настоящее время в хлорофилле зеленых растений, но на ранних стадиях развития Земли растения еще не существовали.

На Землю падает солнечный свет, с которым на нее приходит тепло. Расстояние между Землей и Солнцем таково, что температура на большей части земной поверхности поддерживается в пределах между 0 и 100°С и значительная часть воды может оставаться жидкой. Это обстоятельство имеет чрезвычайно большое значение для дальнейшей истории Земли, так как жидкая вода наилучшим образом «воспринимает» многие химические вещества и позволяет им реагировать друг с другом.

Отсутствие кислорода имело очень важные последствия: ультрафиолетовые лучи от Солнца свободно достигали поверхности Земли, тогда как теперь они



Рис. 58. Первобытная Земля до возникновения на ней жизни.

почти полностью поглощаются кислородом в самых верхних слоях атмосферы. Ультрафиолетовый свет химически активен. Он разрушает химические связи между атомами и позволяет им соединяться другим способом. Он производит таким способом новые химические соединения из старых. Мы можем предполо-

жить поэтому, что солнечное излучение создало много новых, до того не существовавших химических соединений. Среди этих соединений, несомненно, были также молекулы, играющие столь важную роль в живых структурах, как, например, сахар, нуклеотиды и аминокислоты. Их образование должно было протекать очень медленно. Ультрафиолетовым лучам сначала пришлось разложить молекулы, содержащие необходимые атомы; затем случай сблизил эти атомы в положениях, необходимых для образования новых молекул. Простые структуры должны были возникать чаще сложных, потому что гораздо вероятнее сблизиться в правильном положении несколькими атомам, чем большему их числу. Спирты и сахар были образованы солнечным светом во много больших количествах, чем аминокислоты и нуклеотиды.

Образование новых соединений шло очень медленно, но за много миллионов лет эти вещества накопились. Возникнув на поверхности воды, они спускались в нижние слои и были там защищены от разложения ультрафиолетовыми лучами. В настоящее время такое накопление было бы невозможным, так как аминокислоты и нуклеотиды быстро поглотились бы живыми организмами или разложились бы от окисления свободным кислородом атмосферы. Только стерильные условия ранних периодов эволюции допускали медленное накопление этих веществ. Случилось так, что в водах Земли постепенно начали появляться небольшие количества сахара и аналогичных соединений и еще меньшие количества аминокислот и нуклеотидов.

В больших океанах эти молекулы оказывались очень далеко друг от друга. Но в малых прудах и в небольших водоемах их концентрация могла становиться уже заметной. Некоторые нуклеотиды могли даже соединяться и образовывать небольшую цепь нуклеиновой кислоты, а некоторые аминокислоты — соединяться в белковую цепь. Небольшие водоемы могли поэтому содержать короткие цепи нуклеиновых кислот и белков. Однако цепи, образованные при случайных соединениях, отличны от тех, которые нужны для жизни. Эти цепи не имеют особого значения и не обладают особой химической активностью.

Один раз мог образоваться один белок, другой раз — иной.

Нуклеиновые кислоты, образованные случайным соединением нуклеотидов, имели большее значение. Мы видели в гл. VIII, что цепь нуклеиновой кислоты типа ДНК может точно воспроизводиться, расщепляясь на две половинки, причем каждая из этих половинок потом собирает нуклеотиды, необходимые для построения двух одинаковых полных цепей. Таким образом, если цепочка нуклеиновой кислоты помещена в среду, содержащую нуклеотиды, в среде возникает все больше и больше повторений цепи, пока весь запас нуклеотидов не истощится. Если случайное сближение образовало одну цепь, она заставит все нуклеотиды в своей окрестности соединяться подобным же способом. Нуклеиновые кислоты способны производить свои повторения, если около них имеются нуклеотиды. Во многих отношениях этот процесс и есть основа жизни, потому что он позволяет сложным структурам воспроизводиться в благоприятных условиях.

Нуклеиновые кислоты могут делать больше, чем просто воспроизводиться. В гл. VIII мы узнали, что они служат шаблонами, по которым строятся аминокислоты, строятся в определенном порядке, нужном для образования белков. Вероятно, каждая цепь нуклеиновой кислоты (или винтовая лестница типа ДНК) служит как бы формой для одного или нескольких белков. Поэтому, если в жидкости, где есть и аминокислоты, присутствует нуклеиновая кислота, она заставит аминокислоты соединяться в белковые цепи; будут получаться те белки, для которых данная нуклеиновая кислота служит как бы шаблоном.

Поэтому, согласно нашим представлениям, когда бы нуклеотиды ни соединялись в луже воды в цепь нуклеиновой кислоты, эта цепь не только воспроизводилась, но и вызывала образование некоторых белков. Все нуклеотиды и аминокислоты в окрестности расходовались, превращаясь в нуклеиновые кислоты и белки того типа, который определялся первой случайно образовавшейся нуклеиновой кислотой.

Этот процесс должен был идти очень медленно по двум причинам. Во-первых, аминокислот и нуклеотидов было мало и они были очень далеки друг от друга в воде. Большая часть молекул, образованных ультрафиолетовым светом, оказались простыми, такими, как сахар и алкоголь, и не годились для образования нуклеиновых кислот или белков. Во-вторых, для построения цепей нужна была энергия. А на этой примитивной стадии была только тепловая энергия или энергия излучения, и ни одна из них не была достаточно эффективной для этих цепей. Тем не менее в течение миллионов лет, прошедших между образованием планеты и возникновением жизни, нуклеиновая кислота воспроизводилась много раз.

ИГРА СЛУЧАЯ

Представим себе, что произошло, когда одна из этих случайных встреч произвела особую нуклеиновую кислоту, являющуюся шаблоном для тех белков, которые делают нуклеотиды из сахара и аммиака. Тогда воспроизводство копий сильно ускорилося, потому что образовавшиеся белки должны были использовать весь имеющийся сахар и аммиак и синтезировать из них гораздо больше нуклеотидов для новых повторений нуклеиновой кислоты. Водный резервуар, в котором это случилось, должен был стать гораздо богаче нуклеиновыми кислотами, чем другие водные резервуары.

Такой водный резервуар должен был отличаться и в других отношениях от прочих. В нем было больше нуклеотидов, и случайные комбинации нуклеиновых кислот осуществлялись в нем гораздо чаще, и, что еще важнее, та особая нуклеиновая кислота (шаблон для производящего нуклеотиды белка) время от времени присоединяла новые нуклеотиды к своей цепи. Такое удлинение не оставалось единичным актом, а воспроизводилось затем в каждом повторении нуклеиновой кислоты. Добавления к цепи были делом случая и поэтому не давали, как правило, шаблонов для нужных белков. Но в течение многих лет могло случиться так, что в одной избранной луже воды образовалась более длинная нуклеиновая кислота,

такая, которая была способна производить более чем один «полезный» белок.

На этой стадии развития полезными были следующие белки:

а) производящий нуклеотиды из сахара, фосфата и аммиака;

б) производящий аминокислоты из сахара, фосфата и аммиака;

в) «сжигающий» молекулы сахара, т. е. способный передать энергию, содержащуюся в сахаре, тем носителям энергии, которые мы встретили в гл. VIII под именем АТФ;

г) служащий оболочкой, или «шубой», нуклеиновой кислоты; оболочка эта имеет маленькие поры, которые могут пропускать внутрь небольшие молекулы и не пропускают наружу большие;

д) образующий специальные молекулы, способные синтезировать сахар с помощью солнечного света (например, хлорофилл¹⁾).

Обсудим теперь действие этих полезных белков. Мы уже описали важную роль белка а) для образования нуклеиновых кислот. Белок б) должен усиливать приток аминокислот, медленный процесс, ранее обусловленный только действием ультрафиолетовых лучей. Вклад белка б) должен, очевидно, ускорить процесс образования всех видов белков, если имеется шаблон в виде нуклеиновой кислоты.

Белок в) ускоряет процесс образования цепей, так как он дает нужные носители энергии, помогающие присоединять одну молекулу к другой в цепи. До того, как появились эти носители энергии (АТФ), энергия, необходимая для сочленения цепей, поставлялась теплом, а при этом цепи строятся с трудом и очень медленно.

Белок г) выполняет самое ответственное задание. До образования этого белка сама вода в большей или меньшей степени действует, как одно целое. При размножении нуклеиновой кислоты используется весь имеющийся запас нуклеотидов.

¹⁾ Мы упростили положение, изображая его так, как если бы в каждом случае достаточно было только одного белка. В действительности для этих целей нужна целая система из нескольких специальных белков, но здесь важна общая идея.

Например, в том счастливом водоеме, где образовались белки, производящие нуклеотиды, эти последние будут способствовать размножению всех видов нуклеиновых кислот, а не специально той, которая является шаблоном для белков, ответственных за ее образование. Эта особая нуклеиновая кислота в целом водоеме не сможет использовать свое преимущество — создавать эти белки — по сравнению с другими нуклеиновыми кислотами. Все нуклеиновые кислоты будут размножаться и потреблять сырье. Но если наша особая эффективная нуклеиновая кислота способна произвести и оболочку, продуктивный белок и образованные им нуклеотиды держатся вместе, так что они становятся доступными только данной нуклеиновой кислоте. Тогда только она сможет произвести много повторений и будет развиваться гораздо быстрее других. Последние не только будут лишены растущего притока нуклеотидов, но, кроме того, этот приток будет наибольшим как раз там, где строительные материалы находятся ближе всего к месту «потребления».

Жизнь начала существовать после того, как нуклеиновые кислоты смогли производить белки типов а), б), в), г). Здесь мы уже имеем нечто, похожее на бактериальную клетку. Когда такая единица появилась в луже воды, которая содержала сахар и некоторые простые химические вещества, она действительно стала жить. Аминокислоты и нуклеотиды производились в ней самой: первые складывались в нужные белки с помощью нуклеиновой кислоты, служившей шаблоном, нуклеотиды использовались при воспроизведении нуклеиновой кислоты. Когда эта единица стала слишком большой, она разорвалась, и каждая нуклеиновая кислота образовала свою новую единицу. Этот разрыв и переформирование могли быть первым и простейшим способом деления клеток. То был довольно расточительный способ, так как многие вещества при этом терялись. Теперь у клеток существует гораздо лучший способ деления — без потери вещества.

Но даже и такая усовершенствованная химическая единица не могла бы вечно размножаться, так как она «питалась» простейшими химическими

веществами, такими, как сахар, фосфат и аммиак. На Земле нет недостатка в аммиаке и фосфатах. Это простые соединения с малой энергией, и их количество достаточно велико. Но возможности получения сахара были ограниченными. Сахар, химическое соединение с большой энергией, производился только ультрафиолетовыми лучами Солнца, и притом в малых количествах. Когда образовавшийся в воде сахар истощался, живые единицы не могли больше размножаться. Одни разрушались внешними причинами, такими, как столкновения, действие избыточной радиации, или от потери белков в примитивном процессе деления и т. д. Не возмещаясь, они должны были вымирать.

Отсюда ясно, почему белок д) имеет такое огромное значение. Нуклеиновая кислота, которая в добавление к белкам а)—г) может производить и белок д), находится в весьма привилегированном положении: живая единица, содержащая эту кислоту, не зависит больше от сахара, находящегося в воде. Такая живая единица производит собственный сахар с помощью обычного (не ультрафиолетового) солнечного света как источника энергии и нуждается для этого только в очень простых химических веществах с малой энергией, таких, как вода и углекислота.

Важно понять, что все пять типов белков только ускоряют естественные процессы. Например, белки а) и б) производят из более простых веществ те же белки и аминокислоты, которые уже образовывались в воде, но без этих белков процесс шел с гораздо меньшей скоростью. Белок в) доставляет энергию в «готовой расфасовке», но энергия была и раньше, только в форме тепла, форме очень неэффективной. Белок г) образует небольшое собственное тело из воды для каждой нуклеиновой кислоты и этим колоссально ускоряет химические реакции. Белок д) создает вещество, которое, используя весь солнечный свет, производит сахар гораздо продуктивнее, чем это делалось с помощью ультрафиолетовых лучей. Таким образом, белки — это исключительно действенные катализаторы естественных процессов.

Эволюция жизни. Теперь мы достигли момента, когда природа готова к бурному развитию. Подведем

итог. В некоторых местах на Земле возникли определенные комбинации цепных молекул. Эти комбинации обладают замечательным свойством воспроизводить самих себя, если есть сырой материал в виде простых молекул. Это воспроизведение осуществляется с помощью специальной цепной молекулы — нуклеиновой кислоты. Действительно, только нуклеиновая кислота воспроизводит самое себя. Каждое новое повторение этой молекулы вызывает образование тех же белков и создает вновь те же единицы.

Однажды возникнув, такие комбинации должны накапливаться в больших количествах. В частности, быстро размножаться будут те комбинации, которые, воспроизводясь, эффективно используют как сырой материал простые химические соединения, потому что этого сырья много на Земле.

Дальнейшее развитие основано на взаимодействии двух факторов. Один — это самовоспроизведение единиц, другой называется «мутацией» строения нуклеиновой кислоты. Мы называем «мутацией» следующее явление: в процессе самовоспроизведения нуклеиновая кислота обязательно в отдельных случаях не повторяет себя в точности, время от времени происходят изменения.

Надо ожидать двояких изменений. Во-первых, в процессе повторения происходят ошибки. Новая нуклеиновая кислота не точно такая же, как старая. Если новая форма оказывается неспособной производить необходимые белки, единица, в которой произошло изменение, больше не способна развиваться. Если же, несмотря на изменение, новая форма нуклеиновой кислоты тоже производит необходимые белки, изменение будет повторяться дальше в каждом воспроизведении и с этого момента сохранится в потомстве.

Во-вторых, нуклеиновая кислота может добавлять к себе новые группы нуклеотидов и увеличивать тем самым свою длину. Несомненно, что цепи первых нуклеиновых кислот были очень коротки, они служили шаблонами только для немногих белков. Когда случайно добавлялись новые нуклеотиды, эти добавки воспроизводились в повторениях. В большинстве случаев они были бесполезны для произ-

водства белков. Но за долгие периоды время от времени должно было случаться так, что получались лучшие белки или что от удлинения нуклеиновой кислоты образовывались новые белки, позволявшие более эффективно использовать сырые материалы для воспроизведения. Когда это происходило, новый тип единиц быстро замещал старый, так как он быстрее размножался и употреблял для этого весь имевшийся материал¹⁾.

Может случиться и так, что новые белки позволят единице размножаться при других внешних условиях. Например, старая единица лучше всего размножалась в теплой воде, а новая будет размножаться в более холодной, или старая — в более глубоких слоях воды, а новая — в более мелких вблизи берегов. Тогда новые типы не вытеснят старые, а населят области Земли, где существуют новые условия.

Здесь мы видим процесс естественного отбора. Он с необходимостью вступает в игру, когда определенные единицы обладают способностью самовоспроизведения и когда программа, ими управляющая, испытывает случайные изменения. Оба эти фактора, самовоспроизведение и мутация, работают рука об руку. Если мутации не влияют на воспроизведение, ничего особенного не происходит, изменения только передаются по наследству. Если мутации таковы, что уменьшают размножение, то пораженные единицы вымрут, а если мутации благоприятствуют размножению, — заменят старые единицы. Так идет

¹⁾ Существует процесс, в котором получают более длинные цепи нуклеиновых кислот. Вероятно, он происходит часто при воспроизведении. Копия не отделяется полностью от исходного оригинала: концы остаются связанными. Так получается цепь двойной длины. Новая цепь не может производить белки нового типа: получают те же белки, но в двойном количестве. Такая удвоенная цепь подвергается меньшей опасности при дальнейшем повторении: если где-либо в одной половине происходит изменение, другая половина остается нетронутой и может производить необходимые белки. Изменения могут быть переданы в этом случае следующим поколениям, а не будь удвоения, они были бы смертельны для этого белка. После нескольких таких мутаций удвоенная цепь станет способна производить новые белки в добавление к тем, которые производила исходная цепь.

медленное развитие к единицам, лучше приспособленным к размножению в существующих условиях.

Есть характерная тенденция в этом развитии — единицы становятся все сложнее. Они теряют простые черты, которые были в начале истории их

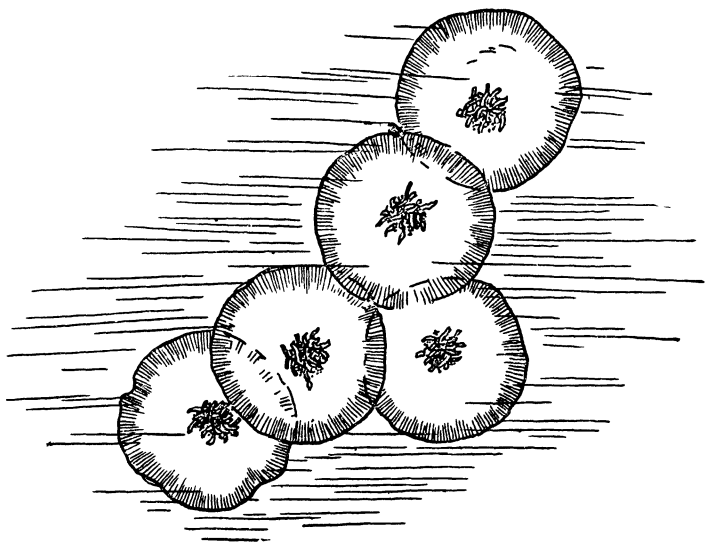


Рис. 59. Старейшая из известных форм жизни, существовавшая около 1600 миллионов лет назад. Она несколько напоминает водоросль.

жизни. Большинство изменений происходит в сторону большей дифференциации, к более длинным цепям нуклеиновых кислот, производящим больше белков для специализированных целей. Поэтому с того момента, как возникают единицы, способные самовоспроизводиться, развитие идет в сторону более и более сложных единиц. Лучшее приспособление к внешним условиям почти всегда ведет к более сложным единицам.

Это развитие во многом напоминает развитие наших автомобилей. Каждый год конструкторы пытаются улучшить автомобили путем небольших добавок здесь и там. Машина становится все сложнее. Несомненно, что можно делать гораздо лучшие и

менее сложные машины, но только если перепроектировать их совсем заново. Можно перепроектировать автомобиль, но природа не может сделать этого в отношении процесса естественного развития и отбора. В природе может происходить развитие только путем накопления малых изменений здесь и там, за счет изменения программы в нуклеиновых кислотах. Природа не может начать заново с наброска. Она может только прибавить что-то к предыдущему развитию. Поэтому прогресс в природе почти всегда достигается путем перехода к более сложным формам.

Этот механизм обладает воистину замечательным свойством. Он дает возможность природе совершенствоваться, «строить» все более и более сложные структуры, и притом «естественным» путем, без нарушения каких-либо законов физики и химии и без обращения к заранее установленному плану. Этот процесс тем более замечателен, что в неорганическом мире мы чаще всего замечаем противоположную тенденцию: сложные структуры распадаются на более простые, порядок всегда превращается в беспорядок. Процесс построения возможен только благодаря явлению самовоспроизводства. Он автоматически умножает более сложные структуры тогда и только тогда, когда они лучше приспособлены к окружению¹⁾.

Посмотрим теперь, как шло развитие за счет естественного отбора. Начнем с зачаточной клетки растения; она содержит необходимые белки, делающие аминокислоты и нуклеотиды из сахара, фосфатов и аммиака, и хлорофилл, производящий сахар с помощью солнечного света. Важнее всего, что клетка содержит нуклеиновую кислоту, которая действует, как шаблон для производства всех белков.

¹⁾ Эта тенденция к усложнению в живых структурах не противоречит всеобщему закону термодинамики, который гласит, что полная энтропия (мера беспорядка) постоянно увеличивается. Увеличение «порядка» в живых структурах всегда сопровождается уменьшением порядка в окружающей физической среде. Это равновесие исключительно важно для построения органических молекул в растениях, в котором участвует солнечный свет. Для создания каждой молекулы должно поглотиться известное количество световой энергии. Оно образовалось за счет большой потери «порядка» в веществе Солнца, испускающего свет.

В процессе дальнейшего развития мутации добавляют все новые звенья к нуклеиновой кислоте. Она становится шаблоном для белков клетки с более сложной структурой, более совершенной и лучше организованной, чем зачаточная клетка. И в самом деле, процесс клеточного деления становится гораздо лучше организованным, так что никакие из веществ клетки не теряются в процессе деления. В процессе эволюции был достигнут высокоорганизованный процесс деления, управляемый соответствующими белками.

Но рост здесь не остановился. Очевидно, могут быть достигнуты еще больший рост и размножение, если большее число клеток действует вместе, как одна многоклеточная единица. Такая единица работает производительнее, поскольку функции распределены между различными клетками. Одни клетки могут служить остовом, другие — собирать сырые материалы из воды или почвы, наконец, третьи растут лучше всего там, где сильнее всего солнечный свет, и производят сахар. В результате добавки одного усложнения к другому развились такие живые единицы, как наши современные растения, состоящие из миллионов клеток, приспособленных для многих различных целей. И тогда зеленый ковер растительной жизни покрыл Землю (рис. 60).

Когда образовалось это растительное покрывало, установились новые возможности для жизни. Изменилось два существенных обстоятельства. Во-первых, стало сколько угодно сахара, нуклеотидов и аминокислот в растениях и запас всего этого возобновлялся при размножении. Во-вторых, производство сахара в хлорофилле освободило огромное количество кислорода. Атмосфера Земли постепенно наполнилась кислородом, и он остался в ней, потому что потери от окисления и других химических реакций постоянно восполнялись.

Посмотрим теперь, как действовали эти два важных изменения. До распространения растительной жизни каждой живой единице полезнее всего было содержать хлорофилл, чтобы производить собственный сахар. Пока сахар малоэффективным способом получался на Земле от ультрафиолетовых

лучей, его было очень мало. После того, как растения распространились по Земле, его стало в растениях сколько угодно. То же самое верно и для более сложных структур, таких, как аминокислоты и нуклеотиды. Их было очень мало до распространения растений, но потом поверхность Земли покрылась ими.



Рис. 60. Зеленый ковер растений покрыл Землю.

На этой стадии развития могли появиться живые существа, неспособные производить собственный сахар или аминокислоты. Они легко могли развиваться, «поедая» эти вещества из растений. Этот факт имел интереснейшие последствия. До появления растительного покрова каждая мутация, нарушавшая способность нуклеиновых кислот производить аминокислоты и хлорофилл, делала невозможным размножение той живой единицы, в которой эта мутация произошла, и единица погибала. Но когда возникла растительность, такие изменения перестали быть опасными: можно было размножаться, потребляя растительную пищу. Поэтому многие мутации, которые раньше привели бы к вымиранию, теперь смогли

закрепиться и стали воспроизводиться. Вот почему вслед за растительностью развились новые виды живых организмов, мы называем их животными. Освобожденные от необходимости производить основные химические вещества, такие, как аминокислоты, нуклеотиды и хлорофилл, эти новые живые единицы стали развивать свою собственную программу в нуклеиновых кислотах в новых направлениях.

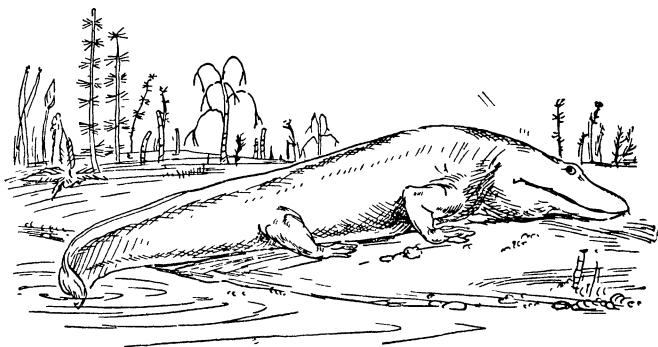


Рис. 61. Реконструкция маленькой пенсильванской амфибии (дипловертебрана).

Возникли и многоклеточные единицы с различными функциями разных клеток, такими, как передвижение или чувствительность к свету и звуку. Такие единицы смогли двигаться, видеть и слышать.

Надо помнить, как медленно происходило это развитие. Оно длилось один или два миллиарда лет. Изменения происходили от того, что накапливались действия мутаций. Проходит много времени, прежде чем случайное изменение или прирост нуклеиновой кислоты приводит к полезному варианту программы. Возник, однако, новый и более эффективный способ развития, когда объединялись две единицы и использовалось смешение их нуклеиновых кислот при повторении. Эта система, половое размножение, имеет огромное преимущество, суммируя новые успешные тенденции, имеющиеся у каждого индивидуума. Оно ускоряет развитие форм, приспособленных лучше. Вот почему это самый распространенный способ

воспроизведения для наиболее сложно организованных единиц.

Очень важный факт в эволюции живых структур — это ненаследование свойств, приобретенных отдельным индивидуумом. Изменение в строении тела, которое претерпевает отдельное существо, никогда не передается потомству. Можно отрезать хвосты всем представителям некоторой породы животных и продолжать отрезать хвосты их потомкам, и все же у новорожденных будут хвосты. Причина очевидна. Изменение в строении тела не действует на нуклеиновые кислоты в клетках, которые содержат проект новых индивидуумов. Пока хвост имеется в плане, он будет развиваться у потомков, независимо от того, что случилось с хвостом родителей.

Вернемся теперь ко второму изменению на Земле, произведенному растительным покровом, а именно к кислороду в атмосфере. Вспомним, что образование белков и нуклеиновых кислот требует энергии. Энергия поставляется специальными белками, которые регулируют процесс превращения (сгорание) сахара в двуокись углерода и воду и могут запастись энергией в виде малых порций в молекулах АТФ. Сгорание сахара без должного количества кислорода затруднено. Атомы кислорода содержатся в самой молекуле сахара, они могут быть использованы при горении. Этот тип горения, который использует сам сахар, называется ферментацией; он не является эффективным способом получения энергии от сахара. Когда появился свободный кислород в атмосфере, стало гораздо легче сжигать сахар в клетке и запасать энергию в молекулах АТФ. Возникли новые единицы, которые использовали атмосферный кислород, производя энергию. Это привело не только к более быстрому росту клеток, но и создало избыток энергии, который мог быть использован в движущихся частях живой единицы. Развились мускулы, они дали возможность конечностям двигаться, совершая работу по передвижению и собиранию пищи.

В таких больших многоклеточных единицах, которые мы называем животными, воздух не может легко проникать через клетки тела. Поэтому следующее изменение в программе привело к существам,

приспособленным гораздо лучше: развилась система артерий, по которым сквозь тело прокачивается жидкость, содержащая специальные красные кровяные клетки. Эти клетки легко поглощают кислород и переносят его во все клетки тела, нуждающиеся в нем для производства энергии. Поглощение кислорода происходит в определенных клетках — в легких, которые постоянно наполняются свежим воздухом. Такие животные с системой кровообращения смогли пользоваться кислородом для выработки энергии гораздо эффективнее.

Но наибольший шаг вперед в этом стремлении к лучшему согласованию со средой состоял в образовании нервной системы. Это особая комбинация взаимосвязанных клеток, способных передавать стимулы от одной части живого существа к другой. С помощью этих специальных клеток, органов чувств, через соединительные нейроны можно заставить мускулы координировать передвижение со световыми или звуковыми сигналами, получаемыми существом. В результате существо может многими способами реагировать на изменения в среде так, чтобы пользоваться этим при самозащите и добывании пищи. Структура может передвигаться в сторону света, различать пищу по запаху и форме, избегать опасности, уходя или защищаясь, когда приближаются крупные объекты. Существо приобретает то, что мы называем «поведением».

Развитие нервной системы было столь полезным и успешным, что любая мутация или комбинация при скрещивании, ведущая к увеличению нервной системы, давала все лучшие существа. Так началась непрерывная эволюция в сторону увеличения нервных клеток, которая и привела к образованию мозга. Этот орган является скоплением большого числа взаимосвязанных нервных клеток, способных к накоплению стимулов, полученных существом. Это накопление было началом того, что называется памятью. Действие, которое первоначально имело хороший результат в отношении захвата пищи или предупреждения боли, сохраняется в памяти и может быть легко повторено в сходных обстоятельствах. Очевидно, что способность «вспоминать» такие ситуа-

ции была огромным усовершенствованием живых единиц и помогала в их борьбе за выживание в трудных условиях. Память дала возможность учиться на опыте.

Такая память и способность к обучению не обязательно должны быть очень сложными. С помощью современного электронного оборудования можно легко построить машину с «нервной системой», которая помнит прошлые положения и определяет на этом основании свои действия. Система взаимосвязанных нервных клеток во многом равноценна системе электронных ламп или транзисторов. Система с несколькими тысячами ламп может выполнять весьма впечатляющие действия по запоминанию положений с тем, чтобы избегать их в дальнейшем. Но в действительности даже мозг насекомого устроен гораздо сложнее. Он содержит от десяти до ста тысяч нервных клеток. Человеческий мозг имеет их много миллиардов.

Факт образования мозга был чрезвычайно важным в развитии жизни. До этого живая единица и ее реакции на окружающий мир полностью определялись химическим строением. После того как образовался мозг, реакции индивида стали зависеть не только от его строения, но и от предыдущего опыта. Поведение стало определяться не только программой, заложенной в нуклеиновых кислотах, но и тем, что данное существо испытало в течение жизни. Индивидуальная единица формировалась не только в результате своего биологического развития из нуклеиновых кислот, но и под действием окружающей среды на ее поведение.

В ходе развития мозга роль памяти и приобретенного опыта постепенно становилась все важнее. Нервы не только передают стимулы от одной части тела к другой: если они связаны надлежащим образом, они могут и запасать информацию и превращать ее в понятия, которые в дальнейшем вызывают новые действия. Огромное преимущество этого механизма служит высшей наградой за развитие сложных совокупностей нервных клеток. Нуклеиновые кислоты, цепи которых стимулировали рост таких скоплений нервных клеток, привели к развитию преуспевающих

живых существ. Так животные распространились по Земле.

Но надо помнить, что поведение, основанное на обучении и памяти, составляет только весьма малую часть всей системы поведения. Большая часть программы поведения примитивных животных предопределена, так как она развивается на основе программы, заложенной в нуклеиновых кислотах. Мы говорим, что поведение унаследовано. Птицы строят свои гнезда, вскармливают птенцов и перелетают зимой на юг по инстинкту. Эти формы поведения не выученные: они врожденные. Нервные комплексы, стимулирующие эти действия, формируются уже в растущем теле. Реакции, приобретенные обучением, малочисленны. Птицы обучаются некоторым видам щебетания, некоторые высшие животные научаются охотничьим уловкам. Но важнейшие реакции животных врожденные, это доказывается способностью большинства видов новорожденных животных вести в дальнейшем обычную жизнь без всякого контакта с себе подобными. Поэтому как строение тела, так и общественное поведение каждого индивидуума заложены в коде (программе) клетки. Вид и поведение предопределены в нуклеиновой кислоте. Они повторяются в каждом новом поколении и меняются только под влиянием мутации. Поведение меняется так же медленно, как строение тела. Муравьи и пчелы имеют одну и ту же общественную структуру столь же долго, как они существуют в качестве данных видов, и это распространяется на многие тысячи поколений. То же относится и к высшим животным.

Эволюция человека. В нашем рассказе об эволюции мы достигли точки, от которой начало развиваться нечто новое, возникшее от простого возрастания числа нервных клеток, составляющих нервную систему. Но в материальном мире часто бывает, что возрастание количества в некоторый момент приводит к глубоким качественным изменениям.

Рассмотрим пример этого перехода количества в качество. В замкнутой комнате помещен открытый сосуд с водой. Если температура ниже точки кипения, достигается равновесие, при котором с поверхности воды в секунду испаряется известное количество

молекул и то же количество возвращается из пара и конденсируется на поверхности. Вода в сосуде по виду остается неизменной, находясь в равновесии с влажным воздухом. Когда мы повышаем температуру, но держим ее все еще ниже точки кипения, происходит только количественное изменение. Увеличивается только число молекул, уходящих с поверхности и приходящих в сосуд. Но если число испаряющихся и конденсирующихся молекул продолжает возрастать, то достигается точка, в которой число возвращающихся молекул больше не уравнивает числа молекул, покидающих поверхность. Достигается температура, при которой конденсация не возмещает испарения, и вода полностью превращается в пар, иначе говоря, она выкипает. Наблюдатель увидит, что с водой нечто произошло. На самом деле это не так: испарение имело место и при более низких температурах. Решающим было изменение в соотношении между водой и окружающим воздухом. В точке кипения молекулы воды, приходящие из воздуха, не могут больше скомпенсировать молекулы, уходящие в воздух от испарения; то, что было «безвредным» для воды ниже точки кипения, «уничтожило» ее выше этой точки.

То же явление можно усмотреть и в водном растворе соли. Если концентрация соли ниже точки насыщения, то раствор выглядит прозрачным и осадок не образуется. На самом деле молекулы соли ударяются о стенки сосуда и образуют очень маленькие скопления, но этот осадок немедленно растворяется вновь. Если концентрация раствора увеличивается выше точки насыщения (например, путем выпаривания раствора), то скорость образования осадка становится больше скорости растворения, на стенках начинают образовываться красивые узоры из кристаллов. Наблюдателю снова может показаться, что раствор в этой точке приобрел способность создавать кристаллические структуры. На самом же деле это чисто количественное соотношение между отложением и растворением.

Вернемся теперь к эволюции нервной системы животных. Мы знаем, что нервная система позволяет животным приспосабливаться к окружению с

помощью органов чувств и памяти. Как известно, животные «научаются» на опыте, и эта способность к обучению есть один из важных критериев выживания. Но большая часть поведения животных основана на «инстинктах», т. е. на биологическом наследовании.

Когда из животного царства развился человек, должно было произойти нечто новое. Мы утверждаем, что этот новый элемент полностью основывался на количественной разнице между нервными системами. Увеличивая нервную систему, природа установила новый тип эволюции, который сломал и ломает все правила эволюции предыдущих периодов.

В животном мире присутствуют все элементы новой эволюции: память, обучение и, может быть, даже образование идей и понятий. Но, как и в соляном растворе ниже точки конденсации, они слишком слабы, чтобы иметь конструктивное значение. Попытки «обучения» в животном мире в большинстве случаев «растворяются» после смерти индивидуума. Когда развился человек, постоянное усложнение мозга и нервной системы достигло уровня, при котором смерть индивидуума больше не искореняет приобретений, полученных его памятью из опыта. Далее, индивидуум становится способным применять свой мозг, чтобы делать умозаключения из опыта, выводить следствия из поступков, не совершая их. Он может думать, что произойдет при известных условиях, и соответственно организовывать свои действия. Развитие языка и памяти позволило взрослому индивидууму сообщать молодому свой опыт и свое мнение, и ученик смог действовать так, как если бы это был его собственный опыт или его собственное суждение. Действия мозга усложнились настолько, что стал возможным коллективный опыт и общее мышление многих индивидуумов, и произошло накопление опыта и мыслей от поколения к поколению. Это стало возможным благодаря развитию понятий, логических построений, абстрактных идей и многих других способов формулирования и передачи мысли, таких, как письменность и рисование (рис. 62). Разница между человеком и животным аналогична различию между кипением и насыщением. После того, как опыт, накопленный видом как одним

целым, становится больше, чем опыт, теряемый со смертью отдельных индивидуумов, начинается новый процесс — образование «традиции».

В этот момент эволюция преодолела барьер, препятствующий наследованию приобретенных свойств.

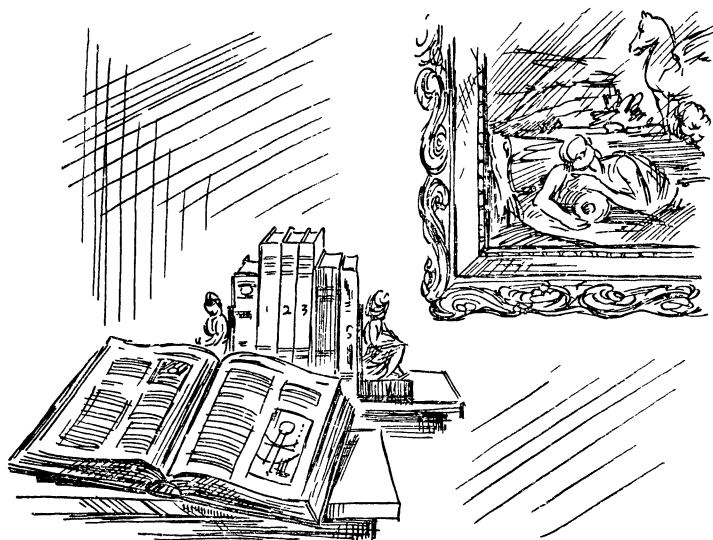


Рис. 62. Кладовая опыта.

Пока родители не могут передавать свой опыт потомкам, поведение в каждом новом поколении основывается исключительно на биологическом наследовании, на том, что заключено в программе клетки. Положение не меняется и в том случае, если есть некоторая передача опыта между поколениями. До тех пор, пока сумма опыта, теряемого со смертью, больше или равна сумме, переданной следующему поколению, нет накопления опыта. В каждом поколении поведение, по существу, то же самое, как в предыдущем, и диктуется свойствами, биологически унаследованными. Но если передача опыта между поколениями достаточно велика, чтобы вызвать накопление, молодые будут учиться на успехах и неудачах старых, и поведение будет «наследоваться» не через нуклеиновые кислоты, а через устное слово.

Здесь начался совсем иной вид эволюции. Картина поведения изменяется гораздо быстрее, чем биологическое строение тела. Изменения последнего связаны только с образованием новых цепей нуклеиновых кислот, а поведение меняется значительно скорее, как только изменение в нем как-то определено и может передаваться по традиции следующему поколению. Например, человек из животного, занимавшегося охотой, превратился в животное, занимающееся земледелием, из пещерного жителя — в строителя городов, он развил свою способность делать орудия труда от обтесывания камней до создания фабрик и машин. Все это развитие происходило за периоды, бесконечно более короткие, чем те периоды, за которые происходят биологические изменения, например период развития человека из обезьяноподобного животного. Большой мозг, способный думать, формирование понятий, употребление речи и позднее письма привело к накоплению опыта, который больше не теряется со смертью индивидуума, но развивается дальше в каждом новом поколении.

Когда достигнуто это критическое число нервных клеток на некоторой стадии развития, дальнейшее развитие будет идти все ускоряющимися темпами. Здесь снова уместна аналогия с образованием кристалла из насыщенного раствора. Это образование начинается легче всего с поверхности другого кристалла. У первого кристалла нет такой поверхности, поэтому должно пройти сравнительно долгое время, пока получится первый маленький кристалл. Но следующие структуры уже формируются на поверхностях ранее возникших кристаллов. Это очень ускоряет их образование. Чем больше число образовавшихся кристаллов, тем больше возможности нового образования. Тот же принцип применим и к образованию традиций. Вначале, когда человечество только получило возможность создавать их, образование традиций шло очень медленно. Но раз начавшись, оно шло все с большей силой и дифференциацией.

Традиции не всегда принимают форму, благоприятную для вида. Но если находятся благоприятные меры, приемы — как, например, земледелие, использование металлов, — эти меры и приемы

приводят к новому образу жизни за несколько поколений и вызывают изменение в поведении, типичное для человека.

Наука и есть один из примеров накопления опыта и понятий. Потребовалось много поколений, чтобы распутать огромное число наблюдений, отделить реальные связи от кажущихся, отличить предрассудок от научного факта. Но когда был найден систематический метод распознавания фактов, смогла начаться научная революция последних трехсот лет. Нет сомнения, что наука составляет важный шаг в том новом виде эволюции, который возник вместе с образованием традиций.

Пока что, конечно, от поколения к поколению передается только картина поведения и мышление. Строение тела воспроизводится старомодным способом, размножением, и не меняется за много поколений. Но кто может знать? Никто не может решительно исключать возможность иного пути развития. Быть может, удастся по желанию изменять нуклеиновые кислоты, определяющие развитие вида. Наши познания о механизме передачи признаков еще очень ограничены, но они растут с опасной быстротой, и человеческое вмешательство в наследственную структуру зародышевых клеток — дело не столь отдаленного будущего. Если эта цель будет достигнута, планируемое наследование желательных признаков организма станет возможным.

Но и не достигнув этой заветной цели, новая эволюция оставила свой отпечаток на всей планете и вмешивается во все растущем объеме в старый вид эволюции. Человек создает новые породы животных скрещиванием и целеустремленной селекцией. Естественная эволюция животного мира уже не пойдет старым путем. Если человек открывает в природе что-либо вновь развивающееся, он направляет его по своему желанию. Прошло время, когда сама природа развивала свои формы, медленно, путем проб и ошибок и без помех в течение долгих поколений. Мы больше не надеемся на случай, производящий мутации и новые формы и виды жизни, оставаясь счастливыми наблюдателями. Теперь мы сами развиваем природу и ее виды. Это трудная и ответственная

работа, в которой много западной. Мы приняли ее бремя только недавно, и нельзя удивляться, что мы иногда ошибаемся. В конце концов, сама природа ошибалась в прошлой эволюции, когда мамонты и динозавры становились все больше и больше, пока не исчезли, как печальные неудачи. И мы должны действовать, пробуя и ошибаясь, как природа. Но шаг новой эволюции, связанной с традицией, бесконечно быстрее старого, связанного с наследственностью. Ошибки наказываются немедленно и вызывают огромные страдания совершившего и его потомков. Мы сами отвечаем за то, что происходит, и не можем проклинать за это природу.

Но не есть ли сам человек часть природы? Традиции, накопленные человечеством, идеи, понятия, мифы и религии — все это результаты многообразного влияния природы на человека. Все это возникло из реакций человека на происходившее в природе, из отношения одного человека к другому, из трудностей жизни в неблагоприятных условиях. Наш организм и организм животных образовались в длительном и медленном процессе естественного отбора; они несут в себе свидетельства условий, в которых им пришлось развиваться в течение миллиардов лет, когда смогли «выжить» только те нуклеиновые кислоты, которые порождали хорошо приспособленные организмы. Традиции человеческого мышления и поведения — это тоже продукты воздействия окружающей среды на человека, но не на нуклеиновые кислоты, а на мозг. Он развился за сравнительно короткий промежуток времени, примерно равный миллиону лет.

ЭПИЛОГ

Наш рассказ об эволюции доведен до настоящего времени. Мы показали, как человек и жизнь развились из водорода или, вернее, нарисовали картину того, как мы сегодня представляем себе этот процесс. Мы привели лишь очень упрощенную картину, чтобы подчеркнуть наиболее существенные тенденции.

Эволюция — это развитие от простого к сложному, из неупорядоченного хаоса к высоко дифференцированным единицам, от неорганизованного к организованному. Но такая тенденция несвойственна всей материи во Вселенной; более развитые области гораздо меньше областей, хуже развитых. Только небольшая часть водородного облака способна образовывать звезды; только в малой, внутренней части звезды водород превращается в более тяжелые элементы; только малая доля тяжелых элементов извергается в пространство; только малая доля изверженного вещества собирается вокруг звезд в виде планет; только небольшая часть всех планет находится близко, но не слишком близко от звезд, и поэтому вода на них остается жидкой и могут происходить химические реакции; только очень малая доля вещества этих планет образует длинные цепи, служащие основой жизни, и только малая часть всей живой материи развивается в мозг.

Каждый шаг к большей дифференциации в этом развитии требует очень большого количества менее дифференцированного материала. Ядерная печь в центре звезд оставалась бы недостаточно горячей для производства новых элементов, если бы ее не окружали огромные количества водорода; жизнь на Земле требует лучистого тепла, которое может поставляться только значительно более крупным телом,

Солнцем, состоящим из гораздо более примитивной материи, так как при высокой температуре молекулы существовать не могут.

Часто говорят, что наука сместила человека и его Землю из центра Вселенной, где, как он наивно полагал, он находится, и определила для него гораздо менее важное место. Наше Солнце — это только маленькая и почти неразличимая звездочка в уголке огромного пространства, занимаемого нашей Галактикой, и таких звездочек очень много. Более того, вероятно, существует множество других звезд с планетами, на которых развилась жизнь. Некоторых людей эта мысль должна угнетать.

Но она может иметь и другое значение. Огромность Вселенной, наличие миллиардов звезд и пространства между ними служат необходимыми условиями развития материи, т. е. для превращения простых, неупорядоченных частиц в атомы и молекулы и наконец в крупные совокупности, образующие животных и мыслящие существа. Участки, в которых материя принимает более дифференцированную форму, очень немногочисленны и являются избранными. Их следует рассматривать как наиболее развитые и выдающиеся места Вселенной, места, где материя смогла полнее всего использовать свои возможности. Поэтому мы находимся в очень привилегированном и центральном положении, так как Земля — одно из таких мест. Могут существовать другие места, где развитие пошло еще дальше, но на Земле развилась жизнь в мыслящие существа. В мыслях этих существ отражается природа.

Но это не простое отражение. В мозгу человека внешние впечатления не просто регистрируются, они создают представления и понятия. Это отпечатки внешнего мира в человеческом мозгу. Поэтому нет ничего удивительного в том, что после долгого периода поисков и ошибок некоторые из представлений и понятий, выработанных человеком, постепенно приближаются к фундаментальным законам, управляющим миром, и какая-то часть наших представлений правильно отражает истинное строение атомов и истинное движение звезд. Природа в образе человека начинает познавать самое себя.

Виктор Вайскопф

НАУКА И УДИВИТЕЛЬНОЕ

М., 1965 г., 228 стр. с илл.

Редактор *Н. А. Райская*
Техн. редактор *С. Я. Шкляр*
Корректор *М. Ф. Алексеева*

Сдано в набор 21/X 1964 г. Подписано
к печати 25/I 1965 г. Бумага 84×108/₃₂.

Физ. печ. л. 7,13 + 4 вкл.

Условн. печ. л. 12,09. Уч.-изд. л. 11,93.

Тираж 50 000 экз. Цена книги 53 коп.

Заказ № 2011.

Издательство «Наука».

Главная редакция
физико-математической литературы.
Москва, В-71, Ленинский проспект, 15.

Первая Образцовая типография
имени А. А. Жданова Главполиграфпрома
Государственного комитета
Совета Министров СССР по печати.
Москва, Ж-54, Воловая, 28.



Фото I.

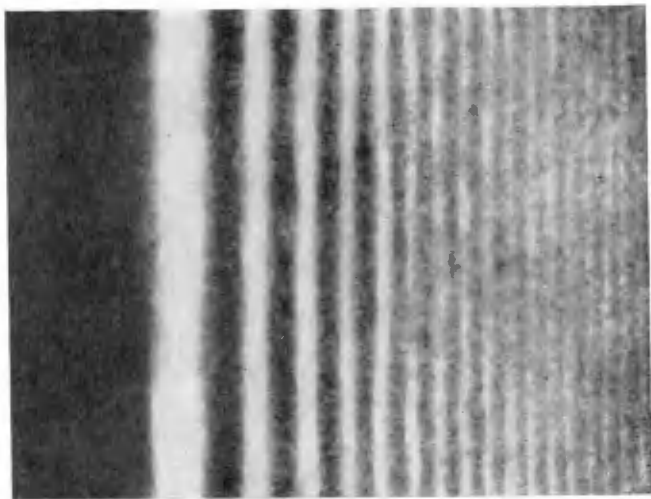


Фото II.

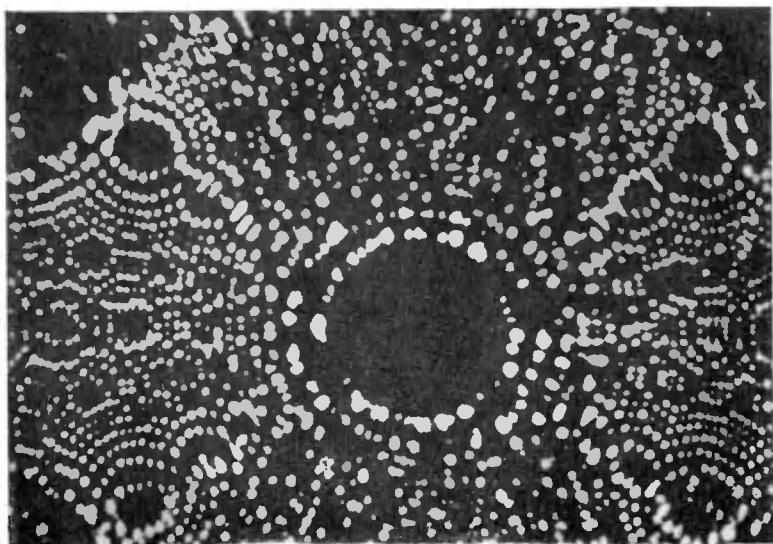


Фото III.

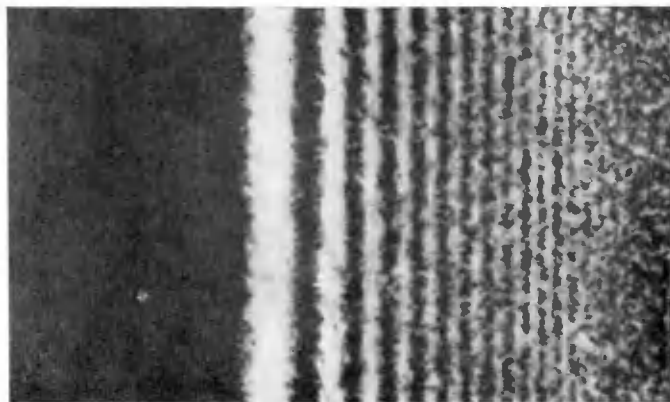


Фото IV.

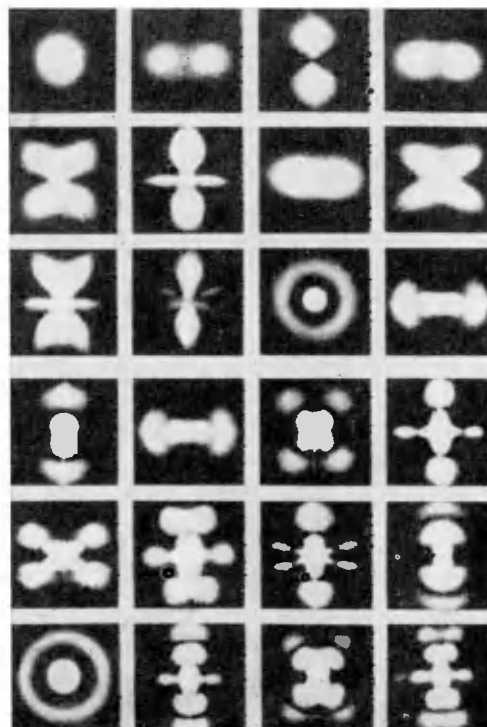
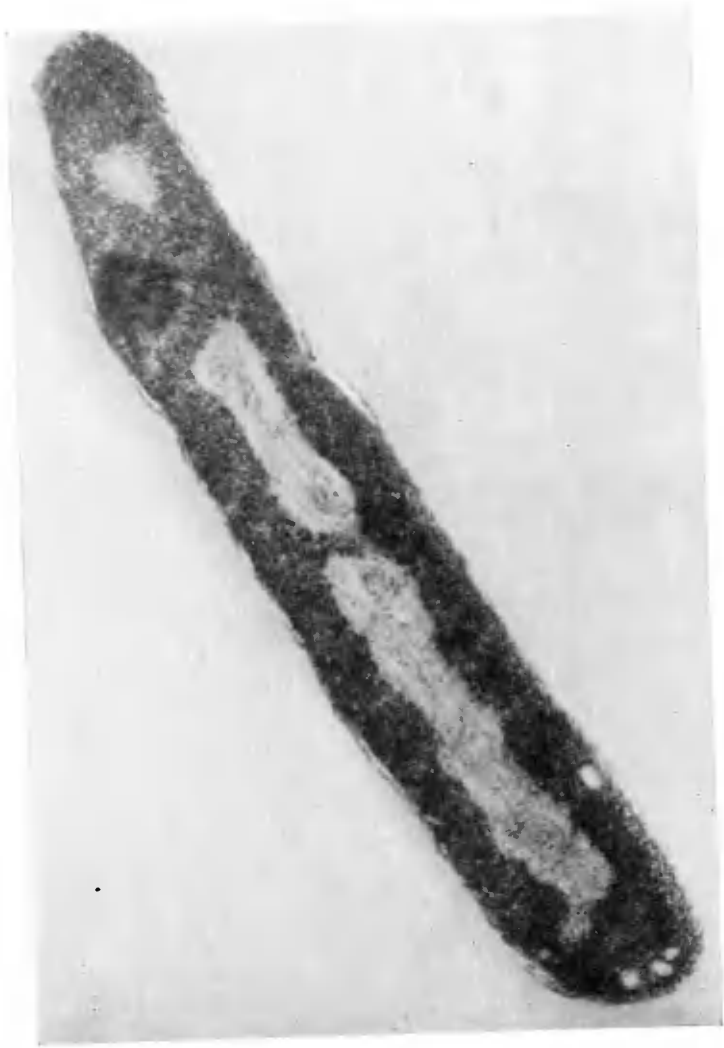


Фото V.



Φoto VI.

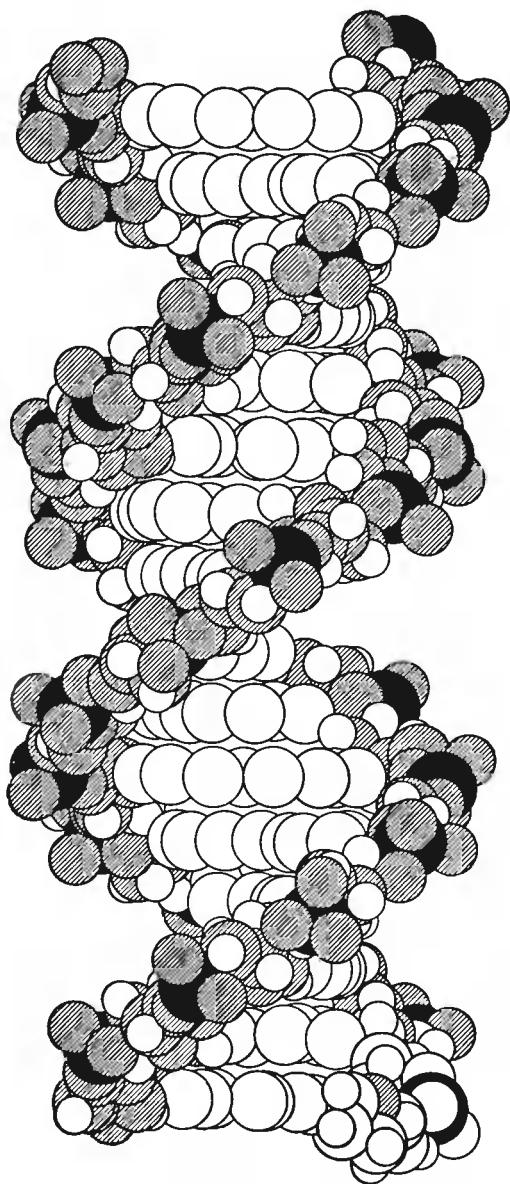
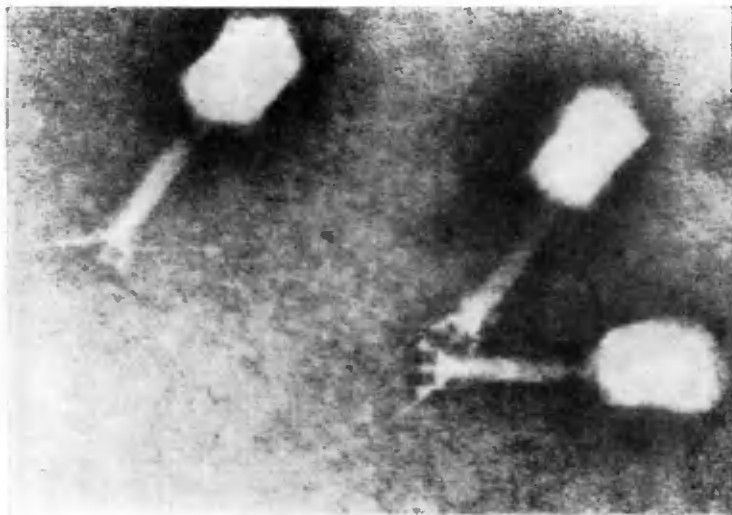


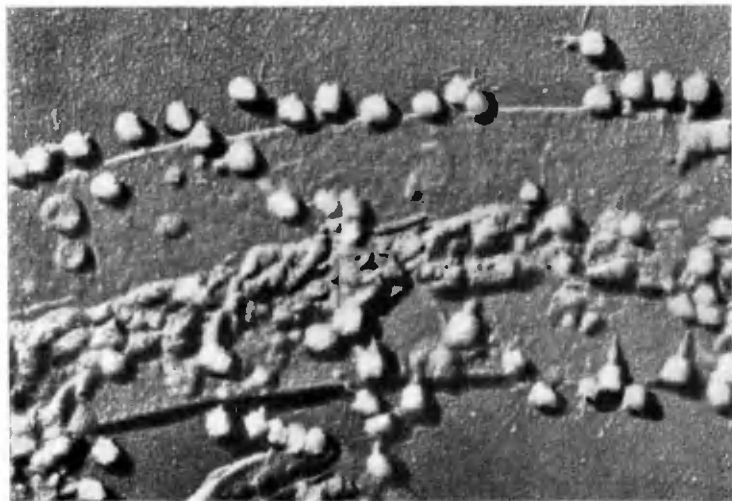
Фото VII.



Φoto VIII.



Φoto IX.



Φoto X.



Фото XI.