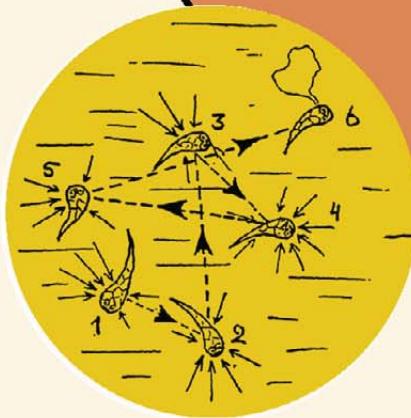


ГЕОРГИЙ ГАМОВ

ОДИН, ДВА, ТРИ...
БЕСКОНЕЧНОСТЬ!



ТРИДЦАТЬ ЛЕТ,
КОТОРЫЕ ПОТРЯСЛИ ФИЗИКУ.
ОДИН, ДВА, ТРИ... БЕСКОНЕЧНОСТЬ



ГЕОРГИЙ ГАМОВ



ГЕОРГИЙ ГАМОВ

ТРИДЦАТЬ ЛЕТ,
КОТОРЫЕ ПОТРЯСЛИ ФИЗИКУ
ОДИН, ДВА, ТРИ... БЕСКОНЕЧНОСТЬ



Издательство АСТ
Москва

УДК 53(091)

ББК 22.3г

Г18

George Gamow
THIRTY YEARS THAT SHOOK PHYSICS
ONE... TWO... THREE... INFINITY

Перевод с английского

A. Федотовой («Тридцать лет, которые потрясли физику»),
I. Красовской («Один, два, три... бесконечность»)

Компьютерный дизайн *B. Воронина*

Печатается с разрешения наследников автора и литературных агентств

Fort Ross, Inc и Nova Littera SIA.

Гамов, Георгий Антонович.

Г18 Тридцать лет, которые потрясли физику. Один, два, три... бесконечность : [сборник] / Георгий Гамов ; [перевод с английского А. Федотовой, И. Красовской]. — Москва : Издательство ACT, 2022. — 480 с.

ISBN 978-5-17-119976-0

Георгий Антонович Гамов (1904–1968) — один из отцов-основателей современной физики, известный своими работами в области квантовой механики, атомной и ядерной физики, астрофизики, космологии, биологии.

В начале прошлого века классическую физику потрясли две великие революционные теории. Одна из них — теория относительности Альберта Эйнштейна — произвела переворот в классической концепции пространства-времени. Вторая — квантовая — родилась и развивалась в содружестве целого созвездия ученых, таких как Макс Планк, Нильс Бор, Вернер Гейзенберг, Поль Дирак...

В своей книге «Тридцать лет, которые потрясли физику» Георгий Гамов рассказывает захватывающую историю «мозгового штурма» великих умов, в котором и сам он принимал непосредственное участие.

О «чудесах» математики, необычных свойствах пространства, об энтропии, генах и феномене жизни. В книге «Один, два, три... бесконечность», написанной для широкого круга читателей, Георгий Гамов собрал самые интересные факты и теории современной науки, чтобы представить читателю общую картину Вселенной и основные достижения в области фундаментальных научных знаний и поделиться с ним своим восторгом перед удивительным и загадочным мирозданием.

УДК 53(091)

ББК 22.3г

© R. Igor Gamow, 1966

© George Gamow, 1947, 1961

© renewed by Barbara Gamow, 1974

© Перевод. ИП Макеева Е.П., 2019

© Издание на русском языке AST Publishers, 2022

Тридцать лет, которые потрясли физику

История квантовой теории

ПРЕДИСЛОВИЕ

Две великие революционные теории изменили лицо физики в первые десятилетия двадцатого века: теория относительности и квантовая теория. Первая была, по сути, создана одним человеком, Альбертом Эйнштейном, и состояла из двух частей: специальной теории относительности, опубликованной в 1905 году, и общей теории относительности, опубликованной спустя 10 лет. Теория относительности Эйнштейна повлекла за собой радикальные изменения в классической ньютоновской концепции пространства и времени как двух независимых сущностей физического мира и привела к единому четырехмерному миру, в котором время рассматривается как четвертая координата, хотя и не совсем эквивалентная трем пространственным координатам. Теория относительности внесла важные изменения в трактовку движения электронов в атоме, движения планет в Солнечной системе и движения звездных галактик во Вселенной.

Квантовая теория, со своей стороны, является результатом творчества нескольких великих ученых, начиная с Макса Планка, который первым ввел в физику понятие кванта энергии. Теория прошла много этапов эволюции и дала нам глубокое понимание структуры атомов и атомных ядер, а также тел привычных нам размеров. На сегодняшний день квантовая теория еще не завершена, особенно в областях, связанных с теорией относительности и проблемой элементарных частиц, решение которой временно приостановлено в связи с невероятными сложностями, встающими на пути к решению этой проблемы.

О квантовой теории мы и поговорим в этой книге. В возрасте восемнадцати лет автор впервые познакомился с моделью атома

8 ГЕОРГИЙ ГАМОВ. ТРИДЦАТЬ ЛЕТ, КОТОРЫЕ ПОТРЯСЛИ ФИЗИКУ

Бора в Ленинградском университете, а затем, позже, в возрасте двадцати четырех лет, ему посчастливилось стать студентом Бора в Копенгагене. В те памятные годы на улице Блэгдамсвей (адрес Института Бора) он имел возможность встречаться со многими учеными, оказавшими влияние на первоначальное развитие квантовой теории, и участвовать в их беседах. Изложенное в этой книге во многом является производным того опыта, который автор получил, общаясь с этими великими учеными и в первую очередь с горячо любимым им Нильсом Бором. Автор надеется, что новое поколение физиков найдет для себя много интересного на этих страницах.

*Январь 1965 года
Георгий Гамов*

ВВЕДЕНИЕ

Начало двадцатого века предвещало начало беспрецедентной эры переворота в сознании и переоценки классической теории, лежащей в основе физики, начиная с донышковских времен. В своей речи на конференции Немецкого физического общества 14 декабря 1900 года Макс Планк заявил, что, если исходить из предположения о том, что энергия излучения может существовать только в форме отдельных скоплений, можно разрешить парадоксы, которыми изобилует классическая теория излучения и поглощения света материальными телами. Планк назвал эти скопления энергии световыми квантами. Пять лет спустя Альберт Эйнштейн успешно применил теорию световых квантов, объяснив с ее помощью эмпирические законы фотоэффекта (выбивание электронов из металлических поверхностей под воздействием фиолетового и ультрафиолетового света). Еще позже Артур Комптон провел свой знаменитый эксперимент, который показал, что рассеяние рентгеновских лучей свободными электронами подчиняется тем же законам, что и абсолютно упругое соударение. Так, в течение последующих пяти лет инновационная идея квантования энергии излучения прочно закрепилась в теоретической и экспериментальной физике.

В 1913 году датчанин Нильс Бор развил идею Планка о квантовании энергии излучения, описав механическую энергию электронов в пределах атома. Разработав четкие «правила квантования» для механических систем размеров атома, он вывел логическое объяснение планетарной модели атома Эрнеста Резерфорда. Эта модель была доказана экспериментально, однако вступала в серьезные противоречия с другими фундаментальными положениями классической физики. Бор рассчитал энергию отдельных

квантовых состояний электрона и определил световое излучение как испускание светового кванта с энергией, количественно равной разнице энергий начального и конечного квантового состояния атомного электрона. Благодаря этим расчетам он смог дать детальное объяснение проблеме, десятилетиями мучившей спектроскопистов: спектральным линиям водорода и более тяжелых элементов. Первая работа Бора по квантовой теории атома стала поворотным моментом.

В течение десяти лет совместными усилиями физиков-теоретиков и специалистов в различных областях экспериментальной физики были более детально описаны оптические, магнитные и химические свойства некоторых атомов. Но с годами становился все более очевидным тот факт, что теория Бора, несмотря на свой успех, не была окончательной, так как не могла объяснить некоторые вещи, уже известные об атомах. Например, она никак не описывала процесс перехода электрона из одного квантового состояния в другое, равно как не существовало способа рассчитать интенсивность различных линий оптических спектров.

В 1925 году французский физик Луи де Б्रойль опубликовал исследование, в котором предложил довольно неожиданную трактовку квантовых орбит Бора. По мнению де Брайля, движение каждого электрона происходит под действием неких загадочных волн-пилотов, чья скорость распространения и длина зависят от скорости этого электрона. Полагая, что длина волн-пилотов обратно пропорциональна скорости электрона, де Брайлю удалось показать, что различные квантовые орбиты в гидrogenной модели атома Бора могут вмещать целое количество волн-пилотов. Таким образом, модель атома стала похожа на музыкальный инструмент с основным тоном (самая близкая к центру орбита с наименьшим количеством энергии) и обертонами (внешние орбиты с большим энергетическим потенциалом). Спустя год после публикации исследования Брайля австрийский физик Эрвин Шредингер развил его идеи и облек их в математически точную форму — так появилась его волновая механика. Волновая механика объясняла и те процессы, которые удалось объяснить Бору, и ряд других, с которыми теория Бора не справлялась (например, интенсивность спектральных линий). Кроме того, Шредингер предсказал некоторые новые явления (дифракция электронного пучка), о которых классическая физика и теория Планка—Бора не могли и предполагать. Фактически волновая механи-

ка представляла собой абсолютно полную и самодостаточную теорию всех атомных явлений и, как выяснилось в двадцатые годы, могла объяснить явления радиоактивного распада и искусственных ядерных превращений.

Одновременно с работой Шредингера по волновой механике появилось исследование молодого немецкого физика Вернера Гейзенberга, чей подход к проблемам квантовой физики использовал так называемую некоммутативную алгебру (математическая дисциплина, которая предполагает, что $a \times b$ не обязательно тождественно $b \times a$). Одновременное появление работ Шредингера и Гейзенберга в двух немецких журналах (*«Annalen der Physik»* и *«Physikalische Zeitschrift»*) потрясло мир теоретической физики. Два исследования были настолько не похожи друг на друга, насколько это вообще возможно, но приходили к одним и тем же выводам касательно атомной структуры и атомных спектров. Ученым потребовалось больше года для того, чтобы понять, что с точки зрения физики эти теории были абсолютно идентичны, несмотря на то что математически были представлены по-разному. Это как если бы Колумб открыл Америку, двигаясь через Атлантический океан на запад, одновременно с таким же отважным японским мореплавателем, двигавшимся через Тихий океан на восток.

Однако у квантовой теории было слабое место, которое давало о себе знать при попытках квантования механических систем, т.к. ученым приходилось работать с величинами скоростей близкими к скорости света, а это требовало релятивистского подхода. Было совершено множество неудачных попыток объединить теорию относительности и квантовую теорию, пока, наконец, в 1929 году британский физик Поль Дирак не вывел свое знаменитое релятивистское волновое уравнение. Решения этого уравнения позволяли полностью описать движение электронов атома на скоростях близких к скорости света и объясняли их линейные и угловые механические импульсы, а также магнитный момент, что, безусловно, было приятным бонусом. Некоторые формальные трудности, связанные с анализом этого уравнения, привели Дирака к выводу о том, что наряду с обычными отрицательно заряженными электронами существуют и положительно заряженные антиэлектроны.

Его предсказание полностью подтвердилось несколько лет спустя, когда антиэлектроны были обнаружены в космических лучах. Теория античастиц расширялась со временем, и теперь

принято говорить не только об антиэлектронах, но и антипротонах, антинейтронах, антимезонах и так далее.

Так, к 1930 году, всего лишь через три десятилетия после судьбоносного заявления Планка, квантовая теория полностью оформилась и стала такой, какой мы видим ее сейчас¹. В течение этого времени были сделаны лишь незначительные теоретические поправки. С другой стороны, этот период был очень плодотворным с точки зрения экспериментальных исследований, особенно в области изучения вновь открытых элементарных частиц. Тем не менее от понимания самой сути элементарных частиц, их масс, зарядов, магнитных моментов и взаимодействий нас отделяет прочная стена, которую мы надеемся в скором времени сломить. Когда этот прорыв произойдет, мы, вне всяких сомнений, будем иметь дело с понятиями, настолько далекими от существующих в современной физике, как современные далеки от понятий классической.

В последующих главах мы попытаемся описать бурное развитие квантовой теории энергии и материи в течение первых тридцати лет ее существования, делая акцент на принципиальных различиях между «старой добродушной» классической физикой и новым подходом, берущим свое начало в двадцатом веке.

¹ На момент первой публикации, 1966 г. — Примеч. ред.



Глава 1

ПЛАНК И СВЕТОВЫЕ КВАНТЫ

Корни революционного заявления Планка о том, что свет может излучаться и поглощаться только в форме отдельных скоплений энергии, лежат в гораздо более ранних работах Людвига Больцмана, Джеймса Клерка Максвелла, Джозайи Уилларда Гиббса и других, в которых мы находим статистическое описание тепловых свойств физических тел.

Согласно кинетической теории тепла, тепло является результатом случайного движения многочисленных отдельных молекул, из которых состоят все физические тела. В силу того, что движение каждой молекулы, участвующей в тепловом движении, отследить не только невозможно, но и бессмысленно, при математическом описании тепловых явлений необходимо использовать статистический метод.

Подобно тому, как экономист не знает, сколько именно гектаров земли засевает фермер Джон Доу и как много у него свиней, физику не важно положение или скорость отдельной молекулы из огромного количества, входящих в состав газа. Будь то экономика страны или наблюдение за поведением газа, важны лишь средние значения.

Один из базовых законов статистической механики (раздел физики, изучающий средние значения физических свойств для

крупных сосредоточений отдельных частиц, двигающихся беспорядочно) — это так называемая теорема о равнораспределении, которая математически выводится из ньютоновских законов механики. Согласно ей, общее количество энергии, содержащееся в сосредоточении большого количества отдельных частиц, обменяющихся энергией между собой через соударения, распределено равномерно (в среднем) между всеми частицами. Если все частицы идентичны, как, например, в чистых газах — кислороде или неоне, — то в среднем они все движутся с одинаковой скоростью и имеют одинаковую кинетическую энергию. Если обозначить общую энергию системы как E , а общее количество частиц принять за N , то среднее количество энергии для каждой частицы — это E/N . Если мы имеем дело с различными частицами, как, например, в смесях двух и более газов, то более крупные молекулы будут иметь меньшие скорости движения, таким образом их кинетические энергии (пропорциональные массе и квадрату скорости) в среднем будут такими же, как у более легких молекул.

Рассмотрим, к примеру, смесь водорода и кислорода. Молекулы кислорода, которые в шестнадцать раз превосходят молекулы водорода по массе, будут иметь среднюю скорость в $\sqrt{16} = 4$ раза меньше*.

В то время как закон равнораспределения энергии регулирует распределение энергии между членами крупных скоплений частиц, скорость и энергия отдельных частиц может отклоняться от средних значений, это явление получило название «статистические флюктуации».

Флюктуации также можно представить математически, рассмотрев кривые, показывающие относительное количество частиц, имеющих скорости, отклоняющиеся от средних значений в большую или меньшую сторону для любой из заданных температур. Эти кривые, впервые рассчитанные Джеймсом Максвеллом и названные в честь него, показаны на рис. 1 для трех различных температур газов.

* Так как кинетическая энергия рассчитывается как произведение массы и квадрата скорости, то ее значение останется неизменным, если масса увеличивается в 16 раз, а скорость уменьшается в 4 раза. В самом деле, $4^2 = 16!$ — Здесь и далее, за исключением отдельно оговоренных случаев, примечания автора обозначены звездочками, примечания переводчика — цифрами.

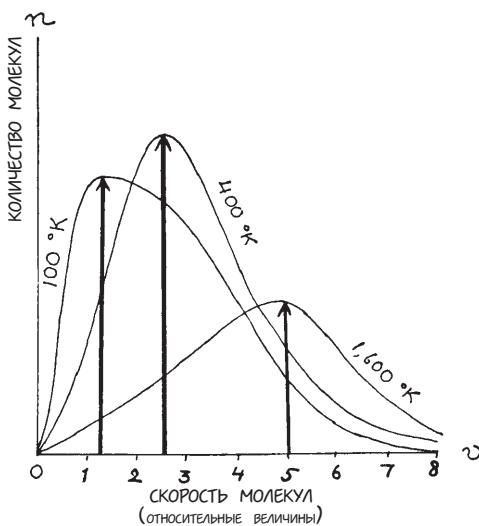


Рис. 1. Распределение Максвелла: количество молекул, имеющих различные скорости v , изображено в зависимости от скоростей для трех различных температур, 100, 400 и 1600 °K. Так как количество молекул в сосуде остается неизменным, площади участков под тремя кривыми равны между собой. Средние скорости молекул увеличиваются пропорционально квадрату абсолютной температуры.

Использование статистического метода в изучении теплового движения молекул позволило объяснить тепловые свойства физических тел, в особенности это касается газов. Применительно к газам, эта теория значительно упрощается в силу того, что молекулы газа свободно передвигаются в пространстве и не прижаты плотно друг к другу, как в жидкостях и твердых телах.

СТАТИСТИЧЕСКАЯ МЕХАНИКА И ТЕПЛОВОЕ ИЗЛУЧЕНИЕ

К концу девятнадцатого века лорд Рэлей и Джеймс Джинс сделали попытку применить статистический метод, ставший ключом к пониманию тепловых свойств физических тел, к решению проблем при изучении теплового излучения. Все физические тела при нагревании излучают электромагнитные волны различной длины. Когда температура относительно низкая — например, тем-

пература кипения воды — преобладающие величины длин испускаемых волн достаточно велики. Эти волны сетчатка человеческого глаза не воспринимает (т.е. они для нас невидимы), тем не менее наша кожа их поглощает, и при этом мы ощущаем тепло — это и есть теплота в физическом смысле, или инфракрасное излучение. Когда температура поднимается до 600°C (температура нагревательных элементов электрических плит), можно увидеть слабый красный свет. При 2000°C (как в нити накаливания электрической лампочки) можно увидеть белый свет, содержащий волны всех длин видимого спектра излучения: от красного до фиолетового.

При еще более высокой температуре электрической дуги, 4000°C , наблюдается значительное количество невидимого ультрафиолетового излучения, интенсивность которого стремительно возрастает при дальнейшем повышении температуры.

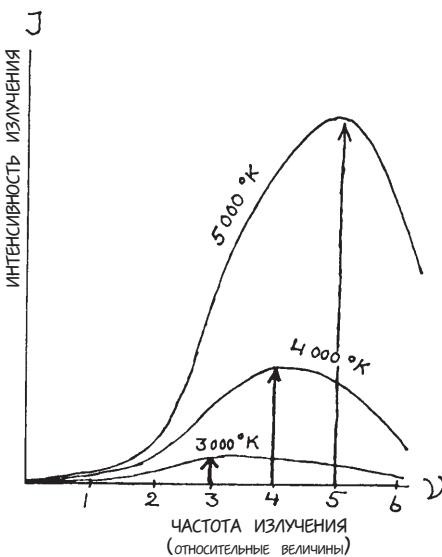


Рис. 2. Наблюдаемое распределение интенсивностей излучения для различных частот v изображено в зависимости от частоты. Поскольку содержание энергии излучения на единицу объема увеличивается как четвертая степень абсолютной температуры T , площади под кривыми также увеличиваются. Частота, соответствующая максимальной интенсивности, увеличивается пропорционально абсолютной температуре.

При каждой из данных температур существует одна преобладающая частота колебаний, для которой интенсивность является самой высокой, и когда температура повышается, эта преобладающая частота становится выше и выше. Это графически представлено на рис. 2, который показывает распределение интенсивности в спектрах, соответствующих трем температурам.

Сравнивая кривые на рис. 1 и 2, можно заметить важное качественное сходство. Если в первом случае увеличение температуры перемещает верхнюю точку кривой к более высоким молекулярным скоростям, то во втором случае точка перемещается к более высоким частотам излучения. Это сходство подтолкнуло Рэлея и Джинса к тому, чтобы применить к тепловому излучению теорему о равнораспределении, которая до этого так хорошо работала с газами; т.е. предположить, что общее количество доступной энергии излучения распределяется поровну между всеми возможными частотами колебаний. Эта попытка привела, однако, к катастрофическим результатам! Проблема заключалась в том, что, несмотря на все сходства между газом, образованным отдельными молекулами, и тепловым излучением, образованным электромагнитными колебаниями, существует одно важное различие: в то время как число молекул газа в данной системе всегда конечно, хоть и обычно очень велико, количество возможных электромагнитных колебаний в этой же системе всегда бесконечно. Чтобы понять это утверждение, необходимо помнить, что модель волновых колебаний в пространстве, ограниченном, скажем, кубом, формируется наложением различных стоячих волн, чьи узлы расположены на стенках ограждающего куба.

Эту ситуацию проще представить на примере одномерного волнового движения, такого, какое мы можем наблюдать при колебании струны, закрепленной с обеих концов. Так как концы струны не могут двигаться, единственный возможный вид колебаний — колебания, представленные на рис. 3, в музыкальной терминологии соответствующие основному тону и различным обертонам колеблющейся струны.

На всей протяженности струны может быть одна полуволна, две, три полуволны, десять полуволн, сто, тысяча, миллион, миллиард... любое количество полуволн.

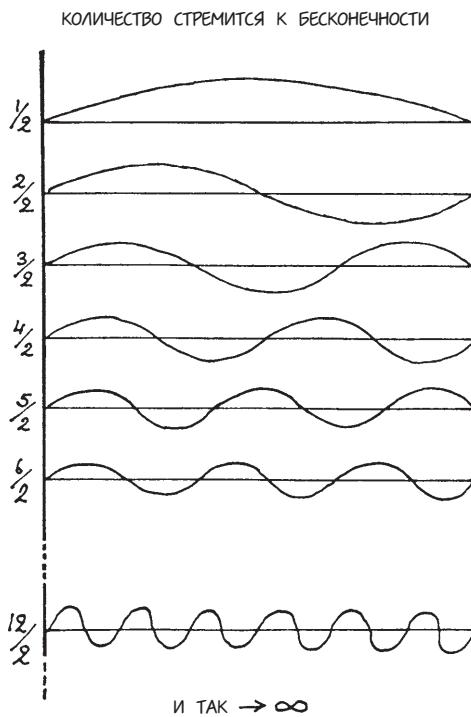


Рис. 3. Основной тон и более высокие обертоны в одномерном пространстве (к примеру, скрипичная струна).

Соответствующие частоты колебаний различных обертонов будут превышать колебания основного тона в два, три, десять, сто, миллион, миллиард раз и т.д.

В случае стоячих волн в пространстве, ограниченном трехмерным сосудом, таким как куб, ситуация будет аналогичной, хотя и несколько более сложной, что приведет к неограниченному количеству различных колебаний с все более и более короткими волнами и соответственно более и более высокими частотами. Таким образом, если E — это общее количество энергии излучения, доступной в ограниченном сосудом пространстве, принцип равномерного распределения приведет нас к заключению о том, что каждому отдельному колебанию будет присвоено E/∞ , т.е. бесконечно малое количество энергии! Парадоксальность этого вывода очевидна, но мы можем еще более ярко проиллюстрировать ее следующими рассуждениями.

Предположим, у нас есть сосуд в форме куба, известный как «куб Джинса», внутренние стенки которого сделаны из идеальных зеркал, отражающих сто процентов падающего на них света. Разумеется, таких зеркал не существует, и изготовить их невозможно — даже самое лучшее зеркало поглощает небольшое количество падающих лучей. Однако мы можем воспользоваться этим допущением при теоретических рассуждениях. Такое рассуждение, при котором мы предполагаем, что было бы результатом эксперимента, в котором используются идеальные зеркала, поверхности без трения, невесомые бруски и т.д., получило название «мысленный эксперимент» (от нем. Gedankenexperiment) и часто используется в различных областях теоретической физики. Если мы сделаем в стенках куба Джинса небольшое окошко и впустим немного света, то, закрывая идеальный затвор, мы оставим свет внутри на неопределенное время, где идеальные зеркальные стеки будут попеременно его отражать. Если спустя некоторое время мы откроем затвор снова, мы увидим вспышку выходящего света. По аналогичному принципу происходит процесс закачивания и последующего выпуска газа из сосуда.

Газообразный водород в стеклянной таре может оставаться бесконечно долго, что представляет собой идеальный случай. Но водород не будет долго оставаться в сосуде, изготовленном из палладия, поскольку этот металл, как известно, довольно легко пропускает молекулы водорода. Также нельзя использовать стеклянный сосуд для хранения плавиковой кислоты, т.к. она вступает в химическую реакцию со стеклянными стенками. Вот и получается, что куб Джинса с идеальными зеркальными стенками не такая уж и небывалая вещь!

Тем не менее существует разница между газом, запертром в сосуде, и излучением в сосуде. Поскольку молекулы нельзя назвать точками в математическом смысле (хотя они имеют определенные конечные величины диаметров), между ними происходят множественные соударения, при которых они могут обмениваться энергией. Так, если мы введем в сосуд некоторый горячий газ и некоторый холодный газ, соударения между молекулами быстро приведут к тому, что быстрые молекулы замедлятся, а медленные ускорятся, а энергия таким образом распределится равномерно в соответствии с принципом равнораспределения. В случае с идеальным газом, образованным молекулами-точка-

ми, которого, естественно, не существует в природе, молекулы не будут соударяться, поэтому холодная часть останется холодной, а горячая — горячей. Тем не менее обмен энергией между молекулами идеального газа можно стимулировать путем введения в сосуд одной или нескольких частиц с конечным, но очень маленьким диаметром (бронновские частицы). При столкновении с ними быстрые «точечные» молекулы передадут им свою энергию, которая, в свою очередь, передаст к более медленным «точечным» молекулам.

В случае со световыми волнами ситуация будет другой, т.к. два световых луча, пересекаясь, никаким образом не влияют на распространение друг друга*.

Таким образом, чтобы обеспечить обмен энергией между стоячими волнами различной длины, мы должны ввести в контейнер небольшие тела, которые могут поглощать и переизлучать все возможные длины волн, тем самым обеспечивая обмен энергией между всеми возможными колебаниями. Обычные абсолютно черные тела, такие как древесный уголь, обладают этой способностью, по крайней мере на видимой части спектра, и мы можем представить «идеальные абсолютно черные тела», которые ведут себя так же для волн всех возможных длин. Поместив в куб Джинса несколько частиц идеальной угольной пыли, мы решим нашу проблему обмена энергией.

Теперь давайте проведем мысленный эксперимент: введем определенное количество излучения с заданной длиной волн в изначально пустой куб Джинса, например, из красной части спектра. Сразу после введения внутренняя часть куба будет содержать только красные стоячие волны, распространяющиеся от стенки к стенке, в то время как все остальные длины волн будут отсутствовать. Это как если бы вы нажимали на рояль одну-единственную клавишу. Если, как это бывает на практике, обмен энергией между различными струнами инструмента очень слабый, звук будет слышен до тех пор, пока вся энергия, передаваемая на струну, не будет рассеяна при затухании колебаний. Однако, если в струнах есть утечка энергии через крепления, к которым

* Чтобы избежать возражений со стороны тех читателей, которые знают гораздо больше, чем необходимо для понимания этих рассуждений, автор спешит уточнить, что, согласно современной квантовой электродинамике, следует ожидать некоторого рассеяния одного луча света другим из-за образования виртуальных электронных пар, но Джинс и Планк этого не знали.

они присоединены, другие струны тоже начнут колебаться, и это будет продолжаться до тех пор, пока, согласно теореме об равнораспределении, все 88 струн не будут иметь энергию, равную $1/88$ от общей сообщаемой энергии.

Но чтобы пианино представляло собой более-менее точную аналогию куба Джинса, у него должно быть гораздо больше клавиш, бесконечно уходящих за правый край клавиатуры, в ультразвуковую область (рис. 4). Так, энергия, сообщаемая одной струне на слышимом участке клавиатуры будет переходить вправо к участку с большими частотами колебаний и затеряется в бесконечно далеких участках ультразвуковых колебаний, а произведение, которое мы попытаемся сыграть на таком пианино, превратится в резкий и пронзительный писк.



Рис. 4. Пианино с неограниченным количеством клавиш, простирающихся в ультразвуковую область, вплоть до бесконечных частот. Согласно теореме о равнораспределении, вся энергия, сообщаемая музыкантом одной из низкочастотных клавиш, должна доходить до ультразвукового участка клавиатуры со звуками за пределами слышимого диапазона!

Точно так же энергия красного света, выпускаемого в куб Джинса, превратится в энергию синего, фиолетового, ультрафиолетового света, рентгеновских лучей, гамма-лучей и так далее без каких-либо ограничений. В таком случае сидеть перед камином было бы очень опрометчиво, поскольку красный свет, исходящий от дружелюбных тлеющих угольков, быстро превратился бы в опасное высокочастотное излучение продуктов распада!

Поток энергии в область высоких частот не представляет никакой реальной опасности для выступающего пианиста не только потому, что клавиатура имеет ограниченное количество клавиш, но и из-за того, что, как было упомянуто ранее, колебания каждой струны затухают слишком быстро, не успев передать даже небольшую часть энергии соседней струне.

Однако в случае с энергией излучения ситуация куда более серьезная, и если при этом теорема равнораспределения справедлива, то открытая дверца топки парового котла стала бы великолепным источником рентгеновских и гамма-лучей. Очевидно, где-то в доказательствах физиков девятнадцатого века закралась ошибка, и необходимы были серьезные перемены для того, чтобы избежать «ультрафиолетовой катастрофы», которая грядет в теории, но на практике никогда не случится.

МАКС ПЛАНК И КВАНТ ЭНЕРГИИ

Задача термодинамического излучения была решена Планком, приверженцем классической физики (за что нельзя его винить). Именно он положил начало современной физике. На пороге нового века, на встрече Немецкого физического общества 14 декабря 1900 года Планк представил свои идеи по данному вопросу, столь необычные и фантастические, что сам едва мог в них поверить, даже несмотря на бурную реакцию аудитории и физического общества в целом.

Макс Планк родился в немецком городе Киле в 1858 году, а позже переехал со своей семьей в Мюнхен. Он учился в Максимилианской гимназии в Мюнхене, затем поступил в Мюнхенский университет, где изучал физику три года. После этого несколько лет Планк провел в Берлинском университете, там он познакомился с величайшими физиками того времени: Германом фон Гельмгольцем, Густавом Кирхгофом, Рудольфом Клаузиусом, узнал больше о теории теплоты, формально известной как термодинамика. Вернувшись в Мюнхен, он выступил с докторской диссертацией о втором законе термодинамики и получил ученую степень в 1879-м, а затем стал преподавателем в университете. Шесть лет спустя он стал доцентом в Киле. В 1889 году он перевелся в Берлинский университет, в 1892 году стал профессором.

Эту академическую должность, самую высокую из возможных в Германии на тот момент, Планк занимал до своего ухода на пенсию в возрасте семидесяти лет. После этого он продолжил свою деятельность и выступал с публичными лекциями до самой смерти в возрасте почти девяноста лет. Две из его последних работ («Научная автобиография» и «Понятие причинности в физике»)¹ были опубликованы в 1947-м, в год его смерти.

Планк был типичным немецким профессором для своего времени, серьезным, возможно, педантичным, но не лишен простых человеческих чувств, что легко увидеть в его переписке с Арнольдом Зоммерфельдом, который, продолжая дело Бора, применял квантовую теорию к структуре атома. Зоммерфельд считал понятие кванта изобретением Планка и в письме к нему писал:

Там, где я мог лишь собирать цветы,
Возделал целину впервые ты.

На это Планк ответил:

Цветы с тобою собирали вместе,
Но вот уже настал нам срок,
Друг с другом их деля по чести,
Сплести блистательный венок*.

За свои научные достижения Планк получил немало академических наград. Он стал членом Прусской академии наук в 1894-м и был избран в иностранные члены Лондонского королевского общества в 1926 году. Несмотря на то что он не внес никакого вклада в астрономию, один из недавно открытых астероидов назвали «Планкианой» в его честь.

Всю свою долгую жизнь Планк был сосредоточен почти исключительно на проблемах термодинамики, а его работы были настолько значительны, что принесли ему почетную должность профессора в Берлинском университете уже в тридцать четыре года.

Но настоящий прорыв в его научной деятельности — открытие кванта энергии, за которое он в 1918 году был удостоен Нобелевской премии, — произошел довольно поздно, в возрасте сорока

¹ Работы не переведены на русский.

* М. Планк. «Научная автобиография». Перевод стихотворного отрывка А. Федотовой.

двух лет. Сорок два года — это не так уж поздно в жизни человека с обычной профессией, но часто бывает так, что самая важная работа физика-теоретика уже проделана к двадцати пяти годам. В этом возрасте у него уже было достаточно времени, чтобы изучить нужное количество существующих теорий, но его ум все еще довольно гибок, чтобы порождать новые, смелые и революционные идеи. Исаак Ньютон, к примеру, открыл закон всемирного тяготения в двадцать три года; Альберт Эйнштейн создал теорию относительности в двадцать шесть; Нильс Бор опубликовал теорию строения атома в возрасте двадцати семи лет. Автор этой книги также опубликовал свой скромный, но самый важный для него труд о естественных и искусственных превращениях атомного ядра, когда ему было двадцать четыре года. В своей лекции Планк заявил, что, согласно его довольно сложным расчетам, парадоксальные выводы, полученные лордом Рэлеем и Джинсом, могут быть исправлены, а ультрафиолетовой катастрофы можно избежать, если исходить из условия, что энергия электромагнитных волн (включая световые волны) может существовать только в форме отдельных скоплений, или квантов, при этом количество энергии в каждом кванте прямо пропорционально соответствующей частоте.

Теоретические соображения в области статистической физики, как известно, довольно трудны для восприятия, но, изучив график на рис. 5, можно получить представление о том, как постулат Планка «препятствует» утечке энергии излучения в безграничную высокочастотную область спектра.

На этом графике частоты возможные в рамках «одномерного» куба Джинса нанесены на оси абсцисс и обозначены как 1, 2, 3, 4 и т.д.; на оси ординат нанесены энергии колебаний, которые могут быть отнесены к каждой возможной частоте. Согласно классической физике, допускается любое количество энергии (т.е. любая точка на вертикальных линиях, проведенных через 1, 2, 3 и т.д.), причем статистически происходит равнораспределение энергии между всеми возможными частотами. С другой стороны, положение Планка ограничивает дискретный набор значений энергии, равных одному, двум, трем и т.д., при этом количество энергии соответствует данной частоте. Поскольку предполагается, что энергия, содержащаяся в каждом пучке, пропорциональна частоте, мы получаем возможные значения энергии, показанные большими черными точками на диаграмме.

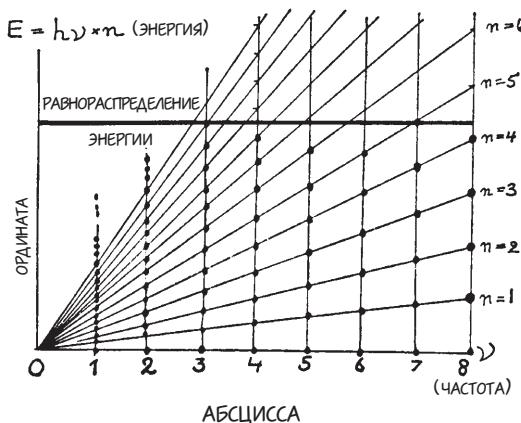


Рис. 5. Если, согласно гипотезе Планка, энергия, соответствующая каждой частоте ν , должна быть целым числом от величины $h\nu$, то ситуация существенно изменится по сравнению с предыдущей диаграммой. Например, для $\nu = 4$ существует восемь возможных колебательных состояний, тогда как для $\nu = 8$ — только четыре. Это ограничение уменьшает количество возможных колебаний на высоких частотах и устраняет парадокс Джинса.

Чем выше частота, тем меньше количество возможных значений энергии ниже любого заданного предела, что ограничивает способность высокочастотных колебаний поглощать дополнительную энергию. В результате количество энергии, которое может быть получено высокочастотными колебаниями, становится конечным, несмотря на их бесконечное количество, и теперь все прекрасно!

Кто-то сказал, что существует три вида лжи: ложь, ложь во спасение и статистика, но в случае с вычислениями Планка статистика практически стала правдой. Для распределения энергии в спектре теплового излучения он получил теоретическую формулу, которая полностью согласуется с наблюдением, показанным на рис. 2.

Пока формула Рэлея—Джинса воспаряет к небесам, требуя бесконечное количество общей энергии, формула Планка с ее высокими частотами спускается вниз, и ее форма полностью соответствует наблюдаемым кривым. Предположение Планка, что количество энергии кванта излучения пропорционально частоте, можно выразить следующим образом:

$$E = h\nu,$$

где ν (греческая буква «ню») — это частота, а h — универсальная постоянная, известная как постоянная Планка или квантовая постоянная. Для того чтобы теоретические кривые Планка совпадали с наблюдаемыми кривыми, необходимо задать h определенное численное значение, и значение это было посчитано: $6,77 \times 10^{-27}$ в единицах системы СГС (сантиметр-грамм-секунда)*.

Тот факт, что это значение небольшое, делает квантовую теорию неприменимой к крупномасштабным явлениям, с которыми мы сталкиваемся в повседневной жизни, и ею можно пользоваться только в изучении процессов атомного масштаба.

СВЕТОВЫЕ КВАНТЫ И ФОТОЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ ЭФФЕКТ

Выпустив квантового джинна из бутылки, Макс Планк сам напугался его до смерти и предпочитал верить, что скопления энергии исходят не от самих световых волн, а от внутреннего строения атома, который может поглощать и излучать излучение только отдельными порциями в определенных количествах. Излучение похоже на масло: его можно купить или вернуть в магазин только в пачке определенного веса, например 180 граммов, хотя масло само по себе может существовать в любых количествах (впрочем, не меньше одной молекулы!).

Только через пять лет после первоначального предложения Планка квант света был признан физическим объектом, существующим независимо от механизма его излучения или поглощения атомами. Этот шаг был предпринят Альбертом Эйнштейном в статье, опубликованной в 1905 году, когда появилась его первая статья по теории относительности. Эйнштейн указал, что существование световых квантов, свободно передвигающихся в пространстве, представляет собой необходимое условие для объяснения эмпирических законов фотоэффекта, т.е. выход электронов из металлических поверхностей, облучаемых фиолетовыми или ультрафиолетовыми лучами.

* Физическое измерение квантовой постоянной h является произведением энергии и времени, или / эрг × сек / в единицах СГС, и известно в классической механике как действие; действие проявляется во многих важных подходах, таких как принцип наименьшего действия Гамильтона.

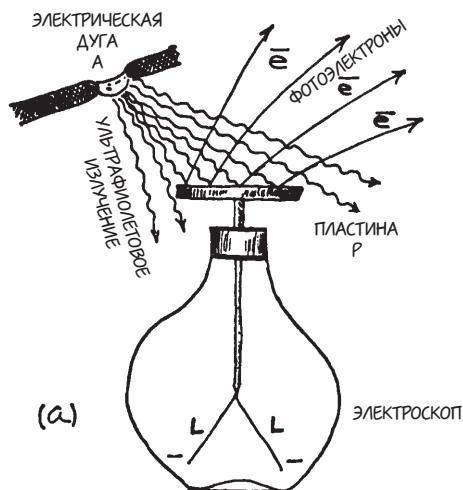


Рис. 6а. Экспериментальные исследования фотоэлектрического эффекта. На рис. 6а изображен простейший метод демонстрации фотоэлектрического эффекта. Ультрафиолетовое излучение, испускаемое электрической дугой, выталкивает электроны из металлической пластины, прикрепленной к электроскопу. Отрицательно заряженные листочки L , которые отталкивались друг от друга, теперь потеряли заряд и опустились. На рис. 6б показан современный метод.

Элементарное устройство для демонстрации фотоэлектрического эффекта, показанное на рис. 6а, состоит из обычного отрицательно заряженного электроскопа с прикрепленной к нему чистой металлической пластиной Р. Когда свет от электрической дуги А, который содержит фиолетовые и ультрафиолетовые лучи, падает на пластину, видно, что листочки L электроскопа опускаются, когда электроскоп теряет заряд. Американский физик Роберт Милликен (1868–1953) и другие ученые неоднократно демонстрировали, как отрицательные частицы (электроны) отделяются от металлической пластины. Если между дугой и металлической пластиной находится стеклянная пластина, которая поглощает ультрафиолетовое излучение, электроны не отделяются, что является убедительным доказательством того, что действие лучей вызывает их выход. Более сложное устройство, используемое для детального изучения законов фотоэффекта, схематически показано на рис. 6б. Оно состоит из:

1. Кварцевой или фторидной призмы (пропускающей ультрафиолетовые лучи) и щели, позволяющей выбрать монохроматическое излучение с желаемой длиной волны.
2. Набора вращающихся дисков с треугольными отверстиями различных размеров, позволяющих изменять интенсивность излучения.
3. Вакуумного контейнера, похожего на радиолампы, используемые в радиоприемниках. Изменяемый электрический потенциалложен к сетке С относительно пластины Р, которая испускает фотоэлектроны. Если сетка заряжена отрицательно и разность потенциалов между сеткой больше или равна кинетической энергии фотоэлектронов, выраженной в электронвольтах, ток не будет течь через систему. В противном случае возникнет ток, и его сила может быть измерена гальванометром GM.

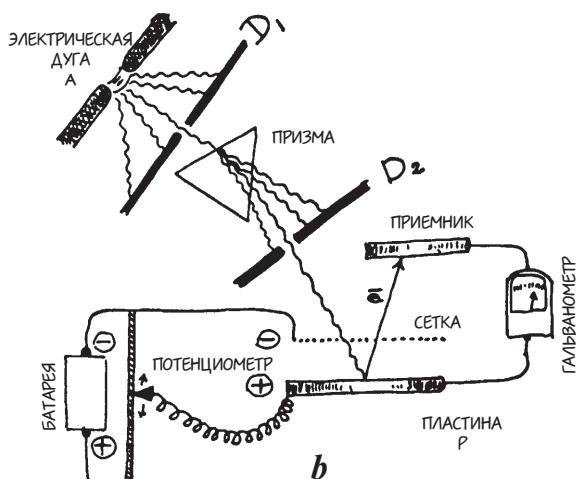


Рис. 6б. Ультрафиолетовое излучение от электрической дуги проходит через призму, позволяя попадать на пластину волнам только одной выбранной частоты. Поворачивая призму, можно выделить монохроматический световой луч и направить его на пластину. Энергия фотоэлектронов изменяется по их способности проходить от пластины к приемнику, двигаясь против электрической силы, создаваемой потенциометром между пластиной и сеткой.

Используя это устройство, можно измерить число и кинетическую энергию электронов, выбиваемых падающим светом любой заданной интенсивности и длины волны (или частоты).

Изучение фотоэлектрического эффекта в разных металлах позволило вывести два простых закона:

- I. Для света определенной частоты, но с переменной интенсивностью энергия фотоэлектронов остается постоянной, а их число увеличивается прямо пропорционально интенсивности света (рис. 7а).
- II. При изменяющейся частоте светового излучения фотоэлектроны не излучаются до тех пор, пока эта частота не превысит определенный предел v_0 , который различен для разных металлов. За пределами этого порога частоты энергия фотоэлектронов возрастает линейно, пропорционально разности между частотой падающего света и критической частотой v_0 металла (рис. 7б).

Эти общепризнанные факты не могли быть объяснены классической теорией света; в некоторых моментах они даже противоречили ей. Известно, что свет — это короткие электромагнитные волны, и увеличение интенсивности света должно означать увеличение амплитуды колеблющихся электрических и магнитных сил, распространяющихся в пространстве. Поскольку электроны, по-видимому, вырываются из металла под действием электрической силы, их энергия должна увеличиваться с увеличением интенсивности света, а не оставаться постоянной, как это происходит. Также, опираясь на классическую электромагнитную теорию света, нельзя было сделать вывод о линейной зависимости энергии фотоэлектронов от частоты падающего света. Используя идею Планка о световых квантах и предполагая, что они действительно существуют в виде независимых энергетических скоплений, перемещающихся в пространстве, Эйнштейн смог объяснить оба эмпирических закона фотоэффекта. Он представил элементарный акт фотоэлектрического эффекта как результат столкновения между одним квантом падающего света и одним из свободных электронов, участвующих в передаче электрического тока в металле. В этом столкновении квант света исчезает, отдавая всю свою энергию свободному электрону на металлической поверхности.

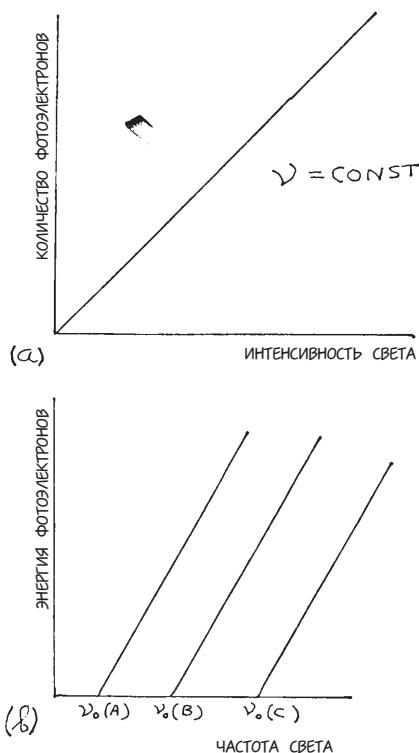


Рис. 7. Законы фотоэффекта. (а) число электронов изображено как функция интенсивности падающего монохроматического света. (б) энергия фотоэлектронов показана как функция частоты падающего монохроматического света для трех разных металлов: А, В и С.

Но чтобы покинуть поверхность металла и попасть в свободное пространство, электрон должен потратить определенное количество энергии, преодолевая притяжение ионов металла. Эта энергия, известная под немного сбивающим с толку названием «работа выхода», различна для разных металлов и обычно обозначается символом W . Таким образом, кинетическая энергия K , с которой фотоэлектрон выходит из металла, равна:

$$K = h(v - v_0) = hv - W^*,$$

* Все формулы в книге приведены в системе СГС (сантиметр-грамм-секунда). В широко используемой в быту системе СИ некоторые формулы выглядят несколько иначе.

где v_0 — критическая частота падающего излучения, и, если она ниже этого значения, фотоэлектрический эффект не возникает. Эта картина объясняет сразу два закона, полученных из эксперимента. Если частота падающего света сохраняется постоянной, то энергия каждого кванта остается неизменной, а увеличение интенсивности света приводит только к соответствующему увеличению количества световых квантов. Таким образом, выбрасывается больше фотоэлектронов, каждый из которых имеет ту же энергию, что и раньше. Формула, дающая K как функцию v , объясняет эмпирические графики, показанные на рис. 7б, и по ней легко понять, что наклон линии должен быть одинаковым для всех металлов и иметь числовое значение, равное h . Это следствие картины фотоэлектрического эффекта Эйнштейна полностью согласуется с экспериментом и не оставляет сомнений в реальности световых квантов.

ЭФФЕКТ КОМПТОНА

В 1923 году американский физик Артур Комpton провел важный эксперимент, доказывающий существование светового кванта: он хотел изучить столкновение светового кванта и электрона, свободно передвигающегося в пространстве. В идеале такие столкновения можно наблюдать, если пересечь световой и электронный лучи. К сожалению, количество электронов даже в самом интенсивном электронном луче, который можно было получить, было настолько мало, что столкновения пришлось бы ждать сотни лет.

Комpton решил проблему, используя рентгеновские лучи, кванты которых содержат очень большое количество энергии из-за очень высоких частот. По сравнению с энергией, содержащейся в рентгеновском кванте, энергия, связывающая электроны в атомах легких элементов, настолько незначительна, что можно ею пренебречь, и можно считать их (электроны) несвязанными и относительно свободными. Рассматривая свободное столкновение между квантами света и электроном так же, как и столкновение между двумя упругими шарами, можно ожидать, что энергия и, следовательно, частота рассеянных рентгеновских лучей будет

уменьшаться с увеличением угла рассеяния. Эксперименты Комptonа (рис. 8) полностью соответствовали этому теоретическому предположению и формуле, полученной на основе сохранения энергии и механического импульса при столкновении двух упругих сфер. Это соответствие дало дополнительное подтверждение существования световых квантов.

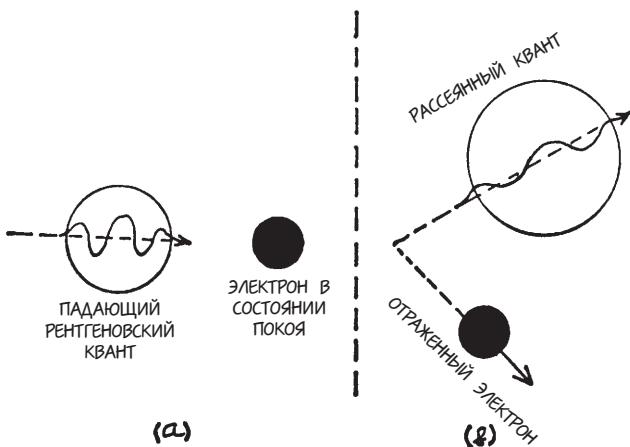


Рис. 8. Комптоновское рассеяние рентгеновских лучей. Обратите внимание, что после столкновения длина волны рентгеновского кванта увеличивается из-за передачи части энергии электрону.



Глава 2

Н. БОР И КВАНТОВЫЕ ОРБИТЫ

Открытие того факта, что свет распространяется в пространстве и может излучаться или поглощаться веществом только в виде отдельных квантов света, энергетическое содержание которых строго определяется частотой их колебаний, оказало огромное влияние на современное представление о структуре самих атомов. Когда в 1897 году Дж. Дж. Томсон с помощью прямых экспериментов доказал, что крошечные отрицательно заряженные частицы (электроны) могут быть извлечены из атомов, оставляя после себя положительно заряженные «остатки» (ионы), стало ясно, что атомы не таковы, как следует из их греческого названия — неделимые единицы, образующие вещество, — но, напротив, довольно сложные системы, состоящие из положительно и отрицательно заряженных частей.

Томсон представил, что атом образован каким-то положительно заряженным веществом, более или менее равномерно распределенным по всему его объему, с включениями отрицательно заряженных электронов — похоже на изюм в булке. Электроны притягиваются к центру распределения положительного заряда и отталкиваются друг от друга в соответствии с законом электри-

ческих взаимодействий Кулона, и нормальное состояние атома достигается, когда эти две группы противоположных сил находятся в равновесии. Если атом потревожить (или, как говорят физики, привести его в возбужденное состояние), столкнув его с другим атомом или проходящим мимо свободным электроном, его внутренние электроны (как струны в рояле) начнут колебаться вокруг своих положений равновесия и будут испускать световые волны характерных частот для данных линейчатых спектров. Атомы разных химических элементов обладают разным количеством по-разному распределенных внутренних электронов с разными характерными частотами и, следовательно, различаются по наблюдаемым оптическим спектрам (рис. 9). Если мы принимаем модель атома Томсона, то методами классической механики можно рассчитать равновесное распределение электронов в теле атома, содержащего заданное количество внутренних электронов, и тогда можно предположить, что группы вычисленных характерных частот колебаний будут совпадать с наблюдаемыми линейчатыми спектрами различных элементов.

Сам Томсон и его ученики провели сложные вычисления, чтобы найти конфигурации межатомных электронов, для которых рассчитанные частоты колебаний должны совпадать с наблюдаемыми частотами в линейчатых спектрах различных химических элементов. Результаты их расстроили.

Теоретически рассчитанные спектры, основанные на модели Томсона, совсем не похожи на спектры химических элементов, которые мы наблюдаем в реальности. Становилось все более очевидным, что классическая модель атома Томсона требует кардинальных изменений. Эту мысль особенно подчеркивал молодой датский физик Нильс Бор, который, получив степень доктора наук в Университете Копенгагена за статью по теории прохождения заряженных частиц через вещество, прибыл в 1911 году в Кавендишскую лабораторию Кембриджского университета в Англии, чтобы присоединиться к группе, работающей под руководством Дж. Дж. Томсона. Бор утверждал, что, поскольку свет больше не должен рассматриваться как непрерывно распространяющиеся волны, а должен быть наделен таинственными дополнительными свойствами излучения и поглощения, так как представляет собой отдельные скопления энергии определенных размеров, классическая ньютоновская механика, на которой основана атомная мо-

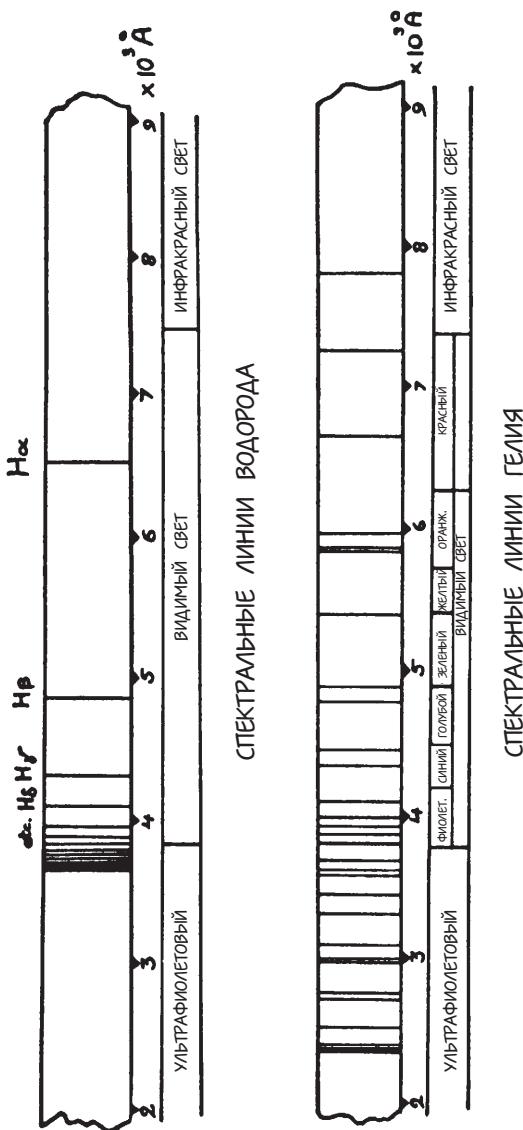


Рис. 9. Сравните, насколько просто выглядит водородный спектр, производимый движением лишь одного электрона, и каким сложным и даже беспорядочным кажется спектр гелия, получившийся от двух электронов. Оба спектра уходят гораздо дальше в ультрафиолетовую и инфракрасную области, чем это показано на рисунке.

дель Томсона, должна быть соответственно изменена. Если электромагнитная энергия излучения «квантуется», то есть существует «порционно»: состоит из одного, двух, трех или более световых квантов ($h\nu$, $2h\nu$, $3h\nu$ и т.д.) — не разумно ли предположить, что механическая энергия атомных электронов также квантуется и что она может принимать только определенный набор значений, а промежуточные значения невозможны в силу какого-то пока не открытого закона природы? И действительно, было бы странно, если бы атомные системы, построенные в соответствии с законами классической ньютоновской механики, какой и являлась атомная модель Томсона, излучали и поглощали свет в виде световых квантов Планка, которые вообще не вписываются в рамки классической физики!

ТЕОРИЯ ЯДЕРНОЙ МОДЕЛИ АТОМА РЕЗЕРФОРДА

Дж. Дж. Томсон не одобрял эти революционные идеи молодого датчанина. Ряд острых споров заставили Бора покинуть Кембридж и провести оставшееся время по программе обмена там, где его пока что расплывчатые идеи о квантовании движения электронов в атоме встретили бы меньшее сопротивление.

Его выбор пал на Манчестерский университет, где кафедрой физики заведовал новозеландец из семьи фермеров, бывший ученик Томсона, Эрнест Резерфорд, позже получивший титул «сэр», а затем именуемый «пэр Англии барон Резерфорд Нельсон» за свои научные открытия. Когда Бор прибыл в Манчестер, там уже начались эпохальные исследования внутренней структуры атомов путем их обстреливания снарядами с высокой энергией, известными как « α -частицы», которые испускались вновь открытыми тогда радиоактивными элементами. В более ранних исследованиях, проводившихся в основном в Университете Макгилла в Канаде, Резерфорд смог доказать, что α -частицы, испускаемые радиоактивными элементами, являются не чем иным, как положительно заряженными атомами гелия, движущимися с чрезвычайно высокими скоростями, никогда ранее не встречавшимися в физике. Излучение α -частиц от нестабильных тяжелых атомов радиоактивных элементов часто сопровождалось испусканием электронов (β -частиц) и высокочастотного электромагнитного излучения

(γ -лучей), аналогичного обычному рентгеновскому излучению, но имеющего гораздо более короткую длину волны.

Если мы хотим что-то взломать, мы, конечно же, выберем в качестве метательного снаряда тяжелый железный шар, а не шарик для пинг-понга, и Резерфорд полагал, что массивные α -частицы гораздо легче проникнут внутрь атома, чем легкие β -частицы. Механизм был довольно прост (рис. 10). Небольшое количество радиоактивного материала, например радия, испускающего α -частицы, положили на булавочную головку и разместили на определенном расстоянии от тонкой фольги (F), изготовленной из металла, являющегося объектом исследования. После того как луч проходил через диафрагму (D), формировался тонкий пучок α -частиц.

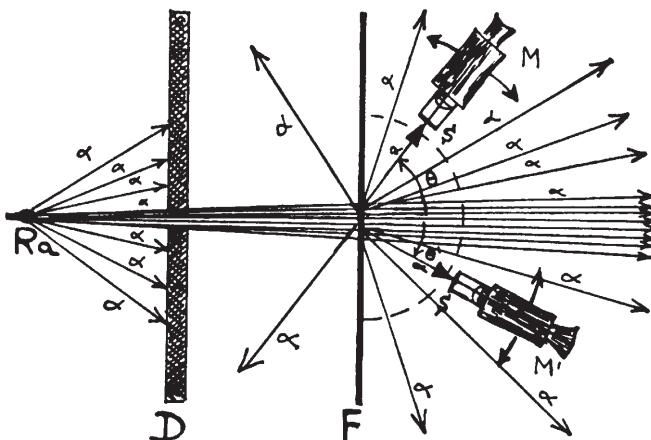


Рис. 10. Устройство Резерфорда для изучения угловой зависимости рассеяния α -частиц.

Проходя через фольгу, α -частицы сталкивались с входящими в ее состав атомами, и некоторое количество частиц рассеивалось в разных направлениях по ту сторону фольги. Падая на флуоресцентный экран (S), помещенный за фольгой, каждая α -частица производила небольшую искру (сцинтиляцию) в точке столкновения. Наблюдая за этими сцинтиляциями через микроскоп (M), можно было подсчитать количество частиц, рассеянных под различными углами от первоначального направления, так же, как при стрельбе по мишени из огнестрельного оружия можно измерить, на каком расстоянии отверстие от пули находится от центра.

В своих экспериментах Резерфорд заметил, что, хотя большинство частиц проходили сквозь фольгу почти без отклонений, образуя люминесцентное пятно (центр мишени) напротив отверстия диафрагмы, некоторые были разбросаны под довольно значительным углом. Несколько изменив условия эксперимента, он увидел, что в некоторых случаях α -частицы отталкиваются практически в обратном направлении, к источнику излучения.

Это наблюдение противоречило концепции модели атома Томсона. Проходя через атом, падающая α -частица может быть отклонена от первоначальной траектории либо электрическим притяжением межатомных электронов, либо электрическим отталкиванием распределенного положительного заряда. Взаимодействие α -частиц с электронами, которые почти в 10 000 раз легче их, безусловно, не может привести к заметному отклонению в движении α -частиц. С другой стороны, положительно заряженное вещество в модели Томсона распределено слишком тонким слоем по всему телу атома, чтобы вызвать какое-либо заметное отклонение проходящих через него α -частиц. Действительно, если мы бросим железный шар в кусок угля, он отскочит от него под странным углом, возможно, разбив уголь на несколько частей. Но если мы измельчим этот же кусок угля в порошок и бросим тот же самый шар через образовавшееся облако угольной пыли, он пролетит без какого-либо отклонения. Очень большие отклонения, которые мы наблюдали в экспериментах Резерфорда по рассеянию, определенно доказали, что положительный заряд атома (связанный с большей частью массы) не распределен по всему его объему, как в предыдущем примере облака угольной пыли, но концентрируется, как твердый кусок угля, в небольшом крепком орешке — ядре. Наблюданная в эксперименте зависимость числа α -частиц, разбросанных в разных направлениях от угла рассеяния, находилась в полном согласии с теоретической формулой рассеяния частиц, движущихся в поле отталкивающей центральной силы, значение которой обратно пропорционально квадрату расстояния.

Так появилась модель атома Резерфорда: с ее легкими отрицательно заряженными электронами, движущимися в свободном пространстве вокруг положительно заряженного тяжелого ядра в центре, чем-то напоминающая Солнечную систему. Поскольку закон электрического притяжения Кулона математически идентичен закону тяготения Ньютона (обе силы обратно пропорцио-

нальны квадрату расстояния), атомные электроны движутся вокруг ядра вдоль круговой или эллиптической орбиты так же, как и планеты вокруг Солнца.

Но есть одно большое отличие, которое заключается в том, что, хотя Солнце и планеты электрически нейтральны, атомное ядро и электроны несут большие электрические заряды. Хорошо известно, что колеблющиеся электрические заряды создают расходящиеся электромагнитные волны. Атомную модель Резерфорда можно считать миниатюрной радиовещательной станцией, работающей на сверхвысокой частоте. Используя классическую теорию электромагнитной эмиссии, можно легко вычислить, что световые волны, испускаемые электронами, окружающими атомное ядро, вынесут всю энергию электронов в пространство в течение приблизительно стомиллионной доли секунды. Потеряв всю свою энергию, атомные электроны провалятся в ядро, и атом перестанет существовать!

Строго говоря, подобные потери энергии ожидаются и в случае с планетами Солнечной системы. Согласно Общей теории относительности Эйнштейна, колебание гравитирующих масс также испускает так называемые гравитационные волны, которые отнимают энергию.

Но из-за малого значения постоянной Ньютона потери энергии планет в результате гравитационного излучения чрезвычайно малы, и, поскольку они образовались около четырех или пяти миллиардов лет назад, планеты не могли потерять хоть сколько-нибудь значимое количество своей первоначальной энергии.

КВАНТОВАНИЕ МЕХАНИЧЕСКИХ СИСТЕМ

Что же делать с атомами, построенными по модели Резерфорда? Теоретически, как мы уже говорили, они не могут существовать дольше ста миллионных долей секунды, но в действительности они существуют вечно. Этот вопрос встал перед молодым Бором по прибытии в Манчестер. Ошеломляющие противоречия такого рода между теоретическими ожиданиями с одной стороны и наблюдаемыми фактами (или даже здравым смыслом) с другой — главные факторы развития науки. Неспособность А. Майкельсона обнаружить движение Земли относительно светоносного эфира* привела

* См. книгу Бернарда Джейффа «Майкельсон и скорость света».

к открытию Эйнштейном теории относительности, которая изменила наши обычные представления о пространстве и времени и классическую физику в принципе. Точно так же «ультрафиолетовая катастрофа», рассмотренная в предыдущей главе, привела Планка к совершенно новой идеи световых квантов.

Теоретическая невозможность экспериментально доказанной модели атома Резерфорда перекликалась с закрвавшимися у Бора ощущениями, что, если электромагнитная энергия квантуется, механическая энергия скорее всего тоже, хотя, возможно, и несколько другим способом. Фактически, когда возбужденный атом излучает квант света с энергией $\hbar\nu$, его механическая энергия должна уменьшаться именно на эту величину. Поскольку атомные спектры состоят из серии отдельных, четко определенных линий, разности энергий между различными возможными состояниями атома также должны иметь четко определенные значения, как и абсолютные энергии самих этих состояний. Это наталкивает на мысль о том, что атомный механизм чем-то похож на автомобильную коробку передач. Можно включить 1-ю передачу, 2-ю, 3-ю передачу и т.д., но никогда $1\frac{1}{2}$ или $3\frac{3}{5}$ передачу.

Пусть E_1, E_2, E_3, E_4 и т.д. — возможные значения энергии различных состояний атома, расположенные в порядке возрастания (рис. 11). У атома всегда есть некоторая внутренняя энергия, но когда эта энергия падает до минимально возможного уровня, E_1 , никакое ее количество не может быть использовано для испускания кванта света.

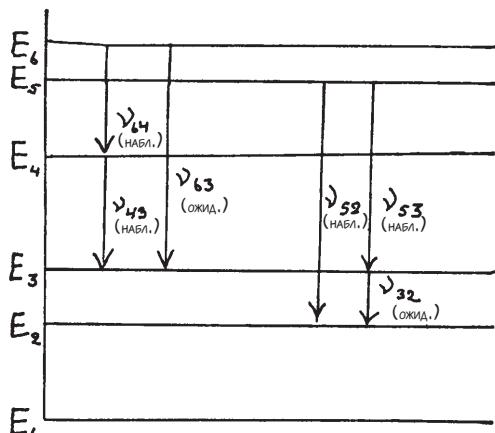


Рис. 11. Объяснение Бором правила Ридберга.

Этот уровень E_1 является нормальным или основным состоянием атома, в котором он может существовать вечно. Это получило название нулевой энергии, и в случае с осциллятором составляет $\frac{1}{2}hv$. Предположим теперь, что атом приведен в возбужденное состояние с некоторой более высокой энергией E_n . Энергия может быть достигнута, например, путем воздействия на газ очень высокой температуры, как в атмосфере Солнца, где атомы приводятся в возбужденное состояние посредством сильных тепловых столкновений между собой. Другой способ привести атомы в возбужденное состояние — пропустить электрический разряд высокого напряжения через стеклянную трубку, заполненную разреженным газом*.

Атомы возбуждаются от удара быстрых электронов, проносящихся через трубку от отрицательного электрода (катода) к положительному (аноду). Такие устройства, в которых газ начинает светиться при прохождении электрического разряда высокого напряжения, были первоначально известны как трубы Гейслера, названные так в честь своего изобретателя — Генриха Гейслера. Сегодня вы видите их повсюду: в светящихся уличных вывесках и других осветительных приборах.

Когда атом возбуждается до энергетического состояния E_m , он может вернуться в состояние с более низкой энергией E_n ($n < m$), высвободив излишки энергии в виде кванта света. Теперь мы можем сказать:

$$\hbar v_{m,n} = E_m - E_n,$$

или

$$v_{m,n} = \frac{E_m - E_n}{\hbar}$$

Два индекса в $v_{m,n}$ указывают, что эта конкретная частота в спектре соответствует переходу из квантового состояния движения m в квантовое состояние n .

* Необходимо использовать разреженный газ, чтобы дать электронам достаточные промежутки времени между столкновениями, для восстановления энергии, потерянной при каждом столкновении, за счет ускорения во внешнем электрическом поле. При нормальном атмосферном давлении газы не проводят электричество, и как только напряжение становится очень высоким, происходит внезапный пробой в форме искры.

Эта картина испускания световых квантов в результате перехода атома из состояния с более высокой энергией в состояние с более низкой энергией имеет очень интересное следствие.

Предположим, что в спектре некоторого элемента наблюдают-ся две линии, соответствующие переходу из 6-го квантового со-стояния в 4-е и из 4-го в 3-е (левая сторона на рис. 11). Тогда возмож-но, что переход может произойти прямо из 6-го состояния в 3-е, и мы находим линию с частотой

$$\nu_{6,3} = \nu_{6,4} + \nu_{4,3}$$

Ситуация, показанная на правой стороне того же рисунка, противоположна. Из того факта, что мы наблюдаем частоты $\nu_{5,2}$ и $\nu_{5,8}$, следует, что мы также можем наблюдать частоту

$$\nu_{3,2} = \nu_{5,2} - \nu_{5,3}$$

Швейцарский спектроскопист В. Ритц открыл этот закон сло-жения и вычитания, когда Нильс Бор еще был школьником. Од-нако в доквантовой спектроскопии правило Ритца и другие подоб-ные числовые закономерности между наблюдаемыми частотами были лишь непонятными головоломками, которые нельзя было объяснить рационально. Тем не менее они оказались очень по-лезными для Нильса Бора в его попытках решить проблему излу-чения и поглощения света атомами путем введения идеи дискрет-ных квантовых состояний атомных электронов.

Для своих первых исследований Бор выбрал атом водорода, самый легкий и, по-видимому, самый простой по строению атом, который, как известно, также обладал очень простым спектром. В 1885 году швейцарский школьный учитель Дж. Дж. Балмер, ко-торый интересовался закономерностями линий атомных спектров, обнаружил, что частота видимой части водорода может быть с боль-шой точностью представлена очень простой формулой. Частоты этих линий, показанные на рис. 9 сверху (где они показаны отно-сительно длины волн $\lambda = c/v$), приведены в следующей таблице:

$$\begin{aligned} H_\alpha \times \nu_1 &= 4,569 \times 10^{14} \text{ сек}^{-1}* \\ H_\beta \times \nu_2 &= 6,168 \times 10^{14} \text{ сек}^{-1} \end{aligned}$$

* сек^{-1} значит «в секунду»; см^{-1} значит «на сантиметр»; яблоки \times доллары $^{-1}$ значит «яблок за доллар».

$$\begin{aligned} H_{\gamma} \times v_3 &= 6,908 \times 10^{14} \text{ сек}^{-1} \\ H_{\delta} \times v_4 &= 7,310 \times 10^{14} \text{ сек}^{-1} \end{aligned}$$

Читатель сам может убедиться, что эти числа можно получить при помощи формулы:

$$v_{m,n} = 3,289 \times 10^{15} \left(\frac{1}{4} - \frac{1}{m^2} \right) \text{ сек}^{-1},$$

где m принимает значения: 3, 4, 5, 6*.

Для больших значений m частоты попадают в ультрафиолетовую область, и линии становятся все более и более плотно расположеными, сходясь к значению

$$3,289 \times 10^{15} \times \frac{1}{4} = 6,225 \times 10^{14} \text{ сек}^{-1}.$$

В контексте представлений Бора о соотношении излучаемых световых квантов $h\nu_{m,n}$ и энергетических состояний E_m и E_n (или уровней) атома формула Бальмера говорит нам о том, что m -я линия серии обусловлена переходом от m -ого состояния возбужденного атома водорода во второе состояние (так как $4 = 2^2$). Если в формуле Бальмера заменить $\frac{1}{4} = \frac{1}{2^2}$ на $1 = \frac{1}{1^2}$ и брать значения $m = 2, 3, 4$ и т.д., получается последовательность линий, которые попадают в дальнюю ультрафиолетовую область и фактически были обнаружены Теодором Лайманом. Если же сперва в формулу Бальмера подставим: $\frac{1}{9} = \frac{1}{3^2}$ или $\frac{1}{16} = \frac{1}{4^2}$, то по изначальной формуле получаем частоты света, которые попадают в дальний инфракрасный диапазон и были обнаружены Фридрихом Пашеном и Фредериком Брэкеттом соответственно. Таким образом, механические квантовые состояния должны выглядеть так, как показано на рис. 12, что также указывает на переходы, приводящие к излучению серий Лаймана, Бальмера, Пащена и Брэкетта.

Таким образом, каждая линия во всем спектре характеризуется двумя индексами m и n двух квантовых уровней, между которыми происходит переход (начиная с m -го и заканчивая n -м).

* Числовой коэффициент в приведенной выше формуле обычно обозначается буквой R и известен как постоянная Ридберга, хотя его было бы корректнее называть постоянной Бальмера.

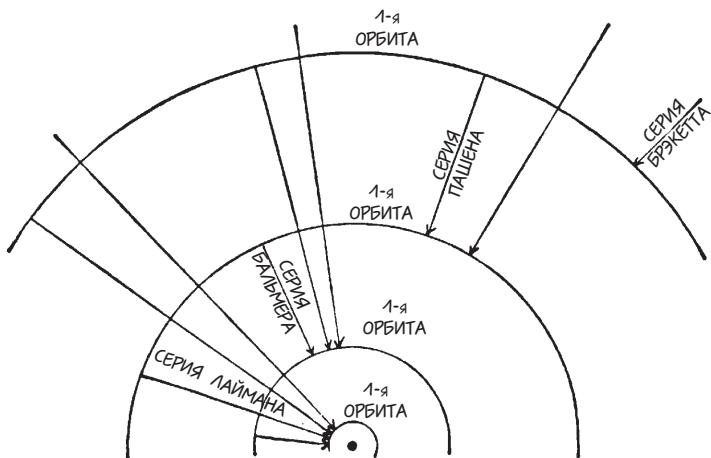


Рис. 12. Исходная модель атома водорода Бора. Серия Лаймана находится в ультрафиолетовой части спектра, серия Бальмера — в видимой части спектра. Серии Пашена и Брэкетта — в инфракрасном диапазоне.

Поскольку энергия кванта света равна разности энергий между состоянием, при котором он появился, и состоянием при котором исчез, обобщенную формулу Бальмера следует переписать так:

$$h_{m,n} = Rh \left[\left(-\frac{1}{m^2} \right) - \left(-\frac{1}{n^2} \right) \right] \text{ или } h\nu_{m,n} = \left(-\frac{Rh}{m^2} \right) - \left(-\frac{Rh}{n^2} \right),$$

где две величины в скобках представляют энергетические уровни E_m и E_n . Причина записи этих энергий в виде отрицательных величин заключается в том, что обычно нулевую энергию приписывают состоянию системы, когда все ее части находятся на бесконечном расстоянии друг от друга. Таким образом, если энергия системы положительна, она не будет сохраняться как одно целое, и все ее компоненты разлетятся. В стабильной системе, вроде системы планет, вращающихся вокруг Солнца, или электронов, вращающихся вокруг атомного ядра, энергия отрицательна, и для разделения системы потребуется источник энергии извне.

Чтобы объяснить значения энергии различных состояний атома водорода, как указано в приведенной выше формуле, Бор поставил два упрощающих условия:

1-е: атом водорода, являющийся самым простым атомом всей периодической системы элементов, содержит только один электрон.

2-е: разные квантовые состояния атома водорода соответствуют движению этого электрона по круговым орбитам с разными радиусами.

Следуя этим условиям, можно найти квантовые орбиты электронов из соотношения:

$$E_n = -\frac{R\hbar}{n^2}.$$

Рассмотрим орбитальное движение электрона в n -м возбужденном состоянии атома водорода и запишем r_n и v_n для радиуса и орбитальной скорости электрона в n -м состоянии. Масса электрона равна m_e , а его заряд $-e$, тогда как заряд ядра (в данном случае протона) равен $+e$. Условием кругового движения электрона является то, что электростатическая сила притяжения $-\frac{e^2}{r^2}$ уравновешивается центробежной силой $+\frac{mv^2}{r}$.

Из равенства

$$-\frac{e^2}{r^2} + \frac{m_e v^2}{r} = 0$$

следует:

$$v = \frac{e}{\sqrt{m_e r}}.$$

Получаем скорость v электрона, необходимую для его движения по окружности радиуса r .

Согласно этому уравнению классической механики, электрон может двигаться по любой круговой орбите, если он имеет необходимую скорость.

Каким же является квантовое условие, которое дает только орбиты с энергиями $E_n = -\frac{R\hbar}{n^2}$?

В квантовой теории излучения, описанной в предыдущем разделе, мы указали, что колебания с заданной частотой v могут иметь энергию только одного, двух, трех или более световых квантов, так что $E_n = nhv$ ($n = 1, 2, 3$ и т.д.). Мы можем переписать это в виде:

$$\frac{E_n}{v} = -nh.$$

Это означает, что величина $\frac{E_n}{v}$ может быть только кратной квантовой постоянной h . Здесь можно упомянуть, что физическая размерность h — это:

$$[\text{действие}] = \frac{[\text{энергия}]}{[\text{частота}]} = \frac{[\text{масса}] \times [\text{скорость}]^2}{[\text{частота}]} = \frac{[\text{масса}] \times [\text{длина}]^2}{[\text{время}]^{-1} \times [\text{время}]^2} = \\ = [\text{масса}] \times \frac{[\text{длина}]}{[\text{время}]} \times [\text{длина}] = [\text{масса}] \times [\text{скорость}] \times [\text{длина}]$$

Произведение массы частицы на ее скорость и расстояние, которое она проходит, есть хорошо известная величина, называемая действием, и играет важную роль в классической аналитической механике. Например, «принцип наименьшего действия», сформулированный французским математиком П. Л. М. де Мопертюи в 1747 г., утверждает, что частица, подвергнутая действию силы, будет перемещаться из точки А в точку В по траектории, для которой «суммарное действие» от А до В будет либо наименьшим, либо наибольшим из всех других возможных траекторий между этими двумя точками. Закон световых квантов Планка добавляет к принципу Мопертюи дополнительное условие: общее действие всегда должно быть кратно h .

В случае замкнутой круговой траектории движения электрона вокруг ядра квантовое условие потребует, чтобы произведение массы электрона, его скорости и расстояния, пройденного за один оборот, было кратно h . Таким образом, для n -й орбиты Бора получим:

$$m_e \times v_n \times 2\pi r_n = nh$$

$$m_e \times \frac{e}{\sqrt{m_e r_n}} \times 2\pi r_n = 2\pi e \sqrt{m_e} \sqrt{r_n} = nh$$

$$\text{или } r_n = \frac{h^2}{4\pi^2 e^2 m_e} \times n^2$$

Теперь мы вычислим полную энергию E_n электрона на n -й орбите, которая является суммой его кинетической энергии K и потенциальной энергии U . Используя выражение для скорости $v = e/\sqrt{m_e r}$ показанное ранее, и помня, что потенциал энергии двух зарядов $+e$ и $-e$, расположенных на расстоянии r друг от друга, равна $+e^2/r$, мы пишем:

$$E_n = K_n + U_n = \frac{1}{2} m_e \frac{e^2}{m_e r_n} + \frac{e^2}{r_n} = \frac{1}{2} \frac{e^2}{r_n} - \frac{e^2}{r_n} = -\frac{1}{2} \frac{e^2}{r_n}.$$

Подставляя в это выражение вместо r_n результат из предыдущей формулы, получим:

$$E_n = -\frac{4\pi^2 e^4 m_e}{h^2} \times \frac{1}{n^2},$$

что совпадает с эмпирическим выражением

$$E_n = -\frac{Rh}{n^2},$$

полученным из формулы Бальмера, если написать:

$$R = \frac{4\pi^2 e^4 m_e}{h^3}.$$

Когда Бор подставил в это выражение числовые значения e , m_e и h , он получил $R = 3,289 \times 10^{15}$ сек⁻¹, что в точности соответствует его эмпирическому значению, полученному путем спектроскопического наблюдения. Таким образом, проблема квантования механической системы была успешно решена.

ЭЛЛИПТИЧЕСКИЕ ОРБИТЫ ЗОММЕРФЕЛЬДА

За статьей Бора об атоме водорода вскоре последовала статья немецкого физика Арнольда Зоммерфельда, который применил идеи Бора к эллиптическим орбитам. Движение частицы в поле центральной силы, как правило, характеризуется двумя (полярными) координатами: расстоянием r от центра притяжения и полярным углом (азимутом) ϕ относительно большой оси эллипса, как указано на рисунке (рис. 13); r имеет максимальное значение, когда $\phi = 0$, уменьшается до минимального значения при $\phi = \pi$ и снова увеличивается до своего максимального значения при $\phi = 2\pi$. Таким образом, в отличие от круговых орбит Бора, где r остается постоянным и изменяется только ϕ , движение по эллиптическим орбитам Зоммерфельда характеризуется двумя независимыми координатами, r и ϕ . Отсюда следует, что каждая квантованная эллиптическая орбита должна характеризоваться двумя квантовыми числами: азимутальным квантовым числом n_ϕ и радиальным квантовым числом n_r . Применяя квантовые условия Бора, согласно которым суммарные механические воздействия для азимутальной и радиальной составляющих движения должны быть кратными n_ϕ , n_r и h , Зоммерфельд получил формулу для энергии квантованного эллиптического движения:

$$E_{n_\phi, n_r} = -\frac{Rh}{(n_\phi + n_r)^2}.$$

Это абсолютно то же самое, что и изначальная формула Бора, за исключением того, что вместо квадрата целого числа знаменатель представляет собой квадрат суммы двух произвольных целых чисел, который, конечно же, является произвольным целым числом. Если $n_r = 0$, перед нами, в качестве частного случая, круговые орбиты Бора. Если $n_r \neq 0$, мы получим эллиптические орбиты с различной степенью эллиптичности. Но энергии всех орбит, соответствующих одной и той же сумме $n_\phi + n_r$, абсолютно одинаковы, несмотря на их различные формы. Сумма $n_\phi + n_r$, которую обычно обозначают как просто n , называется главным квантовым числом.

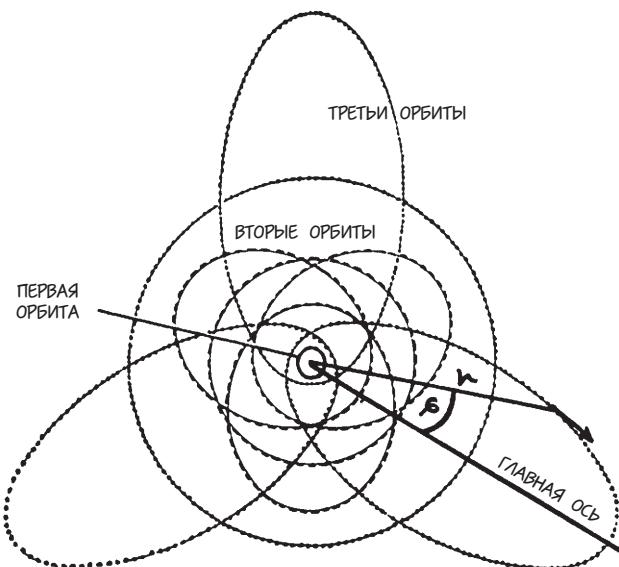


Рис. 13. Круговые и эллиптические квантовые орбиты в атоме водорода. Первая круговая орбита (сплошная линия) соответствует самой низкой энергии электрона. Следующие четыре орбиты, одна круглая и три эллиптические (пунктирные линии), соответствуют одной и той же энергии, которая выше, чем на первой орбите. Следующие девять орбит (линии с более мелким пунктиром), из которых только четыре показаны на рисунке, соответствуют еще более высокой энергии (одинаковой для всех девяти).

Здесь можно отметить, что релятивистский подход к атому водорода дает несколько иной результат, потому что масса частицы в соответствии с механикой Эйнштейна увеличивается с ее скоростью, приближаясь к бесконечному значению, когда скорость приближается к скорости света c . На самом деле, если m_0 — это «масса покоя» частицы (в сущности, ее масса, когда она движется гораздо медленнее, чем свет), масса с гораздо более высокой скоростью v определяется как:

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

которая стремится к бесконечности, когда v приближается к c . Так как при эллиптическом движении скорость изменяется для разных точек траектории (второй закон Кеплера), масса электрона также изменяется, и вычисления становятся более сложными. В этом случае энергии разных орбит, соответствующих одному и тому же главному квантовому числу, уже слегка отличаются, и один уровень распадается на несколько близко расположенных компонентов.

Соответственно, одна спектральная линия, возникающая в результате переходов между двумя квантовыми уровнями, характеризующимися двумя главными квантовыми числами m и n , распадается на ряд компонентов. Это расщепление, которое можно наблюдать только с помощью спектрального анализатора с очень высокой разрешающей способностью, известно как «тонкая структура» спектральных линий. Различия в частотах между компонентами тонкой структуры зависят от так называемой постоянной тонкой структуры α , которую можно вычислить следующим образом:

$$\alpha = \frac{e^2}{hc} = \frac{1}{137}.$$

Эта величина не имеет физической размерности: она — безразмерная величина, а ее малость объясняет близость компонентов тонкой структуры. Если бы c было бесконечно, а было бы нулем, и никакой тонкой структуры вообще бы не наблюдалось.

Теория Бора вновь получила развитие, когда выяснилось, что эллиптическая орбита Зоммерфельда не обязательно должна быть

в одной плоскости, но может иметь разную ориентацию в пространстве, в результате чего атомы с большим количеством электронов, движущихся по множеству различных орбит, выглядят не как плоские диски (как в нашей Солнечной системе), а, скорее, как трехмерные тела.

ИНСТИТУТ НИЛЬСА БОРА

После триумфального возвращения Бора в Данию Королевская датская академия наук оказала ему финансовую поддержку, чтобы он смог построить собственный институт атомных исследований и предоставить стипендии молодым физикам-теоретикам со всех уголков мира, которые хотели приехать в Копенгаген, чтобы работать с ним. Так на улице Блэгдамсвей, 15* и возникло здание Института теоретической физики, а рядом с ним — дом директора Бора и его семьи.

Нельзя не упомянуть тот факт, что Королевская датская академия наук получает основную финансовую поддержку от Карлсбергской пивоварни, которая производит лучшее пиво в мире. Много лет назад основатель пивоварни завещал доход от нее в пользу академии, средства должны были пойти на развитие науки, также в его завещании было указано, что роскошный особняк, который старик Карлсберг построил для себя прямо посреди своего пивного завода, теперь предоставляется в качестве резиденции самому известному из ныне живущих датских ученых.

Когда Бор обрел известность, а прежний хозяин особняка умер в начале тридцатых годов, Бор переселился в него вместе со своей семьей. На рис. 14 можно увидеть зарисовку галстука с изображением бутылки пива «Карлсберг», который был сделан к юбилею известного датского биохимика Линнерстрём-Ланга, который много лет был директором исследовательской лаборатории Карлсбергского пивоваренного завода.

Это важный символ для всех, кто получал стипендию Карлсберга, работая в Институте Бора.

* Официальный адрес института с тех пор был изменен на Блэгдамсвей, 17.



Рис. 14. Пиво Карлсберг и его последствия.

Институт Бора быстро стал мировым центром квантовой физики, и, пользуясь известной фразой древних римлян, можно было смело заявить: «Все дороги ведут в Бледгамсвей, 17». Институт был похож на улей, гудящий от работы молодых физиков-теоретиков и их новых идей об атомах, атомных ядрах и квантовой теории в целом. Популярность института была обусловлена как гением его директора, так и его сердечностью, можно сказать, отеческой добротой. В то время как еще один гений той эпохи, Альберт Эйнштейн, будучи также очень добрым человеком, никогда не создавал вокруг себя никаких «школ», а работал, как правило, только с одним помощником, Бор «вырастил» не одного ученика. Почти в каждой стране мира есть физики, которые с гордостью говорят: «Мне довелось поработать с Бором». Посетив одна-

жды Геттингенский университет, Бор встретил молодого немецкого физика Вернера Гейзенberга (см. главу 5), который в возрасте двадцати пяти лет уже сделал важный вклад в области квантовой механики. Бор предложил Гейзенбергу приехать в Копенгаген, чтобы поработать с ним.

На следующий день на обеде, организованном в честь Бора в университете, двое немецких полицейских в форме прервали трапезу, и один из них, положив руку на плечо Бора, объявил: «Вы арестованы по обвинению в похищении маленьких детей!» Конечно, «полицейские» были на самом деле двумя переодетыми студентами, и Бор не отправился в тюрьму, зато Гейзенберг отправился в Копенгаген! Многие физики-теоретики из Европы и Америки ездили в Копенгаген на год, два или более, и впоследствии возвращались снова и снова: П. Дирак (см. главу 6) и Н. Мотт (ныне директор Кавендишской лаборатории) из Англии; Х. Крамерс и Х. Казимир из Голландии; Вольфганг Паули (глава 3), Вернер Гейзенберг (глава 5), М. Дельбрюк (см. Приложение) и Карл фон Вайцзеккер из Германии; Л. Розенфельд из Бельгии; С. Росселанд из Норвегии; О. Клейн из Швеции; Г. Гамов и Л. Ландау из России; Р. Толмен, Дж. Слейтер и Роберт Оппенгеймер из США; Ё. Нишина из Японии; и т.д. Одни приезжали ненадолго, другие оставались на длительный срок, третьи просто посещали конференции, которые проводились каждую весну.

Одним из самых ярких посетителей был Пауль Эренфест, профессор Лейденского университета. Эренфест родился в Вене в 1880 году и учился у Больцмана, получил докторскую степень в 1904 году. В тот год он женился на Татьяне, математике из России, и они переехали в Санкт-Петербург, где оставались до 1912 года, когда его пригласили на кафедру физики в Лейденском университете. Он оставался там до своей смерти в 1933 году. Его работы по статистической механике и теории адиабатических инвариантов слишком абстрактны и сложны, чтобы описывать их в этой книге, но он был бесценным участником всех научных собраний из-за его глубоких познаний в физике и критического мышления, которые помогли ему найти нестыковки (иногда ложные) в новой теории. Он любил называть себя «школьным учителем», и многие из его учеников действительно преуспели в своей последующей научной карьере.

Однажды, когда я* ехал из Дании в Англию через Голландию, Эренфест пригласил меня остаться в его доме на несколько дней. Он встретил меня на вокзале, привел к себе домой и, показав гостевую комнату, в которой я должен был спать, сказал: «Здесь не курят. Если вы хотите курить, идите на улицу».

В то время я курил почти столько же, сколько и сейчас, поэтому я обошел его правило: отодвинул заслонку голландской печи в моей комнате, и дымил прямо туда. Он ненавидел любой запах, кроме свежего воздуха. Однажды его ученик Казимир (сейчас научный директор радиокомпании «Филипс») назначил ему встречу во второй половине дня. Перед встречей Кас (сокращение от Казимира, что по-голландски означает «сыр») пошел в парикмахерскую, чтобы подстричься, и слишком поздно заметил, что парикмахер втирает лосьон в его светлые волосы. Все два часа до встречи с Эренфестом ему пришлось потратить, прогуливаясь по улицам, чтобы запах лосьона выветрился. И, конечно же, никто не посмел бы сказать Эренфесту, что голландский Болс лучше (или хуже) английского джина!

В любительской пьесе «Бледдамсвей Фауст», известной среди ученых, Эренфест сыграл роль Фауста, которого соблазняет Мефистофель (Паули), показывая ему видение Гретхен (нейтино).

Личность Нильса Бора и радости его жизни и работы в институте до сих пор свежи в моих воспоминаниях (начиная с 1928 года и до конца его жизни), и я надеюсь, что одна-две истории из его жизни помогут читателю сформировать хотя бы общее представление о личности этого замечательного человека.

После сдачи комплексного экзамена в Ленинградском университете весной 1928 года мне удалось получить разрешение от советского правительства на двухмесячное пребывание в летней школе в Геттингенском университете. В то время идея «пролетарских» и «капиталистических» наук, враждующих между собой, еще не сформировалась в Советской России, а проблема выезда за границу заключалась лишь в сложности обменять большое количество русских рублей на эквивалентную сумму немецких рейхсмарок.

* В своих воспоминаниях автор позволит себе отойти от академического стиля и будет вести повествование от первого лица.

Предоставив рекомендации нескольких профессоров университета, мне удалось получить довольно скучную сумму немецких денег, и я оказался на корабле, плывущем из Ленинграда к немецким берегам.

Прибыв в Гётtingен, я снял типичную студенческую комнату и принялся за работу.

Это было всего через два года после открытия волновой механики (см. главу 4), и все были озабочены расширением первоначальной теории Бора об атомной и молекулярной структуре в контексте новой и более продвинутой области волновой механики. Но я не люблю и никогда не любил работать над тем, над чем и без меня уже трудится слишком много людей, поэтому решил попробовать обратиться к структуре атомного ядра. В то время ядро изучалось экспериментально, но к теории его структуры и свойств еще никто не подступался. В течение этих двух месяцев в Гётtingене я нашупал золотую жилу: на основе волновой механики мне удалось объяснить самопроизвольный распад радиоактивных ядер, а также ядерный распад под облучением частиц, выпущенных извне. Как я обнаружил позже, очень похожая работа была проделана в это же время британским физиком Р. Гёрни в сотрудничестве с американским физиком Э. Кондном; в сущности, наши статьи были представлены для публикации почти в один и тот же день.

К концу летней школы в Гётtingене у меня закончились деньги, и мне пришлось уехать домой. Но по дороге я решил остановиться в Копенгагене, чтобы встретиться с профессором Н. Бором, работой которого я так восхищался. В Копенгагене я снял самую дешевую комнату в маленьком ветхом отеле и отправился в Институт Бора к его секретарю мисс Шульц, чтобы договориться о встрече. (Когда я был в Копенгагене несколько лет назад, примерно за год до смерти Бора, она все еще там работала.) «Профессор, — сказала она, — сможет встретиться с вами сегодня днем».

Когда я вошел в его кабинет, я увидел дружелюбного улыбающегося человека средних лет, который спросил меня, каковы мои интересы в физике и над чем я сейчас работаю. Я рассказал ему о работе, которую проделал в Гётtingене по ядерным превращениям (рукопись была отправлена для публикации, но в печать еще не вышла). Бор внимательно выслушал и сказал: «Очень интересно, действительно, очень и очень интересно. Как долго вы соби-

раетесь оставаться здесь?» Я объяснил, что денег у меня оставалось еще ровно на один день. «Но не могли бы вы остаться на год, — спросил Бор, — если я предложу вам карлсбергскую стипендию в нашей Академии наук?*» Я открыл рот от изумления и наконец смог пробормотать: «О, да, я могу!» Дальше все происходило быстро. Мисс Шульц отвела мне очень хорошую комнату в пансионе, которым руководила мисс Хейв, всего в нескольких кварталах от института, который впоследствии стал площадкой для многих молодых физиков, приезжающих работать с Бором. Работа в институте была очень легкой и простой: каждый мог делать все, что хотел, приходить на работу и уходить домой, когда ему было угодно. Другим молодым человеком, приехавшим в пансионат мисс Хейв, был Макс Дельбрюк из Германии. Мы оба любили поспать подольше, и мисс Хейв разработала особый метод, чтобы поднять нас. Она приходила ко мне в комнату и будила меня: «Профессор Гамов, вам лучше бы подниматься. Доктор Дельбрюк уже позавтракал и ушел на работу!» Затем она проделывала то же самое со спящим Дельбрюком: «Профессор Дельбрюк, просыпайтесь. Доктор Гамов уже ушел на работу!» А потом мы с Максом встречались в ванной. Но все-таки каждый продвигался в своей работе, особенно по вечерам, ведь вечер — самое вдохновляющее время дня для физиков-теоретиков. В один из вечеров Бор то и дело прерывал работу в институтской библиотеке, наконец, он сказал, что очень устал и хотел бы пойти в кино.

Единственное кино, которое ему нравилось, это вестерны (в голливудском стиле), и ему всегда нужно было, чтобы несколько учеников пошли с ним и объясняли сложные сюжеты, в которых участвовали дружелюбные и враждебные индейцы, храбрые ковбои и головорезы, шерифы, барменши, золотоискатели и другие персонажи Старого Запада. Но его теоретический ум проявлялся даже в этих походах в кино. Он разработал теорию, объясняющую, почему, несмотря на то, что злодей всегда нападает первым, герой оказывается быстрее и в итоге убивает его. Эта теория Бора была основана на психологии. Поскольку герой никогда не стреляет первым, злодей должен принимать решение, когда начать атаку, что сильно его отвлекает. Герой, с другой стороны, действует в соответствии с условным рефлексом и автоматически хватается за оружие, как только видит движение руки

* Сейчас я имею честь быть членом этой Академии.

злодея. Мы не согласились с этой теорией, и на следующий день я пошел в магазин игрушек и купил два пистолета. Мы устроили перестрелку с Бором, он был «героем», и ему удалось победить всех своих учеников.

Еще одно замечание Бора, навеянное западными фильмами, касалось теории вероятности. «Я могу поверить, — сказал он, — что девушка, прогуливаясь по узкой тропе где-то в Скалистых горах, оступается и, скатываясь к пропасти, хватается за крошечную сосну на краю и таким образом спасает себя от неизбежной смерти. Я также могу себе представить, что именно в это время красивый ковбой может ехать по той же тропе и, заметив происшествие, привязать лассо к седлу своей лошади и спуститься вниз, чтобы спасти девушку. Но мне кажется абсолютно невозможным, что в это же время там окажется оператор, чтобы снять это захватывающее событие на пленку!»

В молодости Нильс Бор был настоящим спортсменом, а на футбольном поле (в Старом Свете играли сферическим мячом, по которому били ногой) уступал только своему брату, известному математику Харальду Бору, который был первоклассным полузащитником копенгагенской команды.

Когда во время рождественских каникул в 1930 году я поехал с Бором (которому тогда было сорок пять лет), чтобы присоединиться к группе норвежских ученых (Росселанд, Солберг и «Старик Бьеркнес») для катания на лыжах в северной части Норвегии за полярным кругом, Бор нас всех обогнал.

Одна история, которую я всегда люблю рассказывать, когда речь заходит о Боре, касается вечера в Копенгагене, когда Бор, Фру (его жена), вышеупомянутый Казимир и я возвращались с прощального ужина, который дал Оскар Клейн по случаю его избрания в качестве профессора университета в его родной Швеции. В этот поздний час улицы города были пусты (чего нельзя сказать об улицах Копенгагена сегодня). По дороге домой мы миновали здание банка со стенами из крупных цементных блоков. На углу здания расщелины между рядами блоков были достаточно глубокими, чтобы дать точку опоры хорошему альпинисту. Казимир, превосходный скалолаз, поднялся почти на третий этаж. Когда Кас спустился, Бор, не имевший никакого опыта в этом деле, решил повторить его подвиг. В тот момент, когда он, еле держась, висел на уровне второго этажа, а Фру Бор, Казимир и я с тревогой наблюдали за его попыткой, сзади подошли два

копенгагенских полицейских с оружием в руках. Один из них поднял голову и сказал другому: «Да это же просто профессор Бор!», и оба спокойно отправились на охоту за более опасными грабителями банков.

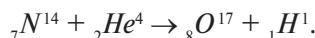
Есть еще одна забавная история о причудах Бора. Над входной дверью своего загородного дома в Тисвильде он прибил подкову, которая, как известно, приносит удачу.

Увидев это, посетитель воскликнул: «Вы, великий ученый, действительно верите, что подкова над входом в дом приносит удачу? Нет, — ответил Бор, — я, разумеется, не верю в эту примету. Но, знаете, — добавил он с улыбкой, — говорят, что она приносит удачу, даже если в это не верить!»

После открытия волновой механики и формулировки Гейзенбергом принципа неопределенности Бор вложил всю свою энергию в полуфилософскую разработку концепции двойственности взгляда на микроявления в физике, согласно которой каждый физический объект, будь то квант света, электрон или любая другая атомная частица, представляют собой две стороны медали. С одной стороны, объект можно рассматривать как частицу, а с другой — как волну. В главе 5 мы более подробно рассмотрим эту тему. Также работая со своим помощником Л. Розенфельдом, он расширил первоначальное соотношение неопределенности для отдельной частицы, применив его к электромагнитному полю, чем заложил основу для очень сложной ветви квантовой теории, известной как квантовая электродинамика.

В более поздние годы, после открытия нейтронов, Бор стал сильно интересоваться тогда только частично разработанной теорией ядерных реакций. Он показал, что, когда облучающая частица попадает внутрь ядра, она не просто выталкивает некоторые ядерные частицы, подобно двум соударяющимся билльярдным шарам, но и остается там некоторое время (возможно, около одной десятимиллиардной доли секунды), распределяя энергию удара среди всех остальных частиц. Тогда эта энергия может быть излучена в виде кванта γ -лучей или, накопившись в некоторых ядерных частицах, вытолкнуть их.

Так, например, первые исследования Резерфорда по ядерным реакциям не следует представлять в том виде, в котором они изначально были записаны:



Это, скорее, трехступенчатый процесс:



В условных обозначениях атомных ядер различных химических элементов нижние индексы слева представляют собой атомные номера элементов; верхние индексы справа — это атомные веса рассматриваемых изотопов. Промежуточный недолговечный продукт ${}_8F^{18(*)}$ (возбужденное ядро изотопа фтора) известен как «составное ядро», и введение этого понятия значительно упростило анализ сложных ядерных реакций.

Когда я окончательно покинул Советскую Россию в 1933 году, я стал профессором физики в Университете Джорджа Вашингтона в Вашингтоне, округ Колумбия, где в следующем году ко мне присоединился старый друг и бывший студент Бора профессор Эдвард Теллер. Следуя примеру Копенгагена, под эгидой Университета Джорджа Вашингтона и Института Карнеги были организованы ежегодные конференции по теоретической физике, где доктор Мерл Тув проводил важные экспериментальные исследования по ядерной физике. Состав конференции 1939 года был особенно хорош: в первом ряду присутствовали Нильс Бор (который в то время находился в Соединенных Штатах) и Энрико Ферми (см. главу 7).

Первый день конференции прошел спокойно за обсуждением текущих проблем, но следующий день оказался очень волнительным. Бор слегка опоздал тем утром, с собой он принес радиограмму от профессора Лизы Мейтнер из Стокгольма (куда она эмигрировала из нацистской Германии). В сообщении было сказано, что ее бывший напарник, профессор Отто Ган, и его коллеги в Берлине обнаружили, что в образце урана, облучаемого нейтронами, появились барий и другой элемент, который оказался изотопом криптона.

Она и ее племянник, физик-теоретик Отто Фриш, предположили, что результат эксперимента говорит о том, что твердое ядро урана расщепляется на две примерно равные части.

Читатель может представить волнение этого и оставшихся дней конференции. В ту же ночь эксперимент был повторен в лаборатории Тува, и было обнаружено, что деление урана под воздействием одного свободного нейтрона приводит к испусканию еще нескольких новых нейтронов. Возможность разветвлен-

ной цепной реакции и широкомасштабного освобождения ядерной энергии казалась открытой. Вежливо выпроводив журналистов из зала заседания, ученые тщательно взвесили все положительные и отрицательные стороны цепной реакции деления. Бор и Ферми, стоящие перед доской и вооруженные длинными кусочками мела, напоминали двух рыцарей на средневековом турнире. Именно так ядерная энергия вошла в мир человека, что привело к созданию урановых бомб, ядерных реакторов, а затем и термоядерного оружия!

Когда началась Вторая мировая война, Бор находился в Копенгагене, и он решил переждать нацистскую оккупацию, чтобы оказаться как можно больше помохи своим соотечественникам. Но однажды он услышал от датского подполья, что на следующее утро его арестует гестапо. В ту же ночь датский рыбак переправил его через Сунд к берегу Швеции, где его подобрал британский бомбардировщик «Москито». Эти бомбардировщики были небольшими, и Бору пришлось занять место в хвостовой части самолета, где обычно располагается хвостовой стрелок. Он мог общаться с кабиной только по внутренней связи. Где-то над Северным морем пилот решил спросить, как чувствует себя Бор, но не получил никакого ответа. Крайне встревоженный, пилот приземлился на английской взлетно-посадочной полосе, бросился к хвосту самолета и открыл дверь отсека хвостового стрелка. Внутри Бор, целый и невредимый, спал безмятежным сном!

Приехав из Англии в Соединенные Штаты, Бор направился прямо в Лос-Аламос, чтобы продолжить работу над атомной бомбой. Из-за строгих правил безопасности он носил документы на имя Николаса Бейкера, а ласково его называли «дядя Ник». Есть история о том, что во время одного из своих визитов в Вашингтон он встретил в лифте отеля молодую женщину, которую он часто видел в Копенгагене. Раньше она была женой физика-ядерщика профессора фон Хальбана и часто бывала в Копенгагене со своим мужем. «Очень рада снова вас видеть, профессор Бор», — поприветствовала она его. «Извините, — сказал Бор, — вы, должно быть, ошиблись. Меня зовут Николас Бейкер». «Но, — добавил он, стараясь быть вежливым, не нарушая правил безопасности, — я вас помню. Вы миссис фон Хальбан». «Нет, — отрезала она, — я миссис Плачек». Дело в том, что некоторое время назад она развелась со своим первым мужем и вышла замуж за Георга Плачека, который ранее длительное время работал с Бором.

Летом 1960 года, когда мы с женой путешествовали по Европе, отправились в Копенгаген, чтобы навестить Бора и его семью. Он проводил лето в своем загородном коттедже в Тисвильде и пригласил нас быть его гостями на несколько дней. Он был абсолютно таким же, каким я помню его, когда впервые увидел в 1928 году, но, конечно, гораздо более медлительным и менее энергичным. Мы много говорили о трудностях в современном развитии физики. Поэтому я был совершенно шокирован, когда через два года услышал по радио, что Нильс Бор умер.



Глава 3

В. ПАУЛИ И ЕГО ПРИНЦИП ИСКЛЮЧЕНИЯ

Одним из самых ярких посетителей на улице Блэгдамсвей был, без сомнения, Вольфганг Паули. Паули родился в Германии в 1900 году и провел большую часть своей жизни в качестве профессора в Цюрихе, и чудесным образом становился демоном вдохновения всякий раз, когда дело касалось развития теоретической физики. Его заразительный, в некотором роде сарднический смех оживлял любую конференцию, на которой он появлялся, независимо от того, насколько скучной она казалась вначале. Свои нескончаемые новые идеи он преподносил аудитории, пропуливаясь взад-вперед возле своего стола, отчего его тучное тело слегка колебалось. Его манера держать себя вдохновила кого-то на стихотворение, из которого я могу вспомнить лишь этот фрагмент:

В пылу дискуссии научной
Колеблется профессор тучный,
Когда работу защищает,
Вибрировать не прекращает.
Блеск гениальнейших идей
Он отрызает от ногтей!

* * *

Однажды, предположительно по указанию врача, Паули решил сбросить вес и, как и во всем, что он пытался сделать, преуспел в этом деле очень быстро. Когда он снова появился в Копенгагене уже без лишних килограммов, он был совсем другим человеком: грустным, мрачным и ворчливым. Мы все убедили его присоединиться к трапезе с восхитительным венским шницелем и замечательным пивом «Карлсберг», и менее чем через две недели Паули снова стал самим собой.

С политической точки зрения Паули был антинацистом и никогда не поднимал правую руку в приветствии «Хайль Гитлер» — кроме одного раза. Читая лекции в Мичиганском университете в Анн-Арборе, он присоединился к веселой вечеринке на озере и, выходя из лодки в темноте, упал, сломав правую руку в плече. Ему наложили гипс и зафиксировали руку под углом на 45 градусов. На своей следующей лекции он держал мел в левой руке и обращался к студентам так, как это было принято у нацистов. Он отказывался фотографироваться до тех пор, пока не сняли гипс.

Паули начал свою научную карьеру очень рано и в возрасте двадцати одного года написал книгу по теории относительности, которая (в пересмотренном издании) до сих пор представляет собой одну из лучших книг по этой теме. В мире физики он знаменит благодаря трем вещам:

1. Принцип Паули, который он предпочитал называть принципом исключения.
2. Нейтрино Паули, о котором он размышлял с начала двадцатых годов и которое в течение трех десятилетий не было экспериментально обнаружено.
3. Эффект Паули — загадочное явление, которое не объясняется и, вероятно, никогда не будет объяснено с точки зрения здравого смысла.

Всем известно, что физики-теоретики не могут работать с экспериментальным оборудованием; оно ломается всякий раз, когда они его касаются. Паули был настолько хорошим физиком-теоретиком, что обычно в лаборатории что-то ломалось каждый раз, когда он просто заходил в нее. Загадочное событие, которое поначалу, казалось, никак не было связано с присутствием Паули, произошло в лаборатории профессора Дж. Франка в Гётtingене. Однажды днем без видимой причины вышел из строя сложный прибор

для изучения атомных явлений. Франк с юмором написал об этом Паули по адресу в Цюрихе и через некоторое время получил ответ в конверте с датской печатью. Паули писал, что он отправился навестить Бора, и во время аварии в лаборатории Франка его поезд на несколько минут остановили на железнодорожной станции Гёттингена. Вы можете не верить в эту историю, но существует много других наблюдений, подтверждающих существование эффекта Паули!

ОГРАНИЧЕНИЕ ЧИСЛА ЭЛЕКТРОНОВ НА ЭНЕРГЕТИЧЕСКОМ УРОВНЕ

Принцип Паули, в отличие от эффекта Паули, доказан гораздо лучше и касается движения электронов в атомах. В предыдущих главах мы описали квантовые орбиты или, выражаясь более современным языком, квантовые колебательные состояния в кулоновском поле сил, окружающих атомное ядро*. Поскольку атом водорода содержит только один электрон, этот электрон может свободно занимать любой возможный энергетический уровень и, при отсутствии внешнего воздействия, естественным образом расположен максимально близко к ядру в состоянии с наименьшей энергией.

Если его энергия увеличивается под воздействием внешних сил, она возвращается обратно в исходное низшее состояние, по мере испуская различных линий водородного спектра. Но что происходит с атомами, содержащими два, три и более электронов? В главе II мы вывели две формулы для атома водорода в его низшем энергетическом состоянии ($n = 1$). Радиус орбиты, или, точнее, средний радиус непрерывной функции, описывающей это состояние, определяется как:

$$r_1 = \frac{h^2}{4\pi^2 e^2 m},$$

а наименьшая энергия как:

$$E_1 = -\frac{4\pi^2 e^2 m}{h^2}.$$

Эти формулы получены, исходя из предположения, что электрическая сила равна e^2/r^2 . Предположим теперь, что единственный

* См. следующую главу.

электрон вращается вокруг ядра с зарядом Z_e , где Z — его атомный номер. В этом случае сила будет равна Ze^2/r^2 вместо e^2/r^2 , и в приведенных выше формулах мы должны заменить e_2 на Ze_2 , а e_4 на Z_2e_4 . С увеличением атомного номера Z радиусы основного состояния будут уменьшаться как Z , а абсолютные значения их энергий будут увеличиваться как Z^2 . Если вместо одного электрона мы поместим Z электронов и если они все соберутся на самом низком уровне, атомы, образующие естественную систему элементов, станут все меньше и меньше и будут все более и более плотно упакованы. Конечно, следуя этим рассуждениям, необходимо помнить, что электростатическое отталкивание между электронами будет стремиться раздвинуть их, но можно легко увидеть, что это отталкивание не будет достаточно сильным, чтобы помешать атомам более тяжелых элементов сжаться до значительно меньших размеров.

Таким образом, можно ожидать, что объемы атомов* будут непрерывно и довольно быстро уменьшаться на всем пути от водорода до урана, как показано пунктирной линией на рис. 15a. Сплошная линия на том же рисунке, представляющая экспериментальные данные, выглядит совсем не так. Она имеет очень плавный наклон и характеризуется в основном своей пилообразной формой с острыми пиками в местах расположения инертных газов (*He, Ne, Ar, Kr, Xe* и т.д.), которые, как известно любому химику, очень неохотно вступают в реакцию с другими элементами или между собой. Кроме того, если бы все электроны атома накапливались на самом низком энергетическом уровне, сложность извлечения одного электрона из атома быстро возрастала бы от легких к тяжелым элементам на протяжении естественной системы (прерывистая линия на рис. 15b). Это опять-таки совсем не согласуется с наблюдаемой кривой потенциалов ионизации, которая характеризует эту сложность и показана сплошной линией на том же рисунке. И, сравнивая две кривые, мы замечаем, что максимальная сложность извлечения атомного электрона достигается в тех же местах, где атомные объемы имеют наименьшие величины. Таким образом, похоже, что последовательность химических элементов может быть представлена как ряд тел с периодически меняющимися размерами и устойчивостью к отдаче своих электронов.

* Их можно рассчитать по известным атомным весам и плотностям различных элементов, поделив вес 1 см^3 данного элемента на вес его атомов.

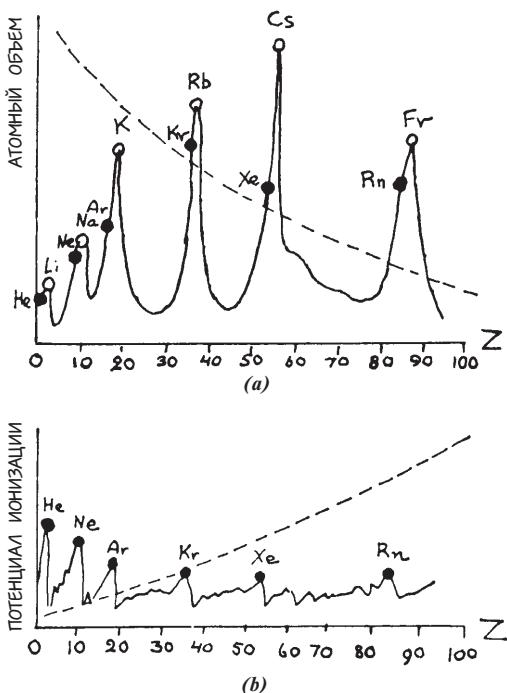


Рис. 15. Изменения атомных объемов и потенциалов ионизации на протяжении естественной системы элементов. Черные круги соответствуют благородным газам (энергетические оболочки на которых заполнены), имеют самую сильную связь. Черные круги — это щелочные металлы, которые начинают заселять новые оболочки.

В результате мы можем сделать вывод, что с добавлением все большего и большего числа электронов объемы, занимаемые различными квантовыми состояниями, уменьшаются, но число состояний, занимаемых электронами, увеличивается, так что полный внешний диаметр атома остается приблизительно постоянным. Следовательно, должен существовать некоторый базовый физический принцип, предотвращающий скопление всех атомных электронов в низшем квантовом состоянии; как только «квота» для данного уровня заполняется, все последующие электроны должны быть размещены в других квантовых состояниях с более высокой энергией. Паули предположил, что можно прийти к удовлетворительному результату, если допустить, что только два электрона

занимают квантовое состояние, описанное тремя квантовыми числами: радиальным n_r , азимутальным n_ϕ и ориентационным n_o *.

В первоначальной теории Бора, в ходе которой и был впервые сформулирован принцип Паули, эти три квантовых числа соответствовали средним диаметрам, эксцентрикитетам и пространственной ориентации квантовых орбит электрона. В волновой механике** они представляют число узлов в сложном трехмерном колебательном движении Ψ -функций.

Используя принцип Паули, Бор и его коллеги (включая, конечно, самого Паули) смогли создать модели всех атомов от водорода до урана. Они не только объяснили периодические изменения атомных объемов и потенциалов ионизации, но также и все другие свойства атомов, их химическое сходство между собой, их валентности и другие свойства, которые много лет назад были получены эмпирически и систематизированы русским химиком Д. И. Менделеевым в его периодической системе элементов. Все эти события выходят за рамки этой маленькой книги, главная цель которой — описать новые революционные идеи, а не рассказывать в подробностях об их последствиях.

ВРАЩАЮЩИЙСЯ ЭЛЕКТРОН

Исследования и интерпретация атомных спектров на основе теории Бора, которая опиралась на три квантовых числа (что вполне естественно для трехмерного пространства!) для описания движения атомных электронов, благополучно продвигались вперед, пока в начале двадцатых годов трех квантовых чисел неожиданно оказалось недостаточно.

Исследования эффекта Зеемана (расщепление спектральных линий сильными магнитными полями) показали, что три целых числа не способны объяснить существующее количество компонентов, и поэтому было введено четвертое квантовое число. Сначала его называли «внутренним квантовым числом», и это не самое плохое название, потому что никто не мог объяснить излиш-

* Здесь, для простоты, мы отступаем от принятой терминологии в теории квантовых чисел. В любой отрасли науки терминология становится настолько громоздкой в процессе своего развития, что ее очень сложно выразить простым способом для читателя, который впервые сталкивается со всеми этими сложными понятиями.

** См. следующую главу.

нее расщепление. Затем, в 1925 году, два голландских физика, Сэмюэл Гаудсмит и Джордж Уленбек, сделали смелое заявление. Они предположили, что это избыточное расщепление линий связано не с каким-либо дополнительным квантовым числом, опи- сывающим орбиту электрона в атоме, а с самим электроном. С момента своего открытия электрон рассматривался как точка, характеризующаяся только своей массой и электрическим зарядом. Почему бы не рассмотреть его как маленькое электрически заряженное тело, вращающееся, как волчок, вокруг своей оси? У него были бы определенный момент импульса и магнитный момент, как у любого вращающегося заряда. Другая ориентация спина электрона (как его называли) относительно плоскости его орбиты будет учитывать дополнительные компоненты в расщеплении линий. Вскоре было обнаружено, что это предложение работает и что, приписывая электрону правильное числовое значение спина (то есть углового механического импульса) и магнитного момента, можно объяснить все дополнительные компоненты линий, найденные экспериментально. Магнитный момент вращающегося электрона любезно оказался равным так называемому магнетону Бора, то есть минимальному значению магнитного поля, которое могло быть вызвано его вращением вокруг ядра. Но затем возникли проблемы с механическим угловым моментом вращающегося электрона, который оказался только половиной обычного углового момента $h/2\pi$ атомных орбит.

Было предпринято много попыток разрешить эту проблему, а окончательно это сделать удалось только четыре года спустя П. Дираку и очень нетрадиционным способом (см. главу VI). Причину, по которой введение вращающегося электрона преобразовало принцип Паули, можно понять следующим образом. Как вы помните, этот принцип гласил, что только два электрона могут занимать любую квантовую орбиту. Почему два? После открытия вращающегося электрона первоначальный принцип Паули был скорректирован утверждением: «только два электрона, обладающих противоположным спином», то есть вращаются в противоположных направлениях.

Ситуация иллюстрируется графически на рис. 16. Рис. 16а представляет старое видение, где два точечных электрона, e_1 и e_2 , движутся вдоль одной и той же орбиты. На рис. 16б мы видим новое представление: два электрона могут двигаться только по одной и той же орбите, если один из них e_1 вращается вокруг сво-

ей оси в том же направлении, что и вокруг ядра, тогда как другой e_2 вращается в противоположном направлении. Можно добавить, что рис. 16б не совсем корректен, поскольку взаимодействие между магнитным моментом электрона и магнитным полем внутри атома, в котором он движется, слегка изменяет орбиту, так что на самом деле мы имеем две орбиты, на каждой из которых находится только один электрон 16с. Таким образом, исходный принцип Паули может быть переформулирован путем «допуска» только одного электрона на каждой орбите, если учесть небольшое расщепление исходной орбиты.

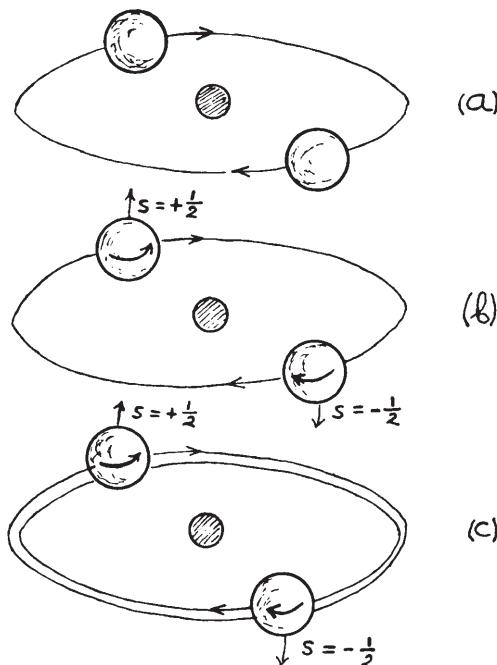


Рис. 16. Движения двух электронов по одной и той же орбите согласно: (а) первоначальному принципу Паули (не более двух электронов могут занимать одну и ту же орбиту); (б) измененному принципу Паули (два электрона, занимающие одну и ту же орбиту, должны иметь противоположный спин, т.е. вращаться вокруг своей оси в противоположном направлении); и в соответствии с (с) переформулированным принципом Паули, в котором из-за магнитных сил, возникающих в результате магнитного импульса электронов, орбиты не идентичны, и на каждый энергетический уровень допускается только один электрон.

ПАУЛИ И ЯДЕРНАЯ ФИЗИКА

Теперь мы переходим к совершенно другой области деятельности Паули в науке: его вкладу в область ядерной физики. Как мы все знаем — или, по крайней мере, должны знать, — радиоактивные элементы испускают три вида излучения: альфа (α), бета (β) и гамма (γ).

Основным процессом радиоактивного распада является испускание α -частиц, больших кусков нестабильных ядер, которые, как доказал Резерфорд, являются ядрами атомов гелия. С другой стороны, β -частицы — это электроны, которые иногда испускаются ядрами после α -распада, чтобы восстановить баланс между зарядом и массой, нарушенный выбросом α -частиц. Наконец, γ -лучи — это короткие электромагнитные волны, возникающие в результате внутренних возмущений, вызванных α - и β -излучением. Для данного радиоактивного элемента α -частицы имеют одинаковую энергию, соответствующую разностям энергий материнского и дочернего ядер. γ -лучи представляют собой сложные острые линии, намного более острые, чем линии оптических спектров.

Вся эта активность указывает на то, что атомные ядра представляют собой квантованные системы, подобные атомам, за исключением того, что они намного меньше; поскольку ядра меньше, в их преобразованиях, согласно квантовым законам, участвуют гораздо более высокие значения энергии. Но для физиков оказалось большим сюрпризом, когда Джеймс Чедвик открыл в 1914 году, что, в отличие от α -частиц и γ -лучей, испускаемых радиоактивными ядрами, β -частицы не имеют четко определенных энергий. Напротив, их энергетический спектр непрерывно расширяется от практически нулевого до очень больших значений (рис. 17). Возможность того, что это распространение энергии было связано с некоторыми внутренними потерями у β -частиц в процессе выхода из радиоактивного материала, была полностью опровергнута тщательными экспериментами. Таким образом, мы сталкиваемся с ситуацией, когда ядерные книги учета доходов и расходов не сходились. Нильс Бор, первый отреагировав на то, что показал эксперимент, занял радикальную позицию, он решил, что, если эксперименты дают такой результат, закон сохранения энергии действительно не выполняется для β -излучения или (предположительно) для процессов β -поглощения.

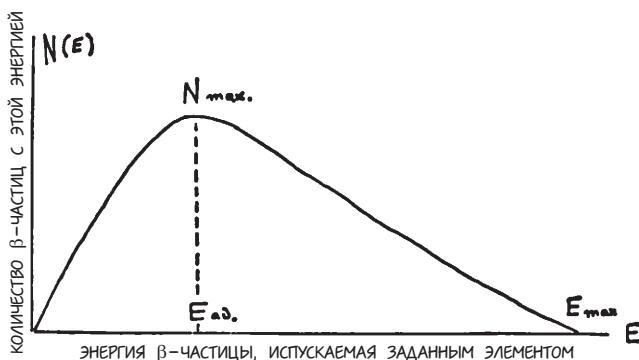


Рис. 17. Типичная кривая распределения энергии типичного β -излучения.

Действительно, это была эпоха, когда многие законы классической физики были отвергнуты под воздействием недавно разработанной теории относительности и квантовой теории, поэтому ни один ее закон больше не казался непоколебимым. Бор даже пытался использовать это якобы несохранение энергии в процессах β -распада, чтобы объяснить кажущееся вечным излучение энергии звездами. Согласно этим малоизвестным и никогда не публиковавшимся представлениям, звезды имели внутри себя крупные ядра ядерной материи, обладающие теми же свойствами, что и обычные атомные ядра, но гораздо большие по размеру (их диаметр не 10^{-12} см, а многие и многие километры). Эти звездные ядра, которые должны были быть нестабильными, испускали β -частицы с четко определенной энергией. Они были окружены обычной материей в полностью ионизованном состоянии (сегодня мы называем это плазмой), состоящей из свободных высокоэнергетических электронов и обычных голых ядер. Энергия электронов, составляющих основу этих звездных оболочек, определялась классическим соотношением: $E = \frac{3}{2}kT$, где k — постоянная Больцмана, а T — температура в основании оболочки*. С другой

* В соответствии с механической теорией тепла, разработанной Больцманом и Максвеллом в середине прошлого века, «тепло — это не что иное, как движение молекул, образующих физические тела». Они обнаружили, что энергия теплового движения (на молекулу) пропорциональна его абсолютной температуре, то есть температуре, отсчитываемой от «абсолютного нуля» при -273°C . Эмпирически определенный коэффициент пропорциональности (точнее, две трети от него) был назван постоянной Больцмана.

стороны, β -частица, испускаемая с поверхности атомного ядра, всегда имела одинаковую энергию, определяемую внутренними свойствами ядерной жидкости. Таким образом, должно существовать динамическое равновесие между атомным ядром и окружающим ионизированным газом (плазмой), аналогичное равновесию между водой и насыщенным паром над ним. Количество β -частиц, испускаемых радиоактивным ядром, было равно числу свободных электронов из поглощенной им оболочки, но, в то время как энергия поглощенных свободных электронов из оболочки определялась ее температурой T , энергия β -частиц, испускаемых ядром, всегда оставалась одинаковой, соответствуя определенной универсальной ядерной температуре T_0 . Поэтому для $T < T_0$ существовал постоянный поток энергии от атомного ядра в оболочку, и этот поток, поднимаясь к поверхности звезды, поддерживал ее высокую температуру. В силу несохранения энергии в процессах β -излучения в атомном ядре ничего не изменялось, и звезды могли светить вечно. Бор говорил об этой своей теории немного критично, но казалось, что он бы не сильно удивился, если бы она оказалась верной.

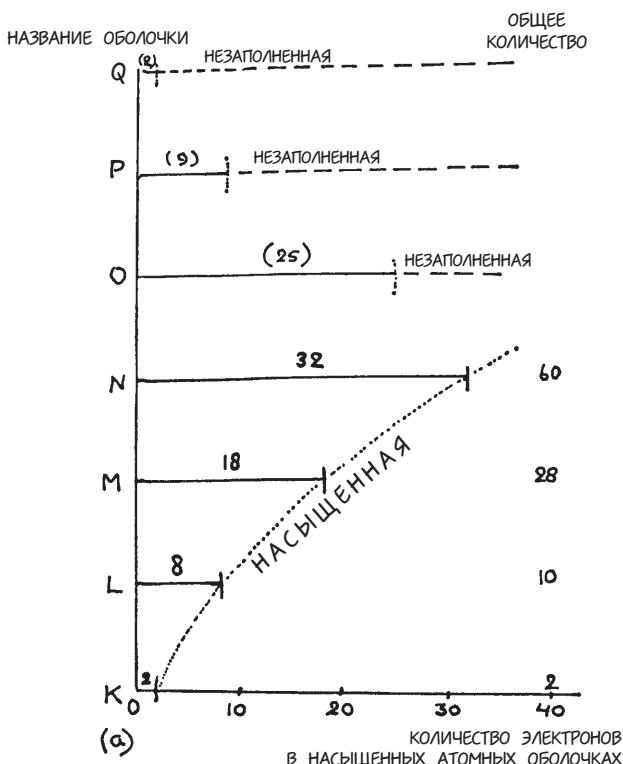
НЕЙТРИНО

Паули, которого нельзя было назвать консервативным ни в каком смысле этого слова, тем не менее выступал решительно против позиции Бора.

Он считал, что вернее будет предположить, что баланс энергии, нарушенный непрерывностью спектров β -излучения, восстанавливается излучением некоторых других видов еще неизвестных частиц, которые он назвал «нейтронами». Название этого «нейтрона Паули» было позже изменено на «нейтрино», после того как Чедвик открыл то, что сегодня мы называем нейтроном. Предполагалось, что нейтрино — это частицы, не несущие электрического заряда и не имеющие массы (или, по крайней мере, массы, достойной упоминания). Предположительно они излучались в паре с β -частицами таким образом, что сумма энергий этих частиц и β -частиц всегда оставалась одинаковой, что, конечно, соответствует старому добному закону сохранения энергии. Но из-за их нулевого заряда и нулевой массы они были практически необнаружимы и ускользали из-под носа даже при самых тщательно поставленных экспериментах. Помимо Бора, еще одним «нейтри-

нофобом» был П. Эренфест, и между ними трепета вились горячие словесные дискуссии и объемная, но нигде не публиковавшаяся переписка по этому вопросу.

Шли годы, накапливалось все больше и больше доказательств, хотя и косвенных, в пользу нейтрино Паули. Лишь в 1955 году два физика из Лос-Аламоса, Ф. Райнес и К. Коуэн, установили неоспоримое существование нейтрино: задетектировали на выходе из атомных реакторов на проекте Комиссии по атомной энергии на Саванна-Ривер. Было обнаружено, что взаимодействие между нейтрино и веществом было настолько мало, что понадобился бы железный щит толщиной в несколько световых лет, чтобы уменьшить интенсивность пучка нейтрино хотя бы наполовину. Сегодня нейтрино приобретают все большее значение в исследовании элементарных частиц и астрофизических явлений; они могут стать самыми важными элементарными частицами в физике. Подобно электронам, нейтрино ведут себя, как маленькие врачающиеся волчки, и их угловые моменты абсолютно такие же, как у электронов.



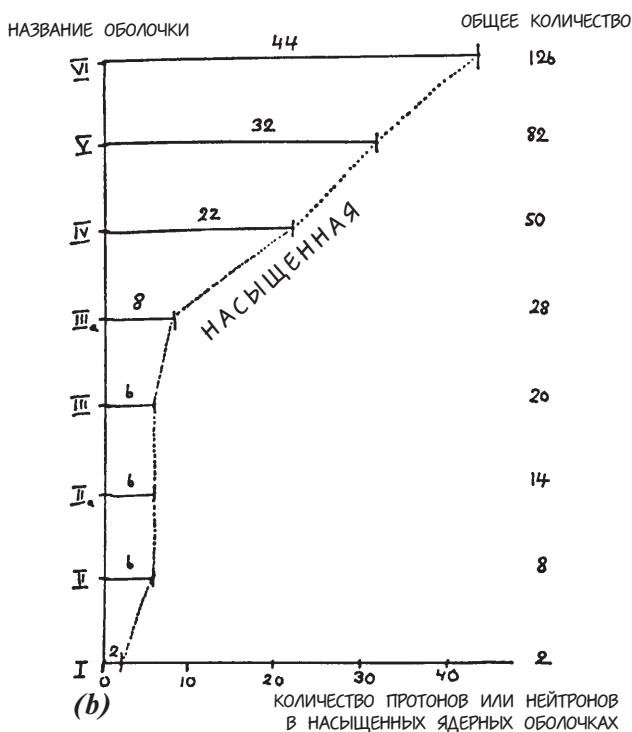


Рис. 18 а и б. Сравнение между (а) заполнением электронных оболочек на диаграмме последовательности атомов Бора-Костера и (б) насыщением протонных и нейтронных оболочек в последовательности атомных ядер на диаграмме Майера-Йенсена.

Но поскольку нейтрино не несут электрического заряда, их магнитный момент равен нулю.

Позже экспериментально было установлено, что протоны и нейтроны так же, как и электроны, имеют спин и подчиняются принципу Паули. Последний факт имеет большое значение в проблеме внутренней структуры атомных ядер, которые образуются в результате агломерации разного количества протонов и нейтронов, тесно связанных между собой ядерными силами.

В 1934 году Г. Гамов впервые указал на то, что естественная последовательность атомных ядер от водорода до изотопов урана демонстрирует периодические изменения их различных свойств,

похожие на изменения химических свойств атомов в периодической системе элементов Менделеева, но в гораздо меньшей степени. Эта периодичность указывает на то, что атомные ядра должны иметь структуру оболочки, аналогичную, но, вероятно, более сложную, чем структура атомных электронных оболочек. Ситуация здесь осложняется тем фактом, что, в то время как атомные оболочки образованы только одним видом частиц, а именно электронами, ядра образованы двумя типами частиц, нейtronами и протонами, и что принцип запрета Паули применяется к каждому виду отдельно. Таким образом, любое данное энергетическое состояние, характеризуемое тремя квантовыми числами, может вместить два протона (с противоположным спином) вместе с двумя нейtronами (также с противоположным спином), и у нас фактически есть две системы оболочек, одна для протонов и одна для нейtronов, перекрывающих друг друга. Есть еще одна сложность. Из-за тесного расположения протонов и нейtronов в ядре расчеты уровней энергии становятся значительно более сложными. Эта проблема была окончательно решена в 1949 г. М. Гёппертом-Майером, Х. Йенсеном и другими; они смогли доказать, что нейtronные, а также протонные оболочки внутри ядер имеют емкости в 2, 8, 14, 20, 28, 50, 82 и 126 частиц каждая, что схематически показано на рис. 18. Эти числа, известные как «магические числа», позволили физикам полностью понять наблюдаемую периодичность в структуре ядра.

Другое важное применение принципа Паули можно найти в работе П. Дирака, который использовал его для объяснения стабильности вещества, как будет описано в главе 6. На основании своей теории Дирак пришел к выводу, что для каждой из «нормальных частиц», таких как электроны, протоны, нейтроны и многие другие, открытые в течение последнего десятилетия, должна существовать «античастица» с точно такими же физическими свойствами, но с противоположным электрическим зарядом. Это будет обсуждаться более подробно в главах 6 и 8.

В заключение этой главы достаточно сказать, что найти область современной физики, в которой бы не применялся принцип Паули, так же сложно, как найти человека столь же одаренного, добродушного и веселого, каким был Вольфганг Паули.



Глава 4

Л. ДЕ БРОЙЛЬ И ВОЛНЫ-ПИЛОТЫ

Луи Виктор де Бройль, родившийся в Дьепе в 1892 году и унаследовавший титул князя после смерти старшего брата, сделал довольно необычную научную карьеру. Будучи студентом в Сорбонне, он решил посвятить свою жизнь средневековой истории, но началась Первая мировая война, и он вступил в ряды французской армии. Так как он был образованным человеком, де Бройль получил должность в одном из полевых подразделений радиосвязи, что было в то время новшеством, и переключил свой интерес с готических соборов на электромагнитные волны. В 1925 году он представил докторскую диссертацию, в которой содержались революционные идеи относительно пересмотра оригинальной теории атомного строения Бора, к чему большинство физиков отнеслись довольно скептически; некоторые даже окрестили ее «La Comédie Française».

Работая с радиоволнами во времена войны и будучи знатоком камерной музыки, де Бройль сравнивал атом с особенным видом музыкального инструмента, который в зависимости от своего

строения может производить определенный основной тон и последовательность обертонов. Поскольку к тому времени идея Бора о том, что электронные орбиты характеризуют различные квантовые состояния атома, де Б्रойль взял их в качестве базового шаблона для своей волновой схемы. Он полагал, что каждый электрон, движущийся по данной орбите, сопровождается некоторыми волнами-пилотами (теперь известными как волны де Бройля, рассеивающиеся по всей орбите). Первая квантовая орбита содержала только одну волну, вторая — две волны, третья — три и т.д. Таким образом, длина первой волны должна быть равна длине $2\pi r_1$ первой квантовой орбиты, а длина второй волны должна быть равна половине длины второй орбиты $\frac{1}{2}\pi r_2$ и т.д. Как правило, n -я квантовая орбита содержит n волн длиной $\frac{1}{n}\pi r_n$ каждая.

Как мы видели в главе 2, радиус n -й орбиты у Бора равен:

$$r_n = \frac{1}{4\pi^2} \cdot \frac{h^2}{me} \cdot n^2.$$

Из равенства центробежной силы, обусловленной орбитальным движением, и электростатического притяжения между заряженными частицами, мы получаем:

$$\frac{mv_n^2}{r_n} = \frac{e^2}{r_n^2},$$

или

$$e^2 = mv_n^2 r_n.$$

Подставляя это значение e^2 в исходную формулу, получим:

$$r_n = \frac{1}{4\pi^2} \frac{h^2 n^2}{m} \cdot \frac{1}{mv_n^2 r_n},$$

или

$$(2\pi r_n)^2 = \frac{h^2 n^2}{m^2 v^2}.$$

Извлекая квадратный корень с обеих сторон этого уравнения, мы в итоге получаем:

$$2\pi r_n = n \cdot \frac{h}{mv_n}.$$

Таким образом, если длина λ волны, сопровождающей электрон, равна постоянной Планка h , деленной на механический импульс mv частицы, тогда:

$$\lambda = \frac{h}{mv}.$$

Таким образом де Бройль мог удовлетворить свое желание внедрить волны такой природы, чтобы 1, 2, 3 и т.д. из них точно вписывались бы в 1-ю, 2-ю, 3-ю квантовые орбиты Бора (рис. 19). Полученный результат математически эквивалентен исходному квантовому условию Бора и не вносит ничего физически нового — то есть ничего, кроме идеи, что движение электронов вдоль квантовых орбит Бора сопровождается таинственными волнами с длинами, которые определяются массой и скоростью движущихся частиц. Если эти волны представляют собой реальное физическое явление, они также должны сопровождать частицы, свободно перемещающиеся в пространстве, и в этом случае их существование или несуществование может быть экспериментально доказано. Фактически, если движение электронов всегда направляется волнами де Бройля, пучок электронов при надлежащих условиях должен демонстрировать дифракционные явления, подобные тем, которые характерны для пучков света.

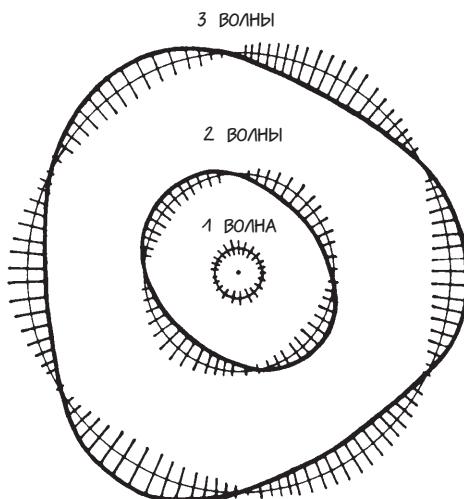


Рис. 19. Волны де Бройля, соответствующие квантовым орбитам в модели атома Бора.

Электронные пучки, ускоренные электрическим напряжением в несколько киловольт (которые обычно используются в лабораторных экспериментах), должны, согласно формуле де Броиля, сопровождаться пилотными волнами с длиной около 10^{-8} см, что сопоставимо с длиной волны обычного рентгеновского излучения. Эта длина волны слишком мала, чтобы демонстрировать дифракцию в обычных оптических решетках, и ее следует изучать с помощью техники стандартной рентгеновской спектроскопии. В этом методе падающий луч отражается от поверхности кристалла, а соседние кристаллические слои, расположенные на расстоянии около 10^{-8} см друг от друга, выполняют функцию более широко разделенных линий в оптических дифракционных решетках (рис. 20).

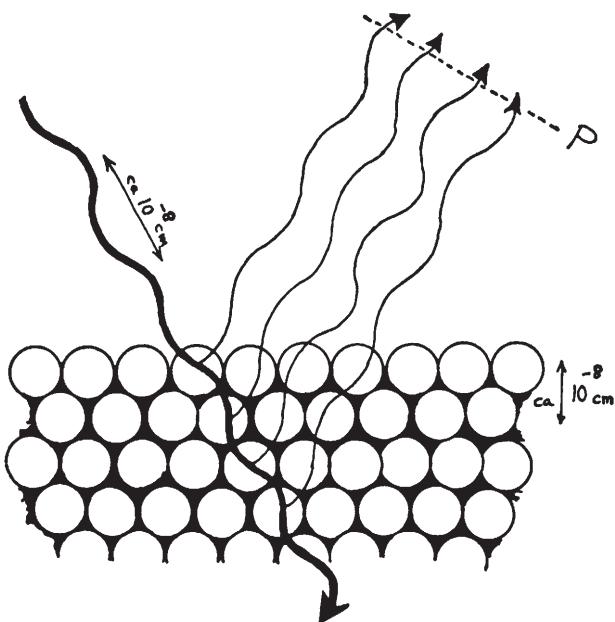


Рис. 20. Падающая волна, будь то короткая электромагнитная волна (рентгеновское излучение) или волна де Броиля, связанная с пучком быстрых электронов, создает волновую рябь при прохождении через последовательные слои кристаллической решетки. В зависимости от угла падения появляются темные и светлые интерференционные полосы. (Р – фазовая плоскость.)

Этот эксперимент был проведен одновременно и независимо друг от друга сэром Джорджем Томсоном (сыном сэра Дж. Дж. Томсона) в Англии, а также К. Дэвиссоном и Л. Джермером в Соединенных Штатах, которые использовали кристаллическое устройство, подобное тому, что было у Брэгга и Вульфа, но заменили пучком рентгеновских лучей пучок электронов, движущихся с заданной скоростью. В экспериментах на экране (или на фотопластинке) появлялась характерная дифракционная картина, которая размещалась на пути отраженного луча, и дифракционные полосы расширялись или сужались при увеличении или уменьшении скорости падающих электронов.

Измеренная длина волны во всех случаях точно совпадала с той, что дана формулой де Броиля. Таким образом, физическое существование волн де Броиля стало неоспоримо, хотя никто пока не понимал, что это такое.

Позже немецкий физик Отто Штерн доказал существование дифракционных явлений в случае атомных пучков. Поскольку атомы в тысячи раз больше электронов, их волны де Броиля должны были быть соответственно короче при той же скорости. Чтобы атомные волны де Броиля имели длину, сопоставимую с расстояниями между кристаллическими слоями (около 10^{-8} см), Штерн решил использовать тепловое движение атомов, поскольку он мог регулировать скорость, просто изменения температуру газа. Источник состоял из керамического цилиндра, нагреваемого электрическим проводом, намотанным вокруг него. На одном конце закрытого цилиндра находилось крошечное отверстие, через которое атомы со своей тепловой скоростью выходили в намного больший по размеру вакуумированный сосуд, и в своем полете они сталкивались с кристаллом, помещенным на их пути. Отраженные в разных направлениях атомы прилипали к металлическим пластинам, охлаждаемым жидким воздухом, и число атомов на разных пластинах подсчитывалось сложным методом химического микроанализа. Изображая зависимость количества атомов, рассеянных в разных направлениях относительно угла рассеяния, Штерн снова получил идеальную дифракционную картину, точно соответствующую длине волны, рассчитанной по формуле де Броиля. И полосы становились шире или тоньше, когда температура цилиндра менялась.

Когда в конце двадцатых годов я работал в Кембриджском университете с Резерфордом, я решил провести рождественские

каникулы в Париже (где я никогда раньше не был) и написал де Бройлю о том, что я очень хотел бы встретиться с ним и обсудить некоторые проблемы квантовой теории.

Он ответил, что университет будет закрыт, но он будет рад видеть меня у себя дома. Он жил в великолепном семейном особняке в фешенебельном парижском пригороде Нёйи-сюр-Сен. Дверь мне открыл внушительный дворецкий.

- Я хотел бы увидеть профессора де Бройля.
- Вы хотели сказать, месье герцога де Бройля, — поправил меня дворецкий.

— Хорошо, герцога де Бройля, — сказал я, и меня впустили.

Де Бройль, одетый в шелковый халат, встретил меня в своем роскошно обставленном кабинете, и мы начали говорить о физике. Он не говорил по-английски; мой французский был довольно скучным. Но каким-то образом, сочетая мой ломаный французский и написание формул на бумаге, мне удалось передать ему то, что я хотел сказать, и понять его комментарии. Не прошло и года, как профессор де Бройль приехал в Лондон, чтобы прочитать лекцию в Лондонском королевском обществе, и я, конечно, был в аудитории. Он прочитал блестящую лекцию на прекрасном английском языке лишь с небольшим французским акцентом. Тогда я понял еще один его принцип: когда иностранцы приезжают во Францию, они должны говорить по-французски.

Несколько лет спустя, когда я планировал поездку в Европу, и де Бройль попросил меня прочитать специальную лекцию в Институте Анри Пуанкаре, директором которого он был, я решил прийти хорошо подготовленным. Я планировал написать лекцию на моем (все еще) бедном французском языке на борту лайнера по пути через Атлантику, попросить кого-нибудь в Париже исправить текст и использовать эти заметки на лекции. Но, как мы знаем, океанский воздух и обилие отвлекающих факторов в путешествии могут разрушить любые благие намерения, поэтому в Сорbonну я прибыл совершенно неподготовленный. Речь вышла слегка путаной, но мой французский все-таки меня спас, и все поняли, что я хотел сказать.

После лекции я сказал де Бройлю, что мне жаль, что мне не удалось осуществить мой первоначальный план с французскими

заметками. «Боже мой! — воскликнул он. — Как хорошо, что ты этого не сделал».

Де Бройль рассказал мне о лекции известного британского физика Р. Фаулера. Всем известно, что англичане считают, что их язык самый лучший, а все иностранцы обязаны его знать, что освобождает первых от необходимости изучать чужой язык. Поскольку лекции в Сорbonne должны вестись на французском языке, Фаулер подготовил полный английский текст своей лекции и заранее отправил его де Бройлю, чтобы тот его перевел. Так, Фаулер читал на французском, используя машинописный французский текст. «Де Бройль сказал, что после лекции к нему обратилась группа студентов: «Месье профессор», — сказали они, — мы очень озадачены. Мы ожидали, что профессор Фаулер будет читать по-английски, и мы все знаем его достаточно хорошо, чтобы понимать, о чем он говорит. Но он говорил не по-английски, а на каком-то другом языке, и нам так и не удалось понять на каком». «И тогда, — добавил де Бройль, — мне пришлось сказать им, что профессор Фаулер говорил на французском!»

УРАВНЕНИЕ ШРЕДИНГЕРА

Породив революционную идею о том, что движение атомных частиц направляется какими-то таинственными пилотными волнами, де Бройль не успел подкрепить свою теорию математически, и в 1926 году, примерно через год после его публикации, появилась статья австрийского физика Эрвина Шредингера, который написал общее уравнение для волн де Бройля и доказал его справедливость для всех видов движения электронов. В то время как модель атома де Бройля напоминала необычный струнный инструмент или, скорее, набор колеблющихся концентрических металлических колец разных диаметров, модель Шредингера больше напоминала духовые инструменты; в его атоме колебания происходят во всем пространстве, окружающем атомное ядро.

Рассмотрим плоский металлический диск, похожий на тарелку, закрепленную по центру (рис. 21а).

Если ударить по нему, он начнет колебаться, его край будет периодически перемещаться вверх и вниз (рис. 21б). Существуют также более сложные виды колебаний (обертонов), как, напри-

мер, на рис. 21с, где центр тарелки и все точки, расположенные между центром и внешней окружностью (отмечены жирной линией на рисунке), находятся в покое. Таким образом, когда часть в пределах этого круга поднимается вверх, часть вне круга перемещается вниз, и наоборот. Неподвижные точки и линии выбирающей упругой поверхности называются узловыми точками и линиями; можно расширить рис. 21с, изобразив более высокие обертоны, которые соответствуют двум или более узловым кругам вокруг центральной узловой точки.

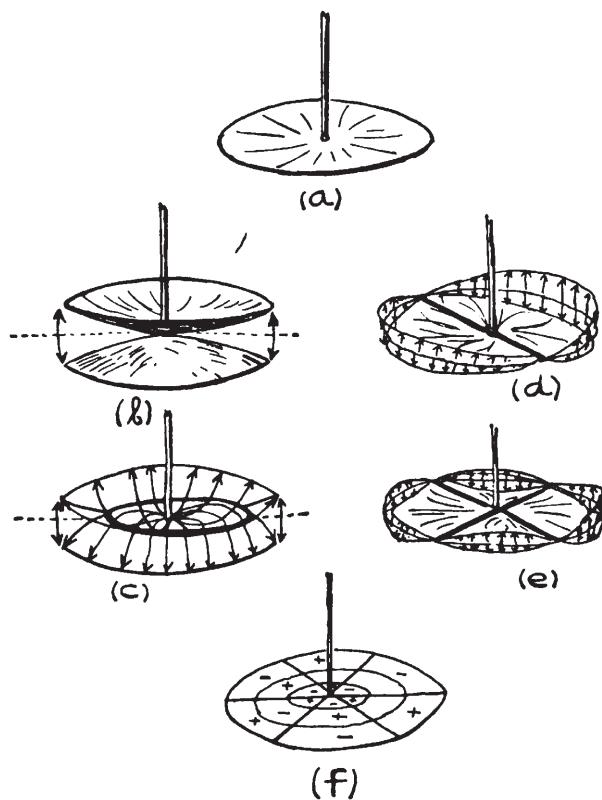


Рис. 21. Различные виды колебаний эластичного диска, закрепленного по центру: (a) состояние покоя; (b) узловая точка в центре; (c) одна круглая узловая линия; (d) одна радиальная узловая линия; (e) две радиальные узловые линии; (f) три радиальные и две круглые узловые линии.

Помимо таких «радиальных» колебаний, существуют также «азимутальные колебания», в которых узловые линии являются прямыми линиями, проходящими через центр, как показано на рис. 21d и e, где стрелки показывают подъем или опускание мембранны относительно равновесной горизонтальной позиции. Конечно, радиальные и азимутальные колебания могут существовать одновременно на заданной мембране. Получившееся сложное состояние движения должно описываться двумя целыми числами n_r и n_ϕ , показывающими количество радиальных и азимутальных узловых линий.

Следующими по сложности являются трехмерные колебания, такие как, например, звуковые волны в воздухе, заполняющие жесткую металлическую сферу. В этом случае возникает необходимость ввести третий тип узловых линий, а также третье целое число n_z , показывающее их количество.

Этот вид колебаний был изучен в теоретической акустике много лет назад, а, в частности, Герман фон Гельмгольц в прошлом веке подробно исследовал колебания воздуха, заключенного в жесткие металлические сферы (резонаторы Гельмгольца). Он просверлил небольшое отверстие в сфере, чтобы пропустить звук снаружи, и использовал сирену, которая издавала чистый тон, высота которого могла изменяться непрерывно, путем изменения скорости вращения диска сирены.

Когда частота звука сирены совпадала с одним из возможных колебаний воздуха в сфере, наблюдался резонанс.

Эти эксперименты полностью соответствовали математическим решениям волнового уравнения для звука, которое слишком сложно, чтобы говорить о нем в этой книге.

Уравнение, написанное Шрёдингером для волн де Бройля, очень похоже на хорошо известные волновые уравнения для распространения звуковых и световых (то есть электромагнитных) волн, за исключением того, что в течение нескольких лет вопрос: «А что именно колебалось?» — оставался открытым. Мы вернемся к нему в следующей главе.

Когда электрон движется вокруг протона в атоме водорода, ситуация несколько напоминает колебания газа в жесткой сферической оболочке. Но в то время как у источников колебаний Гельмгольца есть жесткая стенка, препятствующая распространению газа за ее пределы, атомный электрон подвергается электрическому притяжению ядра, которое замедляет движение, когда

электрон отдаляется все дальше и дальше от центра, и останавливается его, когда он выходит за пределы, разрешенные его кинетической энергией. Ситуация в обоих случаях графически показана на рис. 22. На рисунке слева «потенциальная яма» (то есть снижение потенциальной энергии в окрестности определенной точки) напоминает цилиндрический колодец; рисунок справа больше похож на воронкообразное отверстие в земле. Горизонтальные линии представляют квантованные энергетические уровни, самые низкие из которых соответствуют самой низкой энергии, которую может иметь частица. Сравнивая рис. 22б с рис. 12 из главы 2, мы видим, что уровни атома водорода, рассчитанные на основе уравнения Шредингера, идентичны уровням, полученным из старой теории квантовых орбит Бора.

Но физический аспект существенно отличается. Вместо точных круговых и эллиптических орбит, по которым движутся точечные электроны, у нас теперь есть полноценный атом, представленный многогранными колебаниями того, что ранее в волновой механике называли (за отсутствием лучшего названия) Ψ -функцией (греческая буква пси).

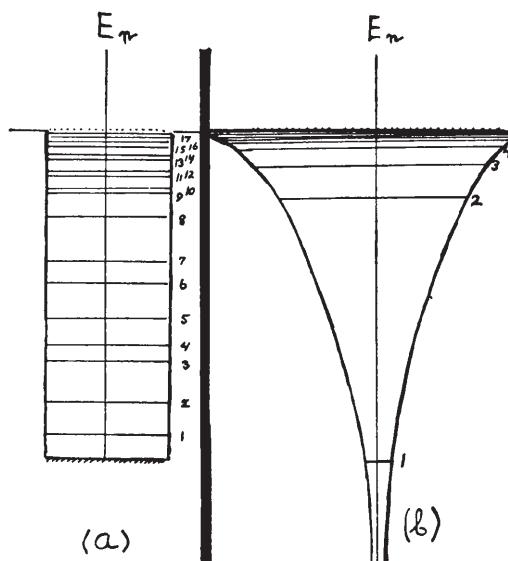


Рис. 22. Квантовые уровни энергии в прямоугольной потенциальной яме (a) и в воронкообразной потенциальной яме (b).

Здесь следует отметить, что распределение потенциала по форме прямоугольного колодца, показанное на рис. 22а, оказалось очень полезным для описания движения протона и нейтрона внутри атомного ядра, а позже успешно использовалось Марией Гёпперт-Майер и Хансом Йенсеном (независимо друг от друга) для изучения уровней энергии в атомных ядрах и происхождения рентгеновских спектров радиоактивных ядерных частиц.

Частоты различных видов Ψ -колебаний соответствуют не частотам световой волны, излучаемой атомом, а значениям энергии различных квантовых состояний, деленным на \hbar . Таким образом, излучение спектральной линии потребовало возбуждения двух видов колебаний, скажем, если Ψ_m и Ψ_n с результирующей составной частотой:

$$\nu_{m,n} = \frac{E_m}{\hbar} - \frac{E_n}{\hbar} = \frac{E_m - E_n}{\hbar},$$

что совпадает с выражением Бора для частоты кванта света, возникающего в результате перехода атомного электрона с энергетического уровня E_m на более низкий энергетический уровень E_n .

ПРИМЕНЕНИЕ ВОЛНОВОЙ МЕХАНИКИ

Помимо более рационального обоснования первоначальной идеи Бора о квантовых орбитах и устранения некоторых несогласий, волновая механика могла бы объяснить некоторые явления, выходящие за рамки старой квантовой теории. Как было упомянуто в главе 2, автор настоящей книги и, независимо, команда, состоящая из Рональда Герни и Эдварда Кондона, успешно применила волновое уравнение Шредингера для объяснения излучения α -частиц радиоактивными элементами и их проникновения в ядра других более легких элементов с результирующим превращением элементов. Чтобы понять это довольно сложное явление, мы сравним атомное ядро с крепостью, окруженной со всех сторон высокими стенами; в ядерной физике эти стены называют потенциальным барьером. Поскольку атомное ядро и α -частица несут положительный электрический заряд, сущ-

ствует сильная отталкивающая кулоновская сила*, действующая на α -частицу, приближающуюся к ядру.

Под действием этой силы α -частица, летящая в ядро, может быть остановлена и отброшена назад еще до того, как вступит в прямой контакт с ядром. С другой стороны, α -частицы, которые находятся внутри различных ядер в качестве составных частей, неизбежно находятся под влиянием очень сильных притягивающих ядерных сил (аналогичных силам сцепления обычных жидкостей), но эти ядерные силы действуют только тогда, когда частицы находятся в непосредственном контакте друг с другом. Комбинация этих двух сил образует потенциальный барьер, препятствующий выходу внутренних частиц и проникновению внешних частиц, если только их кинетическая энергия недостаточно высока, чтобы перелезть через него. Резерфорд экспериментально обнаружил, что α -частицы, испускаемые различными радиоактивными элементами, такими как уран и радий, имеют гораздо меньшую кинетическую энергию, чем та, которая необходима для преодоления барьера. Также было известно, что когда α -частицы, летящие снаружи, сталкиваются с ядрами с кинетической энергией, меньшей чем необходимо для преодоления потенциального барьера, они часто проникают в ядра, производя искусственные ядерные превращения. Согласно базовым принципам классической механики, оба явления были абсолютно невозможны, так что не могло существовать никакого самопроизвольного ядерного распада, приводящего к эмиссии α -частиц, и никаких искусственных ядерных превращений под воздействием последних. И все же оба явления экспериментально наблюдались!

Если взглянуть на ситуацию с точки зрения волновой механики, то она выглядит совсем иначе, поскольку движение частиц регулируется волнами-пилотами де Бройля. Чтобы понять, как волновая механика объясняет эти «невозможные» события, нужно помнить, что волновая механика находится в том же отношении к классической ньютоновской механике, что и волновая оптика к старой геометрической оптике. Согласно закону Снеллиуса, световой луч, падающий на стеклянную поверхность под опреде-

* Во время ранних исследований электрических явлений французский физик Шарль де Кулон обнаружил, что силы, действующие между заряженными частицами, пропорциональны произведению их электрических зарядов и обратно пропорциональны квадрату расстояния между ними. Это и есть закон Кулона.

ленным углом падения i (рис. 23а), преломляется под меньшим углом r , удовлетворяя условию $\sin i / \sin r = n$, где n — показатель преломления стекла. Если мы изменим ситуацию (рис. 23б) и позволим лучу света, распространяющемуся через стекло, выйти в воздух, угол преломления будет больше, чем угол падения, и мы получим: $\sin i / \sin r = 1/n$. Таким образом, луч света, падающий на поверхность раздела между стеклом и воздухом под углом падения, превышающим определенное критическое значение, вообще не попадет в воздух, а будет полностью отражен обратно в стекло. Согласно волновой теории света, ситуация иная. Световые волны, испытывающие полное внутреннее отражение, не отражаются от математической границы между двумя веществами, а проникают во вторую среду (в данном случае в воздух) на глубину нескольких длин волн λ и затем отбрасываются обратно в исходную среду (рис. 23с). Поэтому, если мы поместим другую стеклянную пластинку на расстоянии в несколько длин волн (несколько миcron, если мы имеем дело с видимым светом), некоторое количество света, попадающего в воздух, достигнет поверхности этого стекла и продолжит распространяться в первоначальном направлении (рис. 23д). Теорию для данного явления можно найти в книгах по оптике, опубликованных сто лет назад; она стандартно представлена во многих университетских курсах по оптике.

Точно так же волны де Бройля, которые направляют α -частицы и другие атомные «снаряды», могут проникать через области пространства, которые являются запрещенными для частиц классической ньютоновской механикой, а сами α -частицы, протоны и т.д. могут пересекать потенциальные барьеры, чья высота больше, чем энергия падающей частицы. Но вероятность проникновения имеет физическое значение только для частиц с массой порядка атомной, а также для барьера шириной не более 10^{-12} или 10^{-13} см. Возьмем, к примеру, ядро урана, которое испускает α -частицу с интервалом около 10^{10} лет. Заключенная в урановом потенциальном барьере α -частица ударяется о стенку барьера примерно 10^{21} раз в секунду, что означает, что вероятность ее выживания после удара составляет один к $10^{10} \times 3 \cdot 10^7 \times 10^{21} \cong 3 \cdot 10^{38}$ (здесь 3×10^7 — количество секунд в году). Точно так же шансы, что атомный снаряд попадет в ядро, очень малы для каждого отдельного удара, но могут стать значительными, если происходит очень большое количество ядерных столкновений. В 1929 году Фридрих Хоутерманс и Роберт Аткинсон показали, что ядерные

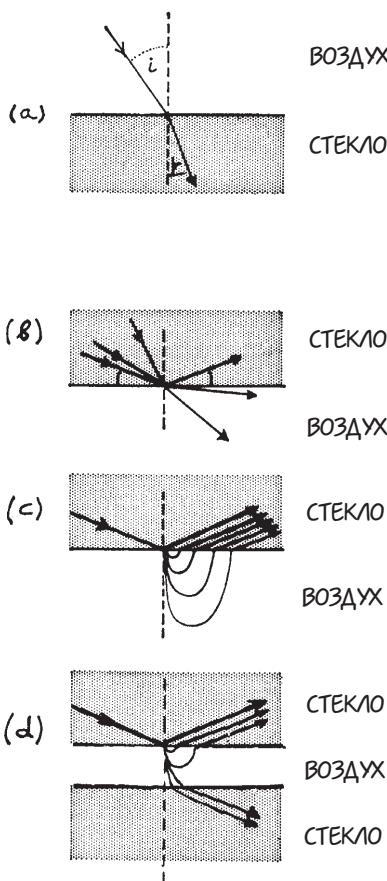


Рис. 23. Аналогия между волновой механикой и волновой оптикой. На рис. 23(а) изображена знакомая картинка преломления света, входящего из менее плотной в более плотную среду. На рис. 23(б) изображена обратная ситуация, когда свет, попадающий из более плотной в менее плотную среду, может полностью отражаться от границы раздела, если угол падения превышает некоторое критическое значение.

Согласно волновой теории света, отражение происходит не на математической поверхности, разделяющей две среды, а внутри определенного слоя толщиной в несколько волновых длин. Таким образом, если второй слой более плотной среды расположен на расстоянии в несколько волновых длин за пределами первого слоя, часть падающего света не будет полностью отражена, а проникнет во второй плотный слой, распространяясь в первоначальном направлении. Аналогично, согласно волновой механике, некоторые частицы могут проникать через области, где потенциал выше, чем исходная кинетическая энергия частиц, что является невозможным с точки зрения классической механики.

столкновения, вызванные интенсивным тепловым движением, известные как термоядерные реакции, производят энергию на Солнце и звездах. Сейчас физики усердно работают над созданием так называемых управляемых термоядерных реакций, которые обеспечат нас дешевыми, неисчерпаемыми и безвредными источниками ядерной энергии. Все это было бы невозможно, если бы классическая механика Ньютона не была заменена волновой механикой де Броиля — Шредингера.



Глава 5

В. ГЕЙЗЕНБЕРГ И ЕГО ПРИНЦИП НЕОПРЕДЕЛЕННОСТИ

Одновременно с работой Шредингера о волновой механике, появившейся в «Анналах физики», в другом немецком журнале, «Физический журнал», появилась статья Вернера Гейзенберга из Геттингенского университета, посвященная той же теме и содержащая точно такие же выводы. Но, к своему великому удивлению, физики, читавшие эти две статьи, обнаруживали, что они исходили из совершенно разных физических предположений, использовали совершенно разные математические методы и, казалось, не имели ничего общего друг с другом.

Как было описано в предыдущей главе, Шредингер считал, что движение атомных электронов управляетяется системой обобщенных трехмерных волн де Броиля, окружающих атомное ядро, формы и частоты колебаний которых определялись полем электрических и магнитных сил. Гейзенберг, с другой стороны, разработал более абстрактную модель. Он рассматривал атом так, как если бы он состоял из бесконечного числа линейных «виртуальных» источников колебаний с частотами, совпадающими со всеми возможными

частотами, которые мог излучать рассматриваемый атом. Таким образом, в то время как в представлении Шредингера излучение спектральной линии с частотой $v_{m, n}$ считалось «совместным результатом» двух колебательных функций Ψ_m и Ψ_n ^{*}, в модели Гейзенберга одна и та же спектральная линия излучалась отдельным источником колебаний, который мы можем назвать $V_{m, n}$.

В классической механике линейный источник колебаний опи- сывается двумя числами: его смещением от положения равновесия q и его скоростью v , причем обе величины периодически из- меняются во времени. В продвинутой механике принято вместо скорости v использовать механический импульс** p , определяе- мый как произведение массы частицы на ее скорость ($p = mv$). Для данного закона силы, действующей на источник колебаний, он будет иметь четко определенную частоту v .

Но оптический спектр обладает двойным многообразием ча- стот, которое можно представить в виде таблицы:

$V_{m, n}$	V_{11}	V_{12}	V_{13}	V_{14}	V_{15}	V_{16}	и т.д.
	V_{21}	V_{22}	V_{23}	V_{24}	V_{25}	V_{26}	и т.д.
	V_{31}	V_{32}	V_{33}	V_{34}	V_{35}	V_{36}	и т.д.
	V_{41}	V_{42}	V_{43}	V_{44}	V_{45}	V_{46}	и т.д.
	и т.д.	и т.д.					

Числовые массивы такого типа давно были известны матема- тикам, их называли матрицами и успешно использовали при ре-

* Для простоты мы используем здесь не три, а только одно квантовое число для каждого вида колебаний.

** Понятие механического импульса, которое Исаак Ньютон назвал коли- чеством движения, было дано в его книге «Математические начала натураль- ной философии» и возникло в результате сочетания второго и третьего зако- нов движения. Если две частицы, изначально находящиеся в состоянии по- коя, взаимодействуют друг с другом, то действующие силы F_1 и F_2 численно равны и направлены противоположно. С другой стороны, скорости, получен- ные в течение периода взаимодействия (v_1 и v_2), обратно пропорциональны массам (m_1 и m_2) двух частиц. Таким образом, «количества движения» (или механические импульсы, как мы их сегодня называем) численно равны и противоположно направлены. Это и есть знаменитый закон сохранения механического импульса.

шении различных алгебраических задач. Матрицы могут быть конечными, если брать индексы m и n от 1 до заданного числа, или бесконечными, если m и n идут до бесконечности. По сути, была разработана специальная ветвь математики, в которой любая заданная матрица (конечная или бесконечная) может быть представлена только одним символом, напечатанным жирным шрифтом. Таким образом, \mathbf{a} означает матрицу:

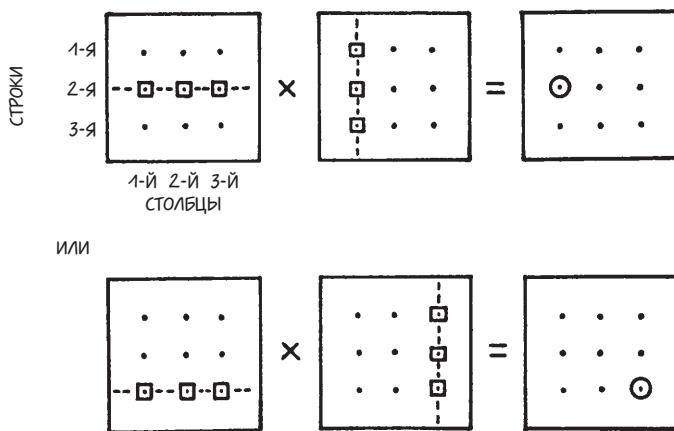
a_{11}	a_{12}	a_{13}	a_{14}	a_{15}	a_{16}	и т.д.
a_{21}	a_{22}	a_{23}	a_{24}	a_{25}	a_{26}	и т.д.
a_{31}	a_{32}	a_{33}	a_{34}	a_{35}	a_{36}	и т.д.
a_{41}	a_{42}	a_{43}	a_{44}	a_{45}	a_{46}	и т.д.
и т.д.	и т.д.					

Как и обычные числа, матрицы можно складывать, вычитать, умножать и делить друг на друга. Правила сложения и вычитания аналогичны правилам обычных чисел: складывать и вычитать элементы нужно один за другим. Например:

$$\mathbf{a} \pm \mathbf{b} = \begin{array}{cccc} a_{11} \pm b_{11} & a_{12} \pm b_{12} & a_{13} \pm b_{13} & \text{и т.д.} \\ a_{21} \pm b_{21} & a_{22} \pm b_{22} & a_{23} \pm b_{23} & \text{и т.д.} \\ a_{31} \pm b_{31} & a_{32} \pm b_{32} & a_{33} \pm b_{33} & \text{и т.д.} \\ \text{и т.д.} & \text{и т.д.} & \text{и т.д.} & \text{и т.д.} \end{array}$$

Из этого определения следует, что сложение матриц подчиняется переместительному закону; то есть $\mathbf{a} + \mathbf{b} = \mathbf{b} + \mathbf{a}$, так же, как $3 + 7 = 7 + 3$ или $a + b = b + a$. Но законы умножения и деления матриц немного сложнее. Чтобы получить элемент в m -й строке и n -м столбце произведения \mathbf{ab} , нужно умножить \mathbf{a} , элемент за элементом, на всю последовательность элементов в m -й строке, а \mathbf{b} — на всю последовательность элементов в n -м столбце, и затем сложить все эти произведения вместе.

Схематически это правило может быть представлено следующими диаграммами, где обведенная точка произведения получается в результате сложения произведений точек, помещенных в квадраты:



Чтобы лучше понять этот процесс, вместо букв для элементов матрицы будем использовать числа и вычислим произведение двух матриц:

Для	<table border="1"> <tr><td>1</td><td>3</td><td>5</td></tr> <tr><td>2</td><td>5</td><td>1</td></tr> <tr><td>4</td><td>3</td><td>2</td></tr> </table>	1	3	5	2	5	1	4	3	2	\times	<table border="1"> <tr><td>3</td><td>5</td><td>4</td></tr> <tr><td>1</td><td>1</td><td>1</td></tr> <tr><td>2</td><td>3</td><td>5</td></tr> </table>	3	5	4	1	1	1	2	3	5	получаем	<table border="1"> <tr><td>16</td><td>23</td><td>32</td></tr> <tr><td>13</td><td>18</td><td>18</td></tr> <tr><td>19</td><td>29</td><td>29</td></tr> </table>	16	23	32	13	18	18	19	29	29
1	3	5																														
2	5	1																														
4	3	2																														
3	5	4																														
1	1	1																														
2	3	5																														
16	23	32																														
13	18	18																														
19	29	29																														

так как $1 \times 3 + 3 \times 1 + 5 \times 2 = 16$; $1 \times 5 + 3 \times 1 + 5 \times 3 = 23$ и т.п.

Теперь изменим порядок множителей и вычислим:

Для	<table border="1"> <tr><td>3</td><td>5</td><td>4</td></tr> <tr><td>1</td><td>1</td><td>1</td></tr> <tr><td>2</td><td>3</td><td>5</td></tr> </table>	3	5	4	1	1	1	2	3	5	\times	<table border="1"> <tr><td>1</td><td>3</td><td>5</td></tr> <tr><td>2</td><td>5</td><td>1</td></tr> <tr><td>4</td><td>3</td><td>2</td></tr> </table>	1	3	5	2	5	1	4	3	2	получаем	<table border="1"> <tr><td>29</td><td>46</td><td>28</td></tr> <tr><td>7</td><td>11</td><td>8</td></tr> <tr><td>28</td><td>36</td><td>23</td></tr> </table>	29	46	28	7	11	8	28	36	23
3	5	4																														
1	1	1																														
2	3	5																														
1	3	5																														
2	5	1																														
4	3	2																														
29	46	28																														
7	11	8																														
28	36	23																														

Результат сильно отличается от предыдущего! Переместительный (коммутативный) закон умножения, столь распространенный в арифметике и элементарной алгебре, не выполняется в матричных расчетах! Именно поэтому вычисления с матрицами называют некоммутативной алгеброй. Здесь следует отметить, что не все пары матриц обязательно дают разные результаты, когда порядок умножения меняется на обратный. Если результат один и тот же, говорят, что две матрицы коммутируют; если результат отличается, они не коммутируют.

Разделение матриц осуществляется так же, как и в обычной алгебре, где $\frac{a}{b} = a \cdot b^{-1}$, а значение b^{-1} (обратное этому числу) подчиняется условию $b \cdot b^{-1} = 1$. В некоммутативной алгебре $\frac{a}{b} = a \cdot b^{-1}$, где b^{-1} удовлетворяет условию $b \cdot b^{-1} = 1$ и

$$\mathbf{1} = \begin{array}{|c c c c c c|} \hline & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & \text{и т.д.} \\ & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & \text{и т.д.} \\ & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & \text{и т.д.} \\ \hline & \text{и т.д.} \\ \hline \end{array}$$

Идея Гейзенberга заключалась в том, что, поскольку частоты спектральных линий, излучаемых атомом, представляют собой бесконечную матрицу:

$$\nu_{m,n} = \begin{array}{|c c c c c|} \hline & \nu_{11} & \nu_{12} & \nu_{13} & \nu_{14} & \text{и т.д.} \\ & \nu_{21} & \nu_{22} & \nu_{23} & \nu_{24} & \text{и т.д.} \\ & \nu_{31} & \nu_{32} & \nu_{33} & \nu_{34} & \text{и т.д.} \\ \hline & \text{и т.д.} \\ \hline \end{array}$$

Механические величины, такие как скорости, импульсы и т.д., также должны быть записаны в виде матриц. Таким образом, механические импульсы и координаты должны быть заданы матрицами:

$$\mathbf{P} = \begin{array}{ccccc} p_{11} & p_{12} & p_{13} & p_{14} & \text{и т.д.} \\ p_{21} & p_{22} & p_{23} & p_{24} & \text{и т.д.} \\ p_{31} & p_{32} & p_{33} & p_{34} & \text{и т.д.} \\ \text{и т.д.} & \text{и т.д.} & \text{и т.д.} & \text{и т.д.} & \text{и т.д.} \end{array}$$

и

$$\mathbf{q} = \begin{array}{ccccc} q_{11} & q_{12} & q_{13} & q_{14} & \text{и т.д.} \\ q_{21} & q_{22} & q_{23} & q_{24} & \text{и т.д.} \\ q_{31} & q_{32} & q_{33} & q_{34} & \text{и т.д.} \\ \text{и т.д.} & \text{и т.д.} & \text{и т.д.} & \text{и т.д.} & \text{и т.д.} \end{array}$$

где отдельные значения $p_{m,n}$ и $q_{m,n}$ колеблются с частотами $v_{m,n}$, приведенными в таблице выше.

Подставляя p и q в уравнения классической механики, Гейзенберг рассчитывал получить отдельные значения частот и амплитуд различных «виртуальных» источников колебаний. Однако для получения окончательного результата необходим был еще один шаг. В классической механике p и q являются обычными числами, и поэтому в вычислениях не имеет значения: pq или qp . Матрицы \mathbf{p} и \mathbf{q} не коммутируют ($\mathbf{pq} \neq \mathbf{qp}$), поэтому необходимо ввести дополнительное условие, объясняющее разницу между \mathbf{pq} и \mathbf{qp} . Гейзенберг предположил, что эта разница, которая также является матрицей, равна единичной матрице \mathbf{I} с обычным числовым коэффициентом, для которого он взял $h/2\pi i$. Таким образом, дополнительным условием стало: $\mathbf{pq} - \mathbf{qp} = -\frac{h}{2\pi i}\mathbf{I}$. Добавив это условие к классическому уравнению механики, записанному в матричной форме, он получил систему уравнений, которая дала верные значения частот и относительных интенсивностей спектральных линий, которые были идентичны результатам, полученным Шредингером при использовании его волнового уравнения.

Неожиданное совпадение результатов, полученных волновой механикой Шредингера и матричной механикой Гейзенберга, которые, казалось, не имели ничего общего ни в физическом, ни в математическом планах, было объяснено Шредингером в одной

из его последующих работ. Ему удалось доказать, что, хотя это и казалось невероятным на первый взгляд, его волновая механика была математически идентична матричной механике Гейзенберга, и что на самом деле одно может быть выведено из другого. Это было так же удивительно, как то, что киты и дельфины — это не рыбы, как акулы или сельдь, а животные, как слоны или лошади! Но это был факт, и сегодня волновая и матричная механика взаимозаменяемы и используются одна вместо другой в зависимости от предпочтений и удобства.

В частности, при расчете интенсивностей излучения используются матричные элементы, рассчитанные на основе волновой механики.

ОТКАЗ ОТ КЛАССИЧЕСКИХ ЛИНЕЙНЫХ ТРАЕКТОРИЙ

Но несмотря на то, что новая квантовая теория, не важно, в волновой или матричной форме, дала прекрасное математическое описание атомных явлений, она не могла осветить физическую сторону вопроса. Какой физический смысл приписывать этим таинственным волнам, этим загадочным матрицам? Как они связаны с нашими научными представлениями о материи и мире, в котором мы живем? Ответ на этот вопрос дал Гейзенберг в своей статье 1927 года.

Гейзенберг начинает свое рассуждение с упоминания теории относительности Эйнштейна, которая во времена ее публикации (и, в некоторой степени, это продолжается до сегодняшнего дня) противоречила здравому смыслу, по мнению многих выдающихся физиков.

А что такое «здравый смысл»? Известный немецкий философ Иммануил Кант (с произведениями которого автор знаком лишь отдаленно), вероятно, определил бы его следующим образом: «Здравый смысл»? Странный вопрос. Здравый смысл определяет, каким все должно быть». И затем, если бы его спросили: «А что значит «каким все должно быть?»», он бы, наверное, ответил: «Ну, это означает: «таким, каким оно было всегда»*.

Эйнштейн, вероятно, был первым, кто осознал тот важный факт, что базовые понятия и законы природы, какими бы хорошо

* Этот воображаемый разговор является исключительно фантазией автора.

обоснованными они ни были, действительны только в рамках наблюдательских возможностей и не обязательно выходят за их пределы. Для людей древних культур Земля была плоской, но это уже не так для Магеллана и современных космонавтов. Основные физические представления о пространстве, времени и движении были хорошо разработаны и подчинялись здравому смыслу, пока наука не вышла за пределы, ограничивавшие ученых прошлого. Затем возникло резкое противоречие, главным образом из-за экспериментов Майкельсона, касающихся скорости света, которые вынудили Эйнштейна отказаться от старых представлений «здравого смысла» об исчислении времени, измерении расстояния и механики и привели к формулировке «нездравомысленной» теории относительности. Оказалось, что для очень высоких скоростей, очень больших расстояний и очень длительных периодов времени все было не так, как «должно быть».

Гейзенберг утверждал, что такая же ситуация имела место и в области квантовой теории, и он стал выяснять, что же не так с классической механикой материальных частиц, когда мы вторгаемся в область атомных явлений. Так же, как Эйнштейн начал критический анализ несостоятельности классической физики в релятивистской области критикой таких основных понятий, как одновременность двух событий на расстоянии, Гейзенберг атаковал основное понятие классической механики — понятие траектории движущегося физического тела. Траекторией с незапамятных времен считался путь, по которому тело движется в пространстве. В предельном случае, используемом в математических вычислениях, «тело» было математической точкой (без размера, по определению Евклида), тогда как «путь» был математической линией (не имеющей толщины, по мнению того же авторитета). Никто не сомневался, что этот предельный случай был наилучшим из возможных описаний движения и что, уменьшая экспериментальные ошибки в определении координат и скорости движущейся частицы, мы могли все ближе и ближе подходить к точному описанию движения.

Гейзенберг оспорил это положение и отметил, что оно, несомненно, было бы истинным, если бы миром управляли законы классической физики, однако существование квантовых явлений может полностью изменить ситуацию. Рассмотрим для начала идеальный эксперимент по определению траектории частицы, имеющей массу, ну, например, в гравитационном поле Земли. С

этой целью мы строим камеру и откачиваем из нее воздух, пока внутри нее не останется ни одной молекулы (рис. 24). На стенке этой камеры мы устанавливаем небольшую пушку C , которая стреляет снарядом с массой m и скоростью v , скажем, в горизонтальном направлении. На противоположной стенке камеры помещен небольшой теодолит T , который может быть направлен на падающую частицу по пути следования. Камера освещается электрической лампочкой B на потолке.

Свет от лампочки отражается от падающей частицы и попадает в теодолитную трубку, а положение частицы считывается либо сетчаткой глаза наблюдателя, либо проявляется на фотопластинке.

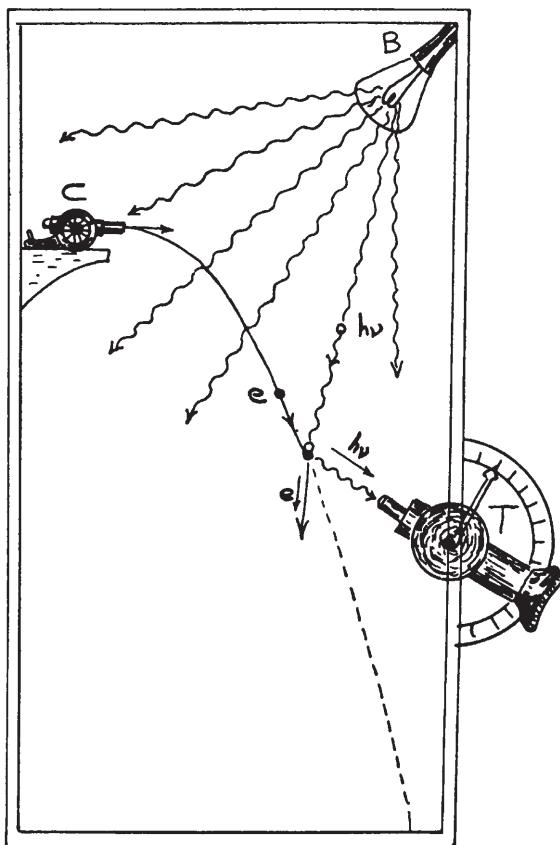


Рис. 24. Идеальный квантовый микроскоп Гейзенберга, интерпретирующий соотношения неопределенности: $\Delta p \Delta q \geq h$.

Поскольку эксперимент, который мы проводим, является идеальным, мы должны учитывать все возможные факторы, способные повлиять на движение частицы, и таковые существуют, несмотря на полное отсутствие воздуха в камере. Поскольку свет от лампочки отражается на трубку теодолита, он оказывает на частицу определенное давление, которое отклоняет частицу от ее ожидаемой параболической траектории. Можно ли свести это воздействие к минимуму, сделать бесконечно маленьким?

Будем действовать пошагово и оценим сначала только десять положений частицы; мы зажигаем лампу только десять раз за время падения и, таким образом, устраним эффект давления света, пока на частицу не смотрят. Предположим, что при первой попытке эффект от десяти ударов, вызванных отраженным светом, отклоняет частицу слишком далеко от ожидаемой траектории. Есть простое решение. Мы можем уменьшить интенсивность до необходимого показателя, поскольку в классической физике не существует нижнего предела количества излучаемой энергии, которая может выпускаться за одну вспышку, а также нет предела чувствительности объекта воздействия отраженного света. Сокращая интенсивность, мы можем сделать общее отклонение от траектории во время полета частицы меньше любого выбранного нами числа ϵ . Если теперь мы решим увеличить количество наблюдаемых положений в десять раз для более точного определения траектории, во время полета нам придется включить лампочку сто раз. Эффект давления излучения в течение всего полета, соответственно, возрастет, и общее отклонение может стать больше, чем ϵ . Чтобы исправить ситуацию, мы используем лампочку в десять раз слабее, а рецептор — в десять раз чувствительнее. Следующие шаги будут состоять из 1000, 10 000, 100 000 и т.д. наблюдений с использованием, соответственно, более слабых ламп и более чувствительного детектора. В пределе мы получаем бесконечное количество наблюдений, где траектория не изменяется больше, чем на ϵ . Есть еще один момент, который необходимо учитывать.

Независимо от того, насколько мала движущаяся точка, из-за явлений дифракции ее оптическое изображение на экране не может быть меньше длины волны λ используемого света. И это снова можно исправить уменьшением λ и использованием вместо видимого света ультрафиолетового, рентгеновского излучения,

и все более и более жестких γ -лучей. Поскольку в классической физике не существует нижнего предела длины электромагнитных волн, диаметр каждой дифракционной картины, таким образом, можно сделать настолько малым, насколько это необходимо. Поступая таким образом, мы можем наблюдать путь, сколь угодно тонкий, не нарушая общее движение более чем на ϵ . Таким образом, в рамках классической физики мы можем концептуально выстроить понятие траектории как линии в евклидовом смысле этого слова.

Но соответствует ли это евклидово положение вещей реальности? Нет, говорит Гейзенберг. Он утверждал, что процедура нашего идеального эксперимента становится невозможной из-за существования световых квантов. Фактически наименьшее количество энергии, переносимой «вспышкой света», равно $h\nu$, что соответствует механическому импульсу $h\nu/c$. При отражении вспышек на теодолит частица сообщается импульсом, изменяя ее импульс следующим образом:

$$\Delta p \cong \frac{h\nu}{c}.$$

Таким образом, число наблюдений увеличивает отклонение траектории сверх какого-либо предела, и вместо движения вдоль параболы мы увидим броуновское движение частицы, при котором ее будет отбрасывать туда-сюда по всей камере. Единственный способ уменьшить это отклонение — это уменьшить ν , а так как $\nu = c/\lambda$, длина волны будет увеличиваться, пока не станет такой же большой, как камера.

Тогда вместо того чтобы видеть маленькие искры, прыгающие по экрану, мы бы могли наблюдать систему больших, перекрывающих друг друга дифракционных пятен, которые бы занимали весь экран.

Тогда, используя этот метод, мы бы не добились ничего похожего на математические линии.

Единственная альтернатива — искать компромисс. Мы должны использовать фотоны с не очень высокой частотой и не очень большой длиной волны. Поскольку неопределенность Δq в наших знаниях о положении частицы равна $\cong \lambda = c/\nu$ мы получаем:

$$\Delta p \cong \frac{h\nu}{c} = \frac{h}{\lambda},$$

или

$$\Delta p \Delta q \cong h^*.$$

что является известным соотношением неопределенностей Гейзенберга.

С точки зрения скорости это соотношение выглядит как:

$$\Delta v \Delta q \cong \frac{h}{m},$$

показывая, что отклонения от классической механики становятся значительными только для очень маленьких масс. Для частицы с массой в 1 мг** получаем:

$$\Delta v \Delta q \cong \frac{10^{-27}}{10^{-3}} = 10^{-24},$$

что удовлетворяется если:

$$\Delta v \cong 10^{-12} \frac{\text{см}}{\text{сек}}; \quad \Delta q = 10^{-12}.$$

Таким образом, благодаря этому соотношению скорость небольшой картечины не определена в пределах 0,3 метра в столетие, а неопределенность ее положения сопоставима с диаметром атомного ядра. Очевидно, что никому нет дела до таких неопределенностей!

С другой стороны, для электрона с массой 10^{-27} г имеем:

$$\Delta v \Delta q \cong \frac{10^{-27}}{10^{-27}} \cong 1.$$

Поскольку утверждение, что электрон находится внутри атома, означает, что $\Delta q \cong 10^{-8}$ см, мы находим, что неопределенность его скорости:

$$\Delta v \cong \frac{1}{10^{-8}} = 10^8 \frac{\text{см}}{\text{сек}}.$$

Неопределенность кинетической энергии, соответствующая этой неопределенности скорости, равна:

$$\Delta K \cong m v \Delta v = 10^{-27} \times 10^{-8} \times 10^{-8} \cong 10^{-11} \text{ эрг} \cong 10 \text{ эВ}$$

* Это соотношение часто обозначается как \cong , что означает «приблизительно равно», или \sim , означающее «порядка», или, как на рис. 25, как \gg , что означает «больше либо равно».

** Миллиграмм (мг) составляет одну тысячную грамма, то есть массу одного кубического миллиметра воды при 4°C.

что сравнимо с общей энергией связи электрона в атоме. Очевидно, что в этих обстоятельствах бессмысленно проводить линии электронных орбит в атоме, поскольку ширина этих линий будет сопоставима с диаметрами квантовых орбит Бора!

Можно сказать, что траекторию частицы следует наблюдать не оптическим методом, что приводит к описанным трудностям, а с помощью каких-то механических приспособлений, разбросанных в пространстве, а для регистрации прохождения частиц вблизи них — колокольчики, которые звенят при ударе частицы о них. Но здесь снова возникает проблема. Предположим, что регистрирующее устройство состоит из подвижной частицы внутри оболочки радиуса l . Эта частица, будучи квантованной, имеет последовательность квантовых состояний, различающихся по своим механическим импульсам на величины:

$$\Delta p \cong \frac{h}{l}.$$

Таким образом, если удар падающей частицы переводит устройство из одного квантового состояния в другое, то падающая частица теряет значительную часть своего импульса. Но l — это неопределенность Δq в положении падающей частицы, поскольку она может попасть в регистрирующее устройство в любой точке его поверхности. Таким образом, мы снова получаем:

$$\Delta p \Delta q \cong h$$

для измерений, проводимых механическими методами. Можно отметить, что этот метод звянящего колокольчика широко используется в экспериментальной ядерной физике под названием камера Вильсона, где ионизированные атомы газа (с конденсированными на них водянымиарами) образуют длинные следы (треки), показывающие движение различных атомных частиц. Но следы камеры Вильсона не являются математическими линиями и на самом деле намного толще, чем позволяет соотношение неопределенности.

Поскольку в атомной и ядерной физике понятие классических линейных траекторий неизбежно терпит неудачу, очевидна необходимость разработки другого метода описания движения материальных частиц, и здесь нам на помощь приходят Ψ -функции. Они не принадлежат к физической реальности. Волны де Бройля не имеют такой массы, как электромагнитные волны, и, в то время как, в принципе, можно купить полкило красного

света, в мире не существует ни грамма волн де Броиля. Они не более материальны, чем линейные траектории классической механики, и, по сути, их можно описать как «расширенные математические линии». Они направляют движение частиц в квантовой механике в том же смысле, что и линейные траектории направляют движение частицы в классической механике. Но так же, как мы не рассматриваем орбиты планет в Солнечной системе как своего рода железнодорожные пути, которые заставляют Венеру, Марс и нашу Землю двигаться по эллиптическим орбитам, мы не можем рассматривать волново-механические непрерывные функции как некоторое поле сил, которые влияют на движение электронов.

Волновые функции де Броиля — Шредингера (точнее, квадрат их абсолютных значений, т.е. $|\Psi|^2$), просто определяют вероятность того, что частица будет найдена в той или иной части пространства и будет двигаться с той или иной скоростью.

Мы не можем закончить эту главу, не описав захватывающий спор между Нильсом Бором, который был большим защитником отношений неопределенности, и Альбертом Эйнштейном, который до самой смерти оставался их ярым противником. Этот инцидент произошел в Брюсселе на шестом Сольвеевском конгрессе (1930 г.), который был посвящен проблемам квантовой теории и затрагивал тему (как можно ожидать из присутствия Эйнштейна!) соотношения неопределенностей в четырех координатах.

До сих пор в этой книге мы упомянули отношение $\Delta p \Delta q \cong h$ для любой отдельной координаты и соответствующего механического импульса. Однако в трехмерной декартовой системе координат существуют три независимых соотношения:

$$\Delta p_x \Delta x \cong h,$$

$$\Delta p_y \Delta y \cong h,$$

$$\Delta p_z \Delta z \cong h.$$

Поскольку в теории относительности время (в форме ct^*) служит четвертой координатой, а энергия (в форме E/c) — четвертым компонентом механического импульса, можно ожидать, что существует четвертое соотношение неопределенностей:

* Где $c = 3 \times 10^{10}$ см/сек — скорость света в вакууме.

$$\Delta E \Delta t \geq h,$$

и именно эта тема привела к инциденту на конгрессе. Эйнштейн выступил с заявлением, что может предложить идеальный эксперимент, противоречащий этому четвертому соотношению.

Он сказал, что размышлял о коробе, выложенном изнутри идеальными зеркалами (как куб Джинса, о котором мы говорили в главе 1) и наполненном определенным количеством светового излучения. В одной из стенок расположен некий идеальный фотографический затвор, связанный с идеальным будильником, который можно установить так, чтобы затвор работал в любой момент времени после того, как ящик был заполнен излучением (рис. 25). Поскольку часы находятся внутри коробки, а затвор закрыт, внутренняя часть коробки полностью изолирована от внешнего мира. Эйнштейн предложил взвесить коробку до срабатывания будильника.

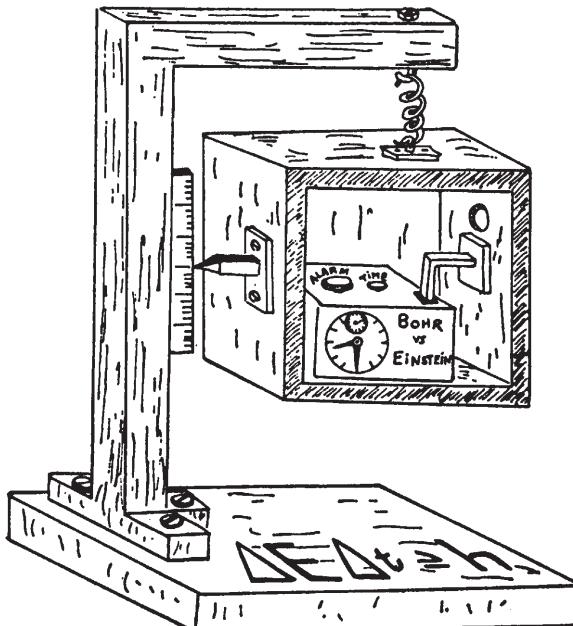


Рис. 25. Идеальный эксперимент Бора, который опроверг утверждение Эйнштейна о неправильности соотношения $\Delta E \Delta t \geq h$.

Взвешивание может быть выполнено с любой желаемой точностью, при условии достаточного количества времени. Затвор откроется в тот самый момент, на который был установлен будильник, и будет выпущено определенное количество светового излучения. После закрытия затвора можно снова взвесить коробку с любой необходимой точностью. Изменение массы коробки $M_2 - M_1$ можно получить с любой точностью из двух измерений веса, а умножение на c^2 даст точное количество излучаемой энергии, так что $\Delta E = 0$. С другой стороны, идеальные часы сработают безукоризненно, так что не будет никакой неопределенности во времени, когда эта энергия испускалась, и $\Delta t = 0$ тоже. Получив одновременно $\Delta E = 0$ и $\Delta t = 0$, мы уничтожаем четвертое соотношение неопределенности. Аргумент казался очень убедительным, и Бор не знал, что сказать. Но на следующее утро, после почти бессонной ночи, Бор с сияющим лицом появился в зале заседаний с объяснением. Он отметил, что для того, чтобы взвесить коробку, ее нужно перемещать в вертикальном направлении независимо от того, используются ли рычажные или пружинные весы. Часы, изменяя свое положение в гравитационном поле Земли, будут терять или выигрывать время, согласно закону Эйнштейна, касающемуся влияния гравитационного потенциала на ход часов. Появится неопределенность Δt во время спуска затвора. С другой стороны, амплитуда вертикальных колебаний короба, которая определяет Δt , связана через обычное отношение $\Delta p_z \Delta z \cong \hbar$ с изменением массы, которое задает качание короба при потере энергии. Поиграв с уравнениями, Бор легко пришел к выводу, что $\Delta E \Delta t \cong \hbar$, и таким образом опроверг аргумент Эйнштейна, используя его собственные важнейшие открытия.

Эта глава была сосредоточена на принципе Гейзенберга, а не на его личных качествах, но автор может добавить, что Гейзенберг был опытным лыжником, играл в пинг-понг левой рукой и, несмотря на свою большую славу в качестве физика, был лучше известен в Лейпциге (где он был профессором) как первоклассный пианист.



Глава 6

П. ДИРАК И АНТИЧАСТИЦЫ

Теория относительности и квантовая теория, появившиеся почти одновременно в начале нынешнего столетия, были двумя грандиозными взрывами человеческого разума и потрясли самые основы классической физики: относительность для скоростей, приближающихся к скорости света; квант для движения, ограниченного очень маленькими (атомными) размерами. Но на протяжении почти трех десятилетий эти две великие теории так или иначе существовали отдельно друг от друга. Первоначальная теория квантовых орбит Бора, а также волновые уравнения Шредингера, в которые она переросла, были по сути нерелятивистскими; обе теории были применимы только к частицам, движущимся с небольшой скоростью (относительно скорости света).

Но скорости электронов внутри атомов не так малы. Например, электрон на первой орбите атома водорода имеет скорость $2,2 \times 10^8$ см/сек (если вычислять по Бору), что составляет лишь немногим менее 1% от скорости света. Скорость электронов внутри более тяжелых атомов значительно больше. Конечно, несколько процентов — это не слишком много, и рассчитанное значение можно сделать более точным, введя «релятивистские поправки»,

тогда оно стало бы несколько лучше соглашаться с измерениями, полученными в результате эксперимента. Но это лишь небольшое усовершенствование, а не окончательная теория.

Другая проблема касалась магнитного момента электрона. В 1925 году Гаудсмит и Уленбек доказали, что для объяснения некоторых деталей атомных спектров необходимо приписать электрону определенные угловые и магнитные импульсы*, известные всем как спин электрона. В то время бытовало наивное представление об электроне как о сфере с низким зарядом и диаметром 3×10^{-18} см. Предполагалось, что быстрое вращение этой сферы вокруг своей оси создает магнитный момент, что приводит к дополнительному взаимодействию с ее орбитальным движением и с магнитными моментами других электронов. Однако оказалось, что для создания необходимого магнитного поля электрон должен вращаться так быстро, что точки на его экваторе перемещались бы с гораздо более высокими скоростями, чем скорость света. Здесь снова возникает конфликт между квантовой и релятивистской физикой. Становилось ясно, что теорию относительности и квантовую физику нельзя просто сложить вместе. Необходима более общая теория, которая содержала бы как релятивистские, так и квантовые идеи в единой гармоничной форме.

Самый важный шаг в этом направлении был сделан в 1928 году британским физиком П. Дираком, который начал свою карьеру в качестве инженера-электрика, но, не найдя для себя достойной работы, подал заявку на стипендию в области физики в Кембриджском университете. Его заявление (которое было принято) в настоящее время висит в симпатичной рамке в университетской библиотеке рядом с сертификатом о присуждении Нобелевской премии, который он получил скоро после перехода от электромеханики к квантовой физике.

Сейчас вокруг известных ученых нередко возникает образ «рассеянного профессора». В большинстве случаев это просто выдумки, но относительно Дирака, все эти истории действительно правдивы, по крайней мере, по мнению автора. Приведем некоторые из них здесь для будущих историков.

Дирак был великим физиком-теоретиком, а потому любил строить теории касательно всех повседневных жизненных про-

* См. Фрэнсис Биттер «Магниты: образование физика (1959). (Книга не переведена на русский язык. — Примеч. пер.).

блем, а не находить их решение непосредственно экспериментальным путем. Однажды на вечеринке в Копенгагене он предложил теорию, согласно которой существует определенное расстояние, на котором лицо женщины выглядит наилучшим образом. Он утверждал, что при $d = \infty$ ничего нельзя увидеть в любом случае, а при $d = 0$ овал лица деформируется из-за маленького разреза человеческого глаза, и многие недостатки (например, мелкие морщины) становятся преувеличенными. Таким образом, существует определенное оптимальное расстояние, на котором лицо выглядит лучше всего.

— Скажи мне, Пол, — спросил я, — насколько близко ты когда-либо видел лицо женщины?

— О, — ответил Дирак, отводя ладони от лица чуть больше, чем на полметра, — примерно настолько.

Несколько лет спустя Дирак женился на «сестре Вигнера», известной среди физиков, потому что она была сестрой известного венгерского физика-теоретика Юджина Вигнера.

Когда один из старых друзей Дирака, который еще не знал о женитьбе, зашел к нему в гости, он увидел у Дирака привлекательную женщину, которая подавала чай, а затем удобно устроилась на диване.

— Как поживаете? — сказал друг, размышляя, что это за женщина.

— О! — воскликнул Дирак. — Извините. Я забыл представить вас. Это... это сестра Вигнера*.

Чувство квантового юмора Дирака часто можно было наблюдать на научных встречах. Однажды в Копенгагене Клейн и Нишина продемонстрировали выведенную ими знаменитую формулу Клейна — Нишины, описывающую столкновения между электронами и гамма-квантами. После того как на доске была написана окончательная версия, кто-то из присутствовавших, кто уже видел рукопись работы, заметил, что в формуле, написанной на доске, второй член был со знаком «минус», тогда как в рукописи знак был «плюс».

— О, — сказал Нишина, выступавший с речью, — в рукописи знаки, безусловно, правильные, но здесь, на доске, я, должно быть, допустил ошибку в каком-то месте.

* В недавнем разговоре с миссис Дирак (в Остине, штат Техас, кто бы мог подумать!) автор спросил, правдива ли эта история. Она сказала, что на самом деле Дирак сказал: «Это сестра Вигнера, которая теперь моя жена».

— В нечетном количестве мест! — заметил Дирак.

Другой пример острого наблюдения Дирака имеет литературный характер. Его друг Петр Капица, русский физик, дал ему «Преступление и наказание» Достоевского в английском переводе.

— Ну, как вам? — спросил Капица, когда Дирак вернул книгу.

— Довольно неплохо, — сказал Дирак, — но в одной из глав автор допустил ошибку. Он описывает восход солнца дважды в течение одного дня.

Это был его единственный комментарий к роману Достоевского*.

Еще одна история произошла в гостях у Капицы: Дирак разговаривал с Петром о физике и наблюдал за тем, как Анна Капица вязала. Через пару часов после ухода Дирак влетел обратно в дом, очень взволнованный. «Вы знаете, Аня, — сказал он, — наблюдая за тем, как вы вязали этот свитер, я заинтересовался топологическим аспектом проблемы. Я обнаружил, что есть другой способ сделать это и что существует только два возможных способа. Первый — тот, который использовали вы, а второй вот такой...» И он продемонстрировал его своими длинными тонкими пальцами. Его только что открытый «другой способ», сообщила ему Аня, уже хорошо известен женщинам и является не чем иным, как «изнаночной гладью».

Чтобы закончить «истории Дирака», прежде чем мы перейдем к его научным достижениям, позвольте мне упомянуть еще одну. Во время вопросов после лекции Дирака в университете Торонто кто-то из аудитории заметил: «Профессор Дирак, я не понимаю, как вы вывели формулу в верхней левой части доски».

«Это не вопрос, — огрызнулся Дирак, — это утверждение. Следующий вопрос, пожалуйста».

ОБЪЕДИНЕНИЕ КВАНТОВОЙ ТЕОРИИ И ТЕОРИИ ОТНОСИТЕЛЬНОСТИ

Теперь обратимся к достижениям Дирака в области физики. Как уже было сказано в начале главы, квантовую теорию и теорию относительности никто не мог совместить, словно они были дета-

* Услышав эту историю от Капицы, автор поленился еще раз прочитать «Преступление и наказание», чтобы выяснить, о какой главе идет речь. Но некоторые из читателей настоящей книги, возможно, захотят сами это выяснить.

лями китайской головоломки. На первый взгляд они хорошо прилегают друг к другу, но все равно остаются небольшие несоответствия, и картинка не получается идеальной.

Волновое уравнение Шредингера в квантовой теории выглядело очень похоже на классическое волновое уравнение, описывающее распространение звука или электромагнитных волн, но...

В классической физике рассматриваемые величины, будь то плотность воздуха или электромагнитные силы, всегда присутствуют в волновом уравнении в виде вторых производных*, то есть быстроты изменения скорости по x , y , z и t , что условно обозначается как

$$\frac{\partial^2 u}{\partial x^2}; \frac{\partial^2 u}{\partial y^2}; \frac{\partial^2 u}{\partial z^2}; \text{ и } \frac{\partial^2 u}{\partial t^2}.$$

Точное математическое решение таких уравнений всегда приводит к гармоническим волнам, распространяющимся в пространстве. Волновое уравнение Шредингера содержало вторые производные по x , y и z , но первую производную по t . Причина состояла в том, что это уравнение было выведено из классической ньютоновской механики, в которой ускорение движущейся материальной частицы пропорционально действующей силе. Фактически, если x — это положение частицы, ее скорость v (то есть скорость изменения ее положения со временем) является первой производной x по t :

$$\left(\frac{\partial x}{\partial t} \right),$$

тогда как ее ускорение a (то есть величина изменения ее скорости во времени) является второй производной:

$$\frac{\partial \left(\frac{\partial x}{\partial t} \right)}{\partial t},$$

что обычно записывается как

$$\frac{\partial^2 x}{\partial t^2},$$

* Понятие производных на элементарном уровне описывается в главе 3 («Расчеты») в книге автора под названием «Гравитация» (G. Gamov «Gravity»), опубликованной в 1962 году в этой же серии. См. также «Математические аспекты физики» Фрэнсиса Биттера (F. Bitter «Mathematical Aspects of physics»).

С другой стороны, сила F является первой производной потенциала P в этом положении:

$$\frac{\partial P}{\partial x}; \frac{\partial P}{\partial y} \text{ и } \frac{\partial P}{\partial z}.$$

Таким образом, основной закон движения Ньютона, утверждающий, что ускорение пропорционально силе, содержал первые производные по пространственным координатам и вторую производную по времени. Этот факт делает ньютоновское уравнение движения частицы математически неоднородным, придавая времени t статус, отличный от координат x, y, z . Эта ситуация, существовавшая веками в классической механике, отражена в нерелятивистской волновой механике Шредингера, в которой пространство и время рассматриваются как совершенно разные сущности.

Но как только мы пытаемся сформулировать законы квантовой теории на релятивистской основе, мы сталкиваемся с трудностью, заключающейся в том, что пространство и время очень тесно связаны друг с другом. Так, следуя основным идеям Эйнштейна, Г. Минковский сформулировал понятие четырехмерного пространственно-временного континуума, в котором время, умноженное на мнимую единицу $i = \sqrt{-1}$, рассматривается как эквивалентное трем пространственным координатам. В представлениях Минковского нет никакой разницы между x, y, z и ict (где c^* вводится из соображений размерности).

(В этой книге, посвященной квантовой теории, мы не будем подробно останавливаться на теории относительности; читателю, не знакомому с предметом, следует взять эту информацию из других книг**.

Однако автор может предположить, что человек, читающий следующие главы, хотя бы элементарно знаком с основными идеями теории Эйнштейна.)

Как было сказано ранее, волновое механическое уравнение должно содержать одинаковые производные во всех четырех координатах. Уравнение Шредингера, однако, полученное из уравнения Ньютона, не удовлетворяет этому условию. Первые попытки исправить этот дефект были предприняты независимо О. Клей-

* Коэффициент c (скорость света) нужен для соотнесения размерности.

** См. Герман Бонди «Относительность и здравый смысл».

ном и В. Гордоном, которые придали нерелятивистскому волновому уравнению Шредингера релятивистскую форму, просто введя вторые производные по времени вместо первых. Но хотя волновое уравнение Клейна-Гордона казалось очень заманчивым и очень релятивистским, оно страдало от ряда внутренних противоречий, и все попытки ввести в него спин любым рациональным способом привели к полному провалу.

Так было, пока однажды вечером 1928 года, сидя в кресле в своем кабинете в колледже Святого Иоанна и вытянув длинные ноги в направлении горящего камина, Поль Адриен Морис Дирак не выдвинул очень простую и просто блестящую идею.

Если нельзя получить хороший результат, используя в релятивистском волновом уравнении вторые производные по временной координате, то почему бы не использовать первые производные по пространственным координатам? Конечно, это будет означать введение большего количества мнимых единиц i , но это сделает волновое уравнение симметричным в пространстве и времени. Так появилось линейное уравнение Дирака (содержащее только первые производные), которое при применении к атому водорода немедленно привело к великолепным результатам. Все расщепления спектральных линий, которые упорно сопротивлялись интерпретации относительно спина и магнитного момента электрона, оказались совершенно логичными на основе новой теории.

Этот успех был особенно удивительным, потому что при формулировке своего уравнения, целью Дирака было только сделать его релятивистски правильным; вращающийся электрон сыграл в роли бонуса для правильного объединения теории относительности и квантовой теории. И это была не маленькая электрически заряженная и быстро вращающаяся сфера, а точечный заряд, который по воле уравнения Дирака вел себя как крошечный магнит.

Но после написания волнового уравнения, которое представляло собой идеальное объединение теории относительности и квантовой теории, Дираку пришлось столкнуться с другой трудностью, которая была характерна для любой попытки объединить эти две теории. Согласно известному соотношению Эйнштейна, масса покоя m_0 (выраженная в граммах) была эквивалентна энергии m_0c^2 (выраженной в эргах), где c — скорость света. Если эта

масса движется с определенной скоростью v , таким образом имея (в первом приближении) кинетическую энергию $K = \frac{1}{2}m_0v^2$ *, то полная энергия равна:

$$E = \frac{m_0c^2}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} \cong m_0c^2 + \frac{1}{2}m_0v^2**.$$

Но из-за математических свойств релятивистской механики Эйнштейна следует ожидать также тип движения, соответствующий полной энергии:

$$E = \frac{-m_0c^2}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} \cong -m_0c^2 - \frac{1}{2}m_0v^2***,$$

Это уравнение можно получить из предыдущего, написав $-m_0$ вместо $+m_0$, что физически означает введение отрицательной массы. Таким образом, релятивистская механика допускает в целом два отдельных набора уровней: уровни с энергией покоя $+m_0c^2$ и выше, другие с энергией покоя $-m_0c^2$ и ниже (рис. 26).

В то время как уровни энергии, показанные в верхней части диаграммы ($E > 0$), соответствуют знакомым типам движения материальных частиц (электрон, протон и т.д.), уровни энергии в нижней части диаграммы ($E < 0$) не соответствуют физической реальности. Частицы, имеющие отрицательную инертную массу, не наблюдаются в природе. Действительно, из-за отрицательного значения их массы они будут ускоряться в направлении, противоположном действующей на них силе, и, чтобы остановить движущуюся частицу такого типа, нужно воздействовать на нее в направлении ее движения, а не против него! Представьте себе две частицы, скажем, два электрона с численно равными массами, имеющими, однако, противоположные знаки ($+m$ и $-m$). Согласно кулоновскому закону, они будут отталкиваться друг от друга электростатическими силами, имеющими одинаковые числовые

* Или точнее: $m_0c^2 \left(\frac{1}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} \right) - 1$, что равно $\frac{1}{2}m_0v^2$, если $v \leq c$.

** Для $v \leq c$.

*** Для $v \leq c$.

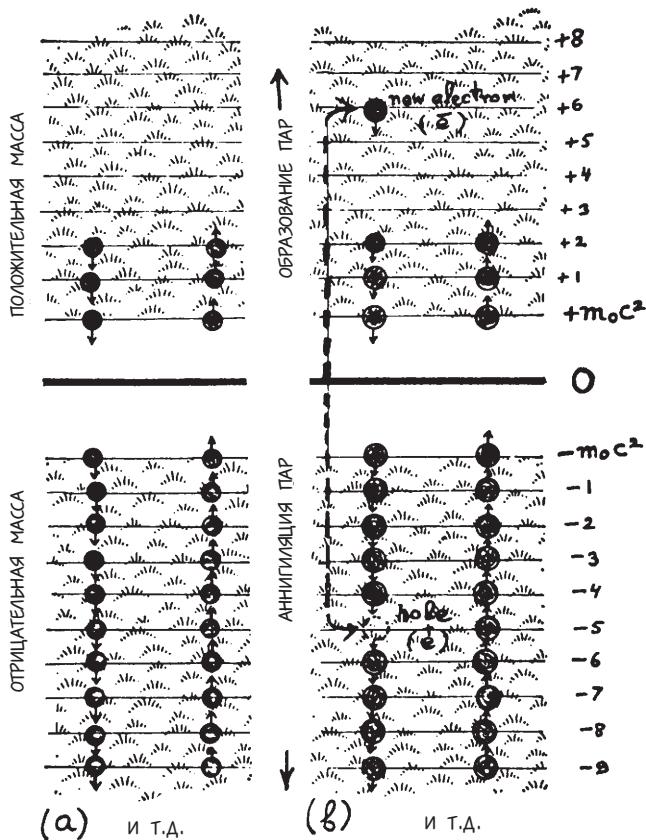


Рис. 26. Дираковская картина распределения уровней энергии частиц с положительной и отрицательной массой. Слева (а) все уровни отрицательной энергии полностью заполнены, и только шесть обычных электронов могут существовать на нормальных положительных уровнях. Справа (б) один из электронов с отрицательного уровня поднимается до положительного уровня, оставляя за собой «дырку», которая ведет себя как обычный положительный электрон с положительной массой. Если этот дополнительный электрон с положительного уровня возвращается обратно (процесс аннигиляции \bar{e} и e^+) разность энергий будет излучаться как γ -излучение).

значения, но действующие в противоположном направлении. Если бы обе частицы имели положительные массы, это взаимодействие приводило бы к одинаковым, но противоположно направленным ускорениям (рис. 27а), и они улетали бы друг от друга с увеличивающимися скоростями. Если, однако, одна из частиц имеет отрицательную массу (рис. 27б), она будет ускоряться в том же направлении, что и другая частица, и они будут лететь вместе, сохраняя постоянное расстояние между собой и ускоряясь сверх любого предела (c , разумеется). Здесь нет противоречия с законом сохранения энергии, так как объединенная кинетическая энергия двух частиц будет:

$$\frac{1}{2}mv^2 + \frac{1}{2}(-m)v^2 = 0,$$

что значит такой же, как это было до начала движения.

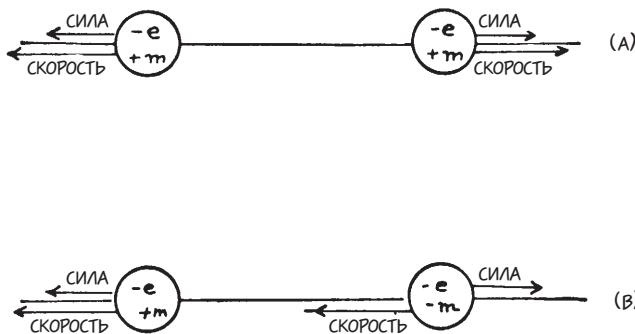


Рис. 27. Взаимодействие частиц с положительной и отрицательной массой.

Все это из области фантастики, и частицы, обладающие такими свойствами, никогда не были замечены.

В классической релятивистской механике (которая не учитывает квантовые явления) проблема частиц с отрицательной массой может быть легко устранена. Действительно, как видно из рис. 26, области положительных и отрицательных энергий разделены интервалом в $2m_0c^2$ (около 1 млн электронвольт, говоря об электронах). Поскольку в неквантовой механике (классической и релятивистской) изменения энергии должны быть непрерывными, частица из верхней части диаграммы не может переместиться в ниж-

нюю часть, потому что это потребовало бы скачкообразного изменения ее энергии.

Таким образом, в физическом описании Вселенной случаи отрицательных масс можно отвергнуть как нереализуемые математические возможности. Однако, если принимать во внимание квантовые явления, ситуация меняется довольно радикально: в квантовой теории электроны и другие элементарные частицы просто обожают перепрыгивать с более высоких уровней на более низкие. Таким образом, в релятивистской квантовой теории должно произойти парадоксальное событие: все нормальные электроны перепрыгнут из состояний с положительной массой в состояния с отрицательной массой, и Вселенная выйдет из строя!

Дирак видел лишь один способ разрешить этот парадокс, а именно: использовать принцип Паули и предположение, что все состояния, соответствующие отрицательной массе, уже заняты (два электрона с противоположным спином на каждое состояние), что не позволяет электронам из положительных состояний массы перепрыгнуть в них. Это напоминает ситуацию с уже знакомыми нам электронными оболочками атома, где электрон из M -оболочки не может перепрыгнуть в L - или K -оболочки, потому что они полностью заселены электронами, занявшими их ранее.

Но, в то время как атомы являются ограниченными структурами, содержащими конечное число электронов, теория Дирака относилась к безграничному пространству и требовала бесконечного числа электронов на каждый кубический сантиметр вакуума. Пока все хорошо, если пренебречь бесконечной массой этих электронов, которая, согласно релятивистской теории гравитации Эйнштейна (иногда называемой общей теорией относительности), сделала бы радиус кривизны пустого пространства равным нулю!

Отложив на потом эту трудность, Дирак спросил себя, будет ли это распределение отрицательно заряженных электронов с отрицательной массой наблюдаться, то есть детектироваться с помощью каких-либо физических измерительных приборов. Ответ был — нет. Никакое электрическое оборудование не сможет обнаружить равномерное распределение заряда в пространстве, независимо от того, насколько он велик на единицу объема. Чтобы понять это утверждение, давайте представим глубоководную рыбку, которая никогда не поднимается на поверхность океана и никогда не опускается на самое дно. Если мы предположим, что в воде

отсутствует трение (что-то вроде жидкого гелия), то выходит, что рыба, какой бы умной она ни была, не сможет определить, движется ли она в воде или в полном вакууме. А если что-то нельзя пронаблюдать, это нельзя использовать в физическом описании природы.

Наша глубоководная рыба привыкла видеть объекты, движущиеся вниз, будь то мусор, выброшенный за борт с кораблей, плывущих через океан, или, в редких случаях, сами тонущие корабли. Так, вслед за Аристотелем рыба усвоит понятие гравитации, которая заставляет все материальные объекты двигаться вниз.

Но предположим теперь, что у тонущей пустой бутылки «Coca-Cola» или тонущего океанского лайнера внутри заключен воздух, который выпускается, когда они достигают дна. Что же увидит наша умная рыба? Она увидит скопление серебристых сфер (пузырьки воздуха, если выражаться обычным человеческим языком), поднимающихся вверх. Что подумает наша умная рыба, наблюдая за этими объектами? Что ж, она будет поражена, что они движутся в направлении, противоположном направлению силы тяжести, и будет склонна приписывать им массу противоположного знака по отношению к обычным объектам, которые движутся вниз.

Можно привести несколько более близкую аналогию, если рассмотреть сложный атом с заполненными оболочками K , L и M , который подвергся жесткому рентгеновскому излучению и потерял один из двух электронов на K -оболочке. На K -оболочке образуется пустое пространство (пустота Паули), и один из электронов L -оболочки перепрыгнет на нее, оставив пустое пространство на своей оболочке. Следующим шагом будет переход наиболее подвижного электрона из M -оболочки на пустое место L -оболочки. Конечно, существует также вероятность того, что M -оболочка обойдет L -оболочку, и пустота на K -оболочке будет занята непосредственно одним из электронов M -оболочки.

ФИЗИКА АНТИЧАСТИЦ

Но мы можем взглянуть на проблему с другой точки зрения. Отсутствие отрицательного электрона на K -оболочке, равнозначно тому, что на ней располагается положительный заряд. Переход отрицательного электрона из L -оболочки вниз на K -оболочку равнозначен поднятию этого положительного заряда из K -оболочки.

ки на L -оболочку, а затем и на M -оболочку. С этой точки зрения мы имеем мнимую положительно заряженную частицу, которая перемещается с самого низкого уровня K на гораздо более высокий уровень M , а затем выходит в межатомное пространство. Поскольку, согласно закону Кулона, положительно заряженное ядро должно отталкивать положительно заряженный мнимый электрон, все идет превосходно.

Возвращаясь к морю Дирака, заполненному отрицательно заряженными электронами, обладающими отрицательной массой, мы спрашиваем себя, как экспериментатор воспримет ситуацию, в которой один отрицательный электрон с отрицательной массой отсутствует на своем уровне. Очевидно, из этого следуют два простых вывода: (1) Отсутствие отрицательного заряда будет наблюдаться исходя из наличия положительного заряда. При этом экспериментатор будет наблюдать частицу с электрическим зарядом $+e$. (2) Отсутствие отрицательной массы эквивалентно наличию положительной массы. Таким образом, частица будет вести себя как обычно и наблюдаваться как обычная положительно заряженная частица. Придя к таким выводам, Дирак понял, что слишком далекошел, развивая свою идею. Он считал, что можно доказать, что числовое значение массы этой дыры в океане электронов с отрицательной массой примерно в 1840 раз больше массы обычного электрона. Если бы это было действительно так, дыры в море Дирака наблюдались бы как обычные протоны.

Статья Дирака, опубликованная в 1930 году (или, точнее, личные беседы и переписка до ее публикации), вылилась в яростную критику его идеи. Нильс Бор, который по какой-то неизвестной автору причине интересовался слонами, написал охотничий рассказ «Как поймать живого слона».

Он предложил следующий метод африканским охотникам на крупную дичь: в месте водопоя на реке, куда слоны приходят пить и купаться, нужно поставить большой плакат, объясняющий коротким предложением идею Дирака. Когда слон, который, как известно, очень мудрый зверь, придет за водой, он прочтет текст на плакате и замрет от удивления на несколько минут. Этим временем и воспользуются прячущиеся в кустах охотники для того, чтобы выскоить и надежно связать ноги слона прочными веревками. Затем животное можно отправлять в зоопарк Хагенбека в Гамбурге.

Паули, который тоже любил шутки, сделал некоторые расчеты, которые показали, что, если бы протоны в атомах водорода были дырами Дирака, электроны перепрыгивали бы в них за ничтожно малую долю секунды, и атомы водорода (а также атомы всех других элементов) были бы мгновенно уничтожены взрывом высокочастотного излучения. Паули предложил так называемый Второй принцип Паули, согласно которому любая теория, предложенная теоретиком, сразу же должна быть применена к его собственному телу. Таким образом, Дирак превратится в гамма-лучи, прежде чем он сможет рассказать кому-либо о своей идее.

Все это было очень весело, но через год после публикации статьи Дирака американский физик Карл Андерсон, изучая электроны космических лучей, проходящие через сильное магнитное поле, обнаружил, что, хотя половина из них была отклонена в ожидаемом для отрицательно заряженных частиц направлении, другая половина была отклонена под тем же углом в противоположном направлении. Это были положительно заряженные электроны, иногда называемые позитронами, предсказанные теорией Дирака. Экспериментальные исследования позитронов показали, что они ведут себя именно так, как должны были дираковские дыры. Хотя позитроны были впервые обнаружены в космических лучах, вскоре выяснилось, что они также могут быть созданы в контролируемых лабораторных условиях просто путем обстрела металлических пластин жесткими гамма-лучами.

Столкнувшись с атомным ядром, γ -квант исчезает, и вся его энергия преобразуется в два электрона, один отрицательный и один положительный, как показано на рис. 28а.

Поскольку масса одного электрона, выраженная в единицах энергии, равна 0,5 МэВ, процесс происходит только в том случае, если энергия γ -луча $h\nu$ больше 1,0 МэВ. Избыток энергии:

$$h\nu - 2m_0c^2$$

сообщается к электронной паре (\bar{e} , \bar{e}), «рожденной» при столкновении. Судьбы этих двух электронов совершенно разные. Отрицательный (обычный) электрон \bar{e} постепенно замедляется при столкновениях с другими отрицательными электронами, образующими вещество, и становится одним из них. Положительный электрон \bar{e} не просуществует долго и аннигилирует при столкновении с одним из (обычных) отрицательных электронов, испуская

два γ -кванта (рис. 28б). Термины «рожденный» и «аннигилированный» не следует понимать в метафизическом смысле; с тем же успехом можно сказать, что лед «рождается» из воды, когда ее температура становится ниже точки замерзания, и «аннигилирует» при комнатной температуре, превращаясь в воду. Законы сохранения массы и энергии (которые фактически являются одним законом из-за формулы Эйнштейна $E = mc^2$) поддерживаются в обоих процессах, и мы здесь имеем дело только с преобразованием излучения в частицы и частиц в излучение на равных условиях.

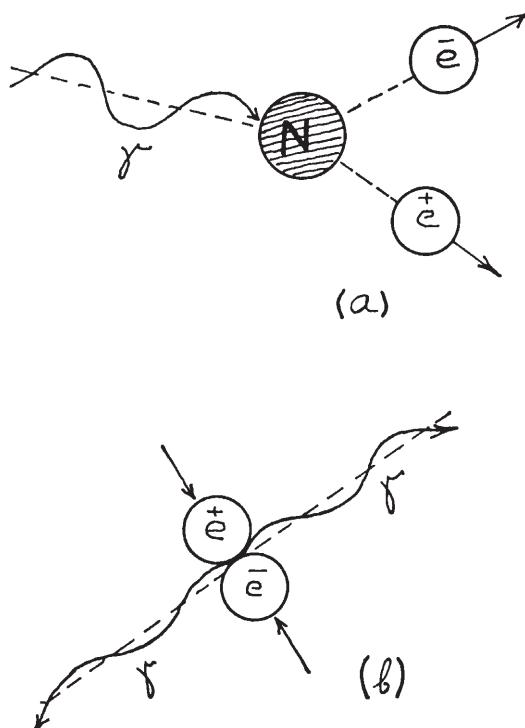


Рис. 28. «Рождение» и «аннигиляция» отрицательных и положительных электронов (\bar{e} и e^+) в соответствии с теорией Дирака: (a) γ -луч высокой энергии попадает в ядро (N) и превращается в пару \bar{e} и e^+ ; (b) пара \bar{e} и e^+ сталкивается в свободном пространстве и производит два γ -луча, движущихся в противоположных направлениях.

Обнаружение антиэлектронов (позитронов) подняло вопрос о том, существуют ли также антiproтоны, частицы, имеющие массу протона, но несущие отрицательный заряд. Поскольку протон примерно в 1840 раз тяжелее электрона, для образования пар протон—анти-протон требуется энергия миллиардов, а не миллионов электрон—вольт. Имея это в виду, Комиссия по атомной энергии потратила пропорциональные суммы в долларах на строительство ускорителей, которые могли бы сообщать ядерным снарядам необходимое количество энергии.

И в течение нескольких лет в Соединенных Штатах были построены два гигантских ускорителя: Беватрон в радиологической лаборатории Калифорнийского университета в Беркли и Космotron в Брукхейвенской национальной лаборатории на Лонг-Айленде, Нью-Йорк. Вскоре после этого аналогичные европейские аппараты были построены в ЦЕРНе, недалеко от Женевы, Швейцария, и в Советской России, недалеко от Москвы. Это было жесткое соревнование, которое, в конце концов, выиграли калифорнийцы, когда Эмилио Сегре и его коллеги объявили в октябре 1955 года, что они обнаружили отрицательные протоны, вышедшие из обстреливаемых объектов. Позже они также обнаружили антинейтроны, частицы которых аннигилируют при столкновении с обычными нейtronами. Как мы увидим позже, все другие вновь обнаруженные частицы (различные виды мезонов и гиперонов) также имеют себе противоположные.

Таким образом, хотя Дирак не смог в своем первоначальном намерении объяснить протон как антиэлектрон, он открыл широкую область физики античастиц.

Есть две нерешенные загадки об античастицах. Атомы, образующие земной шар, состоят из отрицательных электронов, положительных протонов и обычных нейтронов. Согласно астрономическим исследованиям, то же самое верно для всей Солнечной системы и самого Солнца. Фактически протоны и электроны, выбрасываемые Солнцем и попадающие в земную атмосферу, являются (обычными) положительными протонами и отрицательными электронами. Более неопределенным, но, вероятно, верным является утверждение о том, что все звезды и межзвездное вещество Млечного Пути образованы из обычной материи, поскольку в противном случае можно было бы наблюдать интенсивное гамма-излучение во всех частях нашей галактики. Но как насчет миллиардов других галактик, которые отделены от нашего Млеч-

ного Пути миллионами световых лет? Является ли наша Вселенная несимметричной, полностью сформированной из «обычной» материи, или это совокупность галактик, половина из которых состоит из «обычной» материи, а другая половина состоит из «антиматерии»?

Этого мы не знаем и пока не видим способа узнать.

Другая загадка состоит в том, имеют ли античастицы, производимые в изобилии в наших современных ускорителях, положительную или отрицательную гравитационную массу. На первый взгляд кажется, что на этот вопрос легко можно получить ответ путем прямого эксперимента. Просто создать пучок антипротонов в высокоэнергетическом ускорителе, направить его горизонтально вдоль вакуумированной трубы и посмотреть, будет ли он под действием земной гравитации отклоняться вниз, как горизонтально брошенный камень, или вверх. Если верным окажется последнее, вывод: античастицы отталкиваются массой Земли. Проблема, однако, в том, что античастицы, производимые в наших лабораториях, движутся со скоростями, почти равными скоростям света (3×10^{10} см/сек). Таким образом, если длина трубы, скажем, 3 км (3×10^5 см), античастицы пройдут ее за промежуток времени 10^{-5} сек. Согласно закону свободного падения, они будут смещены вниз или вверх (в случае отрицательной гравитационной массы) на величину $\frac{1}{2}gt^2$ см, где g составляет около 10^3 см/сек². Если $t = 10^{-5}$ сек, вертикальное смещение будет порядка $10^3 \times 10^{-10} = 10^{-7}$ см, что сопоставимо с диаметром атома! Очевидно, что никакое экспериментальное оборудование не сможет обнаружить такое маленькое отклонение луча. Чтобы провести эксперимент, можно попытаться замедлить античастицу до более разумных скоростей, скажем, нескольких сантиметров в секунду, тогда отклонение вниз или вверх станет легко заметным. Но как это сделать? В атомных реакторах нейтроны замедляют, пропуская их через различные «замедлители» (углерод или тяжелую воду), где нейтроны постепенно теряют свою энергию в столкновениях с другими атомами. Но мы не можем поступить так с античастицами, поскольку при прохождении через любой замедлитель, состоящий из обычной материи, они будут уничтожены при самом первом столкновении. Таким образом, вопрос все еще остается без ответа.

В заключение можно отметить, что доказательство отрицательной гравитационной массы античастиц было бы весьма полезным

для решения различных космологических задач. Если бы как обычные, так и античастицы появлялись равномерно в пространстве Вселенной, гравитационное притяжение между частицами одного и того же типа и гипотетическое гравитационное отталкивание между частицами противоположного вида привело бы к взаимному разделению. Образовались бы большие области пространства, заполненные исключительно обычной материей, и области, заполненные исключительно антиматерией. Такое разделение удовлетворит наше представление о симметрии природы. Но этого мы не знаем, и неизвестно, узнаем ли вообще.



Глава 7

Э. ФЕРМИ И ПРЕВРАЩЕНИЯ ЧАСТИЦ

Когда-то в старину любой физик мог заниматься как экспериментальной, так и теоретической частью своей науки. Выдающийся пример — сэр Исаак Ньютон, который создал закон всемирного тяготения (а для этого специально изобрел математическую дисциплину, известную сейчас как математический анализ). Он также провел важные экспериментальные исследования, доказывающие, что белый свет образуется в результате наложения спектра различных цветов, и он был создателем телескопа-рефлектора. Но по мере того как область физического знания расширялась, экспериментальные и математические методы становились все более и более сложными, слишком сложными для того, чтобы один человек мог освоить их одновременно. Профессия физика разделилась на две ветви: «экспериментаторы» и «теоретики». Великий теоретик Альберт Эйнштейн ни разу не провел эксперимент своими руками (насколько известно автору), в то время как великий экспериментатор лорд Резерфорд был настолько плох в математике, что знаменитую формулу Резерфорда для рассеяния α -частиц для него вывел молодой математик Р. Фаулер. Сегодня, как правило, физик-теоретик не рискует прикоснуться к экспери-

ментальному оборудованию, опасаясь его сломать (см. Эффект Паули, глава 3), в то время как экспериментаторы теряются в бурном потоке математических вычислений.

Энрико Ферми, родившийся в Риме в 1901 году, представлял собой редкий пример отличного физика-теоретика и экспериментатора в одном лице. Среди прочих, его важным вкладом в теоретическую физику было изучение вырожденного электронного газа, что повлияло на дальнейшее развитие электронной теории металлов, а также сыграло роль в изучении сверхплотных звезд, известных как белые карлики.

Другим важным достижением была формулировка математической теории преобразования частиц, включающей излучение таинственных незаряженных и безмассовых частиц, предложенных Паули ранее.

Ферми был крепким римским мальчиком с отличным чувством юмора. Когда он был профессором в Римском университете, Муссолини присвоил ему титул «Эчченца» (Его Превосходительство). Однажды ему пришлось присутствовать на собрании Академии наук в Палаццо Венеция, мероприятие было строго охраняемым, потому что сам Муссолини должен был появиться там. Все остальные участники прибывали в больших лимузинах иностранного производства, с водителями в форме, в то время как Ферми приехал на своем маленьком «Фиате». У ворот Палаццо его остановили два карабинера, скрестив оружие перед его маленькой машиной, и спросили, что ему здесь нужно.

Согласно истории, которую он рассказал автору этой книги, он не решался сказать охранникам: «Я Его Превосходительство Энрико Ферми», опасаясь, что они ему не поверят. Тогда, чтобы избежать смущения, он сказал:

- Я водитель Его Превосходительства синьора Энрико Ферми.
- Хорошо, — сказали охранники, — заезжайте, припаркуйтесь и ждите своего хозяина.

Хотя идея о том, что незаряженные частицы, не имеющие массы и сопровождающие электроны, испускаются в результате β -преобразований, изначально принадлежит Паули, Ферми был первым, кто разработал строгую математическую теорию β -излучения в сочетании с излучением частиц-любимчиков Паули и показал, что она прекрасно согласуется с наблюдаемыми фактами. Ему принадлежит и само название — нейтрино. Дело в том, что Паули называл своего подопечного нейтроном, что было нормаль-

но, так как частица, называемая сегодня нейтроном (незаряженный протон), тогда еще не была открыта. Однако это имя не было «защищено авторским правом», поскольку оно использовалось только в личных беседах и переписке, но никогда в печати.

Когда в 1932 году Джеймс Чедвик доказал существование незаряженной частицы с массой, почти равной массе протона, он назвал ее нейтроном в своей статье, опубликованной в «Трудах Лондонского королевского общества». Когда Ферми, все еще будучи профессором в Риме, сообщил об открытии Чедвика на еженедельном семинаре по физике, кто-то из аудитории спросил: «Нейтрон Чедвика» и «нейтрон Паули» — это одно и то же?» — «Нет, — ответил Ферми (естественно, по-итальянски), — нейтроны Чедвика большие и тяжелые. Нейтроны Паули маленькие и легкие; их нужно называть «нейтрино»*.

Сделав это филологическое заключение, Ферми решил разработать математическую теорию β -преобразований, в которой электрон (положительный или отрицательный) и нейтрино испускаются одновременно нестабильными атомными ядрами, разделяя доступную энергию между собой случайным образом. Он сформировал свою теорию в русле, аналогичном теории излучения света атомами, когда возбужденный электрон переходит в состояние с более низкой энергией, освобождая избыточную энергию в форме единого кванта света. Движение электрона до прерывистого перехода описывалось волновой функцией, распространяющейся по сравнительно большой площади. После перехода волновая функция электрона сжималась до меньших размеров, и высвободившаяся энергия формировала расходящуюся электромагнитную волну, распространяющуюся в пространстве. Силы, ответственные за это преобразование, были известными силами, действующими между электромагнитным полем и точечным зарядом. Таким образом, их действие может быть легко рассчитано на основе уже существующей теории. Оказалось, что вычисленные вероятности электронных переходов полностью согласуются с наблюдаемыми интенсивностями спектральных линий.

В своей теории β -распада Ферми столкнулся с гораздо более сложной ситуацией. Нейтрон, занимающий определенное энерге-

* В итальянском языке «нейтрино» — уменьшительное от нейтрона; т.е. «маленький нейтрон».

тическое состояние внутри ядра, превратился в протон, тем самым изменив свой электрический заряд. Кроме того, вместо одного кванта света произошло одновременное испускание двух частиц (электрона и нейтрино).

СИЛЫ, СТОЯЩИЕ ЗА β -РАСПАДОМ

Основная трудность, однако, заключалась в том, что силы, управляющие процессом в случае излучения света силы, управляющие процессом, были знакомыми электромагнитными силами, а силы, ответственные за β -преобразование, были абсолютно неизвестны, и Ферми должен был сделать предположение относительно их природы.

Как истинный гений, он решил сделать самое простое из возможных предположений — что вероятность превращения нейтрона в протон (или наоборот), приводящего к образованию электрона (отрицательного или положительного) и нейтрино*, пропорциональна произведению интенсивностей четырех соответствующих волновых функций в любой точке ядра. Коэффициент пропорциональности, который Ферми обозначил буквой g , Ферми планировал определить путем сравнения с экспериментальными данными. Используя довольно сложные вычисления, Ферми смог выяснить, какой должна быть форма спектра β -энергии и как скорость β -распада должна зависеть от количества вовлеченной энергии, если его простая гипотеза взаимодействия была верной. Результат потрясающим образом сходился с наблюдаемыми критериями.

Единственный недостаток теории β -распада Ферми заключался в том, что числовое значение константы g (3×10^{14} в безразмерных единицах**) нельзя было вывести теоретически, а нужно было получить путем наблюдений. Чрезвычайная малость числового значения g является причиной того, что, в то время как излучение γ -кванта ядром происходит в течение 10^{-11} секунд, излучение пары электрон—нейтрино может занимать часы, месяцы или даже годы.

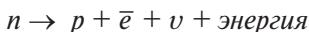
* Мы не будем подробно останавливаться на том, чем различаются нейтрино и антинейтрино.

** $|g| \times \frac{|mc^2|}{|\sqrt{2\pi\hbar^3}|}$, где m — масса электрона, c — скорость света, \hbar — квантовая постоянная.

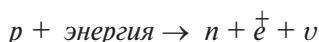
Вот почему все преобразования частиц известны в современной физике как слабые взаимодействия. Задача физики будущего — объяснить эти чрезвычайно слабые взаимодействия во всех процессах, связанных с поглощением нейтринного излучения.

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ЗАКОНОВ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ФЕРМИ

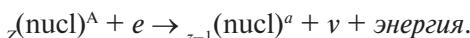
Процессам β -распада*



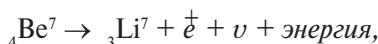
и



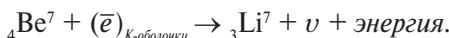
аналогичны другие процессы, которые также подчиняются законам взаимодействия Ферми. Одним из них является поглощение атомного электрона ядром, которое нестабильно по отношению к положительному β -распаду. Вместо испускания положительно-го электрона и нейтрино ядро может поглощать отрицательный электрон из собственной электронной оболочки, испуская ней-трино по формуле:



Поскольку атомный электрон, поглощенный ядром в таком процессе, является одним из электронов с К-оболочки (ближайшей к ядру), явление обычно называют «К-захватом». Простейшим примером такого процесса является нестабильный изотоп бериллия, Be^7 , который может трансформироваться либо по формуле**



либо



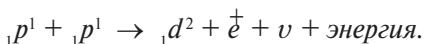
В последнем случае фотографии камеры Вильсона показывают только один трек (принадлежащий ${}^3\text{Li}^7$), и ситуация похожа на

* С энергетической точки зрения первый процесс происходит в случае свободных нейтронов, а также в случае нейтронов, связанных внутри ядра, тогда как второй происходит только в сложных ядрах, где дополнительный источник энергии может быть получен от других нуклонов.

** Нижний индекс слева показывает атомный номер, верхний индекс справа показывает атомный вес.

инцидент, описанный Г. Уэллсом в его известной книге «Человек-невидимка», где лондонскому констеблю дали пинка и, обернувшись, он не мог увидеть того, кто это сделал. Наблюдения процессов K -захвата показали, что частота их возникновения точно соответствует предсказаниям теории Ферми.

Другой интересный процесс, относящийся к той же категории — реакция $H-H$ (водород—водород), впервые предложенная Чарльзом Кричфилдом, которая отвечает за выработку энергии Солнца и других более слабых звезд*. В течение короткого промежутка времени, когда два сталкивающихся протона находятся в близком контакте, один из них превращается в нейтрон за счет излучения положительного электрона и нейтрино, образуя ядродейтерия (тяжелого водорода) в соответствии с уравнением:



Вероятность этого процесса может быть предсказана точно на основе теории Ферми.

Последний, но не менее важный пример взаимодействия Ферми — это процесс, с помощью которого Ф. Райнес и К. Коэн непосредственно доказали существование нейтрино. Вот он:



Райнес и Коэн наблюдали это в камере, расположенной рядом с «атомным реактором», в рамках проекта по атомной энергии на реке Саванне. Количество наблюдаемых нейтронов и положительных электронов, образованных одновременно в камере, подвергшейся интенсивной нейтринной бомбардировке, оказалось точно таким же, как предсказывала теория Ферми. Взаимодействие настолько слабое, что для поглощения половины испускаемых нейтрино необходимо использовать щит из жидкого водорода толщиной в несколько световых лет!

Теория процессов с участием нейтрино Ферми также применима ко многим случаям распада новых элементарных частиц, обнаруженных в последние годы, и сегодня говорят о «Едином взаимодействии Ферми».

* Для более ярких звезд, например Сириуса, основной производящей энергию реакцией является так называемый углеродный цикл, предложенный независимо друг от друга К. фон Вайцзеккером и Г. Бете.

ИССЛЕДОВАНИЯ ФЕРМИ В ОБЛАСТИ ЯДЕРНЫХ РЕАКЦИЙ

Наряду с теоретическими исследованиями Ферми принимал участие в обширных экспериментальных исследованиях ядерных реакций в тяжелых элементах, бомбардируемых медленными нейтронами, а также образования трансурановых элементов ($z > 92$), и за эту работу он получил Нобелевскую премию в 1938 году.

Вскоре после этого он приехал жить в Соединенные Штаты и присутствовал на конференции 1939 года в Университете Джорджа Вашингтона, на которой Нильс Бор зачитал телеграмму от известного немецкого физика Лизы Мейтнер (которая к тому времени жила в Стокгольме), содержащую очень волнительные новости. Она писала, что ее бывшие коллеги, Отто Ган и Фриц Штрасман, в Берлинском университете обнаружили, что ядро урана, пораженное нейтроном, распадается на две примерно равные части, высвобождая огромное количество энергии. Это заявление положило начало ряду событий, кульминацией которых, спустя некоторое время, стало изобретение атомных бомб, атомных реакторов и т.д., что ознаменовало начало так называемого атомного (правильнее сказать — ядерного) века.

Ферми взял на себя руководство секретной лабораторией в Чикагском университете и 2 декабря 1942 года объявил, что им удалось достичь первой цепной реакции в уране, и это положило начало первому контролируемому освобождению ядерной энергии человеком.

Поскольку эта книга посвящена эволюции взглядов на понимание природы вещей, а не практическим аспектам вопроса, мы ничего не будем говорить о цепной реакции деления и завершим эту главу описанием интересного эксперимента, проведенного Ферми в недавно изобретенном реакторе деления. Впервые стало возможным измерить среднюю продолжительность жизни нейтрона, который в конечном итоге распадается на протон, электрон и нейтрино. Прибор, использованный в этом эксперименте, известен как «бутилка Ферми», хотя на самом деле это был сферический контейнер, внутри которого был вакуум, а сам он напоминал бутылку кьянти без горлышка.

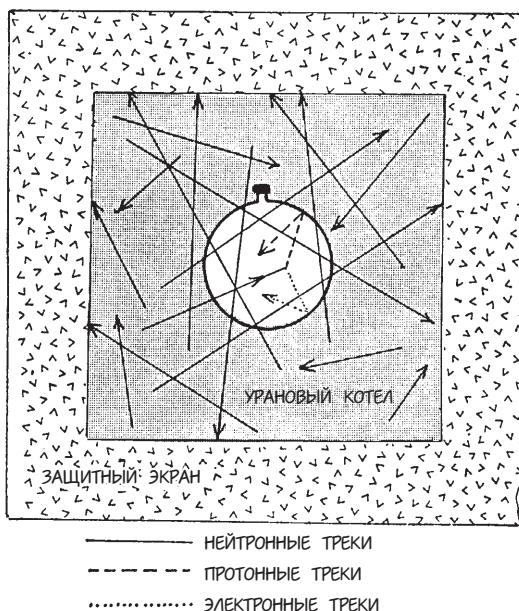


Рис. 29. Бутылка Ферми в урановом котле, предназначенная для измерения средней продолжительности жизни нейтрона.

Как показано на рис. 29, этот шар был помещена внутри атомного котла и оставлена там на довольно длительный период времени, пока он работал. Нейтроны деления, перемещающиеся вдоль и поперек котла в больших количествах, в большинстве случаев входили и выходили из «бутылки Ферми», преодолевая без особых трудностей ее стенки. Однако время от времени нейтрон, проходящий сквозь «бутылку», распадался на протон и электрон, для которого стенки «бутылки» были непроницаемыми. Таким образом, обычный водородный газ постепенно накапливался внутри «бутылки» со скоростью, которая зависела от вероятности того, что нейтрон распадается при прохождении «бутылки». Измеряя количество водорода, накопленного в «бутылке» за определенный период времени, можно легко оценить среднее время жизни нейтрона, которое, как выяснилось, составляет около четырнадцати минут.

Чтобы узнать больше о деятельности Ферми в этом направлении, читатель должен обратиться к книге «Атомы у нас дома», написанной после его смерти его женой Лаурой.



Глава 8

Х. ЮКАВА И МЕЗОНЫ

Из-за большого успеха теории Ферми о β -распаде встал вопрос о том, может ли она также применяться для объяснения сил притяжения, удерживающих нуклоны вместе. В то время было известно, что силы между двумя нуклонами — будь то два нейтрона, нейtron и протон или два протона — идентичны, за исключением того, что в последнем случае следует добавить к ним обычное кулоновское отталкивание между зарядами протона. Эксперименты показали, что, в отличие от кулоновских сил, которые сравнительно медленно уменьшаются с увеличением расстояния (как $1/r^2$), ядерные силы больше похожи на силы сцепления классической физики. Так же, как два куска скотча не оказывают никакого влияния друг на друга, независимо от того, насколько близко они находятся друг к другу, но плотно прилипают, как только вступают в контакт, силы между нуклонами внезапно возникают, когда они «касаются друг друга», что происходит на расстоянии около 10^{-18} см.

Как только это происходит, разделить их становится можно лишь при помощи энергии примерно в десять миллионов электронвольт. Подобные силы, действующие между атомами, приписываются обмену электронами между атомными оболочками, как

только они вступают в контакт. Волново-механическая теория этих «обменных сил» была разработана в 1927 году В. Гитлером и Ф. Лондоном, которые показали, что проблему можно решить, рассмотрев простой пример двух атомов водорода, образующих двухатомную молекулу*. Гитлер и Лондон проанализировали два случая: (а) ион молекулы водорода H_2^+ , состоящий из двух протонов и одного электрона; (б) нейтральная молекула водорода H_2 , образованная двумя протонами и двумя электронами (рис. 30а и 30б). Волновое уравнение Шредингера для движения электрона точно выполнялось в обоих случаях. Аналитический результат показал, что существует равновесное состояние с самой низкой энергией на определенных расстояниях R и R^1 между двумя ядрами. Результат вычислений энергии этих состояний равновесия полностью согласовывался со значениями энергий диссоциации молекул H_2^+ и H_2 . Таким образом, понятие обменных сил между двумя одинаковыми атомамиочно утвердились в области квантовой химии. Вполне естественно было предположить, что силы притяжения между двумя нуклонами можно объяснить аналогичным образом. Когда два нуклона сближаются, электрон, сопровождаемый нейтрино, перепрыгивает туда-сюда между ними, создавая притягивающую обменную силу. Это была замечательная идея, но (увы!) она не сработала.

Когда в 1934 году Д. Иваниенко и И. Тамм вычислили обменную силу между двумя нуклонами, возникающую в результате взаимодействия Ферми, они обнаружили, что ожидаемая энергия связи была порядка 10^{-8} электронвольт! Нет, это не опечатка; сто миллионная одного электронвольта вместо десяти миллионов вольт; различие в пятнадцать порядков! По-видимому, «слабое» взаимодействие Ферми не могло быть причиной сильной связи протонов и нейtronов внутри атомного ядра.

Год спустя (в 1935 году) японский физик Хидэки Юкава предложил революционную идею для объяснения сильных взаимодействий между нуклонами. Если эти взаимодействия нельзя объяснить обменными силами, возникающими из-за скачков пар электрон—нейтрино, то должна существовать совершенно новая, еще не открытая частица, которая совершает скачки. Чтобы получить силу, соответствующую экспериментальным показателям, эта частица должна быть примерно в двести раз тяжелее электрона

* Двухатомная молекула — молекула, которая состоит из двух атомов.

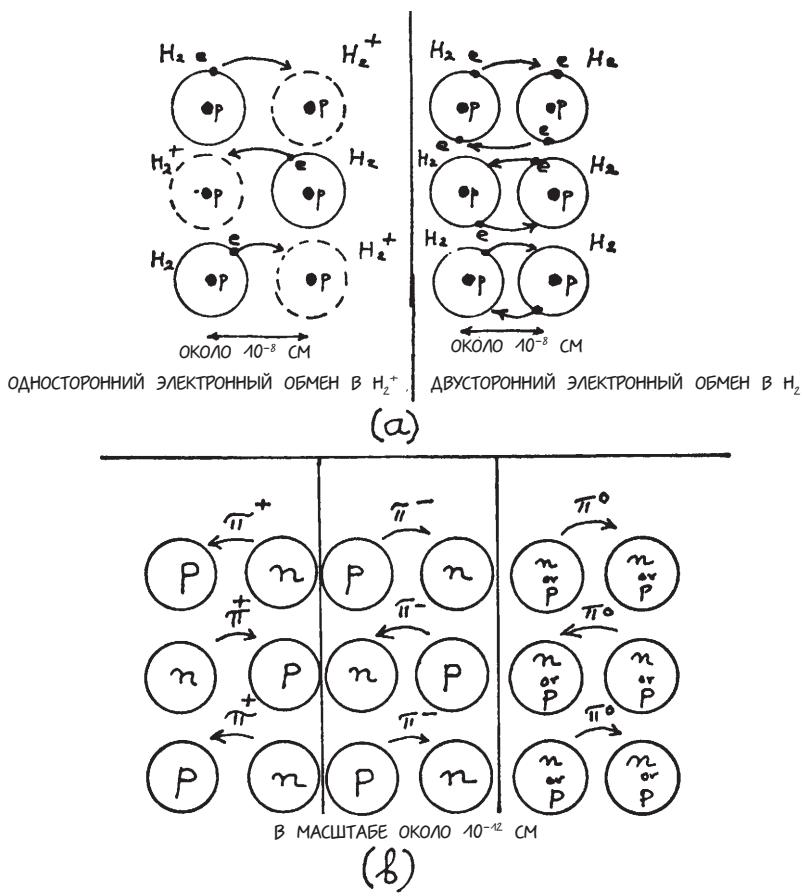
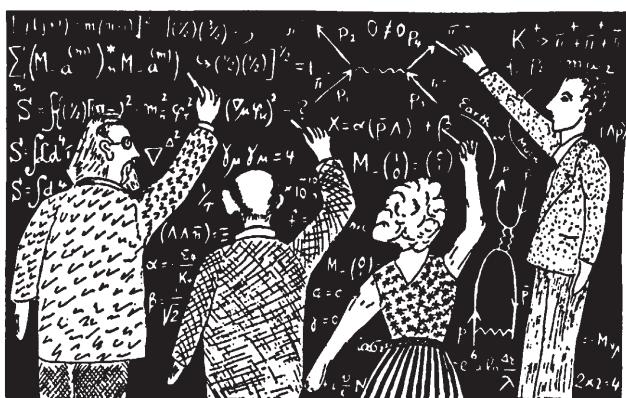


Рис. 30. Обмен сил.

- (a) Теория сил Гайтлера и Лондона, которые удерживают вместе два протона в ионизованной и нейтральной молекуле водорода.
- (b) Три разные возможности объяснения ядерных сил путем обмена пионами (π^+, π^-, π^0).

(или примерно в десять раз легче протона). Кроме того, ее взаимодействие с нуклонами, характеризуемое константой взаимодействия Юкавы u , должно быть примерно в 10^{14} раз больше, чем константа взаимодействия Ферми g , связанная с β -преобразованием, и, таким образом, сопоставимо с обычными кулоновскими взаимодействиями между электрическими зарядами. Эта гипотетическая частица была известна под многими псевдонимами: юкон, японский электрон, тяжелый электрон, мезotron и, наконец, мезон. Два года спустя, после предположения Юкавы, частицы с массой в 207 раз больше массы электронов были обнаружены в космических лучах К. Андерсоном и С. Неддермайером в Калифорнийском технологическом институте, и они, казалось, дали блестящее подтверждение гипотезе Юкавы. Но затем возникли некоторые неполадки. Эксперименты, проведенные М. Конвери, Э. Панчини и О. Пиччиони, без всяких сомнений доказали, что, хотя новые частицы имели массу гипотетических мезонов Юкавы, их взаимодействие с нуклонами было в 10^{12} раз меньше, чем необходимо для объяснения ядерных сил.

Лишь в 1947 году британский физик С. Пауэлл, отправив фотографические пластины в верхние слои атмосферы, обнаружил, что мезоны, наблюдаемые на уровне моря (207 электронных масс), на самом деле являются продуктами распада более тяжелых мезонов (массой в 264 электронных масс), которые формируются космическими лучами на верхних границах земной атмосферы. Таким образом, существует два вида мезонов: тяжелые и легкие. Первые теперь известны как π -мезоны, или просто пионы, в то время как последние называются μ -мезонами, или сокращенно мюонами. Пионы демонстрируют очень сильное взаимодействие с нуклонами, и нет никаких сомнений в том, что они являются частицами, которые Юкава первоначально считал причиной ядерных сил. Однако точная теория этих процессов (если сравнивать, например, с теорией античастиц Дирака) еще не разработана.



Глава 9

УЧЕНЫЕ ЗА РАБОТОЙ

Читатель, вероятно, заметил, что главы этой книги стали короче. Причина вовсе не в нарастающей усталости автора, а в том, что после великих событий в первые тридцать лет своего развития квантовая теория столкнулась с серьезными трудностями, и ее прогресс значительно замедлился. Последней «полнотью законченной главой» этого периода было объединение Дирака, волновой механики и специальной теории относительности, что привело к блестящей теории античастиц. После того как их существование было доказано экспериментально, оказалось, что античастицы вели себя точно в соответствии с теоретическими предсказаниями.

Теория Ферми о процессах, связанных с испусканием и поглощением пар электрон—нейтрино, оказывается немного расплывчатой применительно к более сложным процессам, таким как, например, распад мюона на один электрон и два нейтрино. Кроме того, численное значение постоянной Ферми g все еще не выводится из значений других фундаментальных постоянных мироздания. (Точно так же постоянная Ридберга R в старой спектроскопии оставалась эмпирической постоянной, пока Бор не опубликовал свою теорию атома водорода.)

Подобные трудности существуют и в теории сильных взаимодействий между элементарными частицами Юкавы — численное значение постоянной u все еще не объяснено. Экспериментальные исследования регулярно выводят на поверхность огромное количество новых фактов, и множество эмпирических правил формулируются путем введения новых понятий, таких как «паритет», «странные» и т.д. В целом сегодня ситуация во многом напоминает положение, существовавшее в оптике и химии в конце прошлого столетия, когда закономерности в спектральных рядах и свойствах химической валентности различных элементов были хорошо видны на уровне эксперимента, но не совсем понятны с теоретической точки зрения. Все резко изменились к лучшему, когда была разработана квантовая теория атомной структуры, которая пролила яркий свет на все эмпирические факты, полученные тяжким трудом. По мнению автора, теория элементарных частиц обязательно сдвинется с мертвых точек — возможно, в следующем году, может быть, в 2000 году нашей эры — должна возникнуть совершенно новая идея, которая будет отличаться от современного мышления так же, как нынешнее мышление отличается от классического. У нас нет хрустального шара, который предсказывает будущее теоретической физики, но в качестве его замены можно использовать дисциплину, известную как «анализ размерностей».

Всем известно, что все физические измерения основаны на трех основных единицах:

Длина (стадии, мили, лиги, метры и т.д.)

Время (годы, дни, миллисекунды и т.д.)

Масса (стоуны, фунты, драхмы, граммы и т.д.)

Каждая физическая величина может быть выражена через эти три с помощью так называемых формул размерности. Например, скорость (v) — это длина (или расстояние), пройденная за единицу времени; плотность (p) — масса на единицу объема (то есть длину в третьей степени); энергия (E) — масса, умноженная на квадрат скорости, и т.д. Пишется:

$$|v| = \frac{|L|}{|T|}; |p| = \frac{|M|}{|L|^3}; |E| = |M| \times \left| \frac{L}{T} \right|^2,$$

где вертикальные черточки показывают, что это не числовое отношение, а отношение между физической природой указанных

величин. Здесь не имеет значения, какие именно единицы использовать, и можно написать:

$$|\$| = |\text{£}| = |\text{марка}| = |\text{франк}| = |\text{рубль}| = \text{и т.д.}$$

или

$$|\text{ярд}| = |\text{фут}| = |\text{метр}| = |\text{аршин}| = |\text{световой год}| = \text{и т.д.}$$

Длина, время и масса (или, что не совсем правильно, вес) были выбраны в классической физике на антропоморфных основаниях, проще говоря, основываясь на том, с чем мы, люди, сталкиваемся в повседневной жизни. («Это в пяти милях отсюда»; «Вернусь через час»; «Дайте мне три фунта стейка».) Но выбирать эти конкретные единицы в действительности нет необходимости, и три любые сложные единицы, будь то сила электрического тока (A), мощность двигателя (лошадиные силы) или яркость света (стандартная свеча) могут служить базовыми единицами при условии, что они не зависят друг от друга.

Однако при построении последовательной теории всех физических явлений целесообразно выбрать три фундаментальные единицы, каждая из которых управляет обширной областью физики, и выразить через них все остальные единицы. Какие же единицы должны входить в эту тройку?

Несомненно, одной из них должна быть скорость света в вакууме (c), которая управляет всей областью электродинамики и теории относительности. На самом деле, если предположить, что свет распространяется с бесконечной скоростью ($c = \infty$), вся теория Эйнштейна сводится к классической механике Исаака Ньютона.

Другой член универсальной тройки — это, конечно, квантовая постоянная (\hbar), которая управляет всеми атомными явлениями. Если предположить, что \hbar равна нулю, мы снова возвращаемся к ньютоновской механике. Большая заслуга Дирака состоит в том, что он сумел объединить теорию относительности и квантовую теорию, и в его уравнениях c и \hbar занимают одинаково почетные позиции.

Но какая третья универсальная постоянная может сделать систему теоретической физики завершенной? Конечно, одним из возможных кандидатов является гравитационная постоянная Ньютона. Но при более детальном рассмотрении оказывается, что эта постоянная не очень «сочетается» с двумя другими при объяс-

нении атомных и ядерных явлений. Гравитационные силы очень важны в астрономии для объяснения движения планет, звезд и галактик. Но в масштабах нашей планеты гравитационное притяжение между материальными телами настолько мало, что им можно пренебречь, ведь было бы удивительно, если бы два яблока, которые лежат на столе на расстоянии нескольких сантиметров друг от друга, начали катиться друг к другу, движимые ньютоновским притяжением. Только чрезвычайно чувствительные приборы позволяют нам измерить гравитационные силы между двумя телами нормального размера*.

В атомном и ядерном мире силы гравитации весьма незначительны; примерно в 10^{50} раз меньше электрических и магнитных сил! Однажды Дирак предположил, что «гравитационная постоянная» Ньютона на самом деле не постоянная, а переменная, которая уменьшается обратно пропорционально возрасту Вселенной. И он вполне может быть прав!

Но что тогда? Какая универсальная постоянная займет последнее место в тройке? Мы можем отталкиваться от рассуждений древнегреческих философов, которые впервые выдвинули идею об атоме: наименьшем количестве материи. В своей книге «Анализ материи» Бертран Рассел пишет: «Мы можем предположить, как однажды предположил Анри Пуанкаре, и, как, очевидно, полагал Пифагор, что пространство и время зернисты, а не непрерывны, т.е. расстояние между двумя частицами всегда кратно некоторой единице, как и время между двумя событиями. Непрерывность в восприятии не свидетельствует о непрерывности в физическом процессе».

Вerner Гейзенберг в своей книге «Физические принципы квантовой теории» писал: «Хотя, скорее всего, в принципе возможно уменьшить пространственные и временные интервалы в неограниченное количество раз путем совершенствования измерительных приборов, тем не менее для принципиального обсуждения понятий волновой теории будет целесообразнее ввести конечные значения для значений пространственных и временных интервалов, участвующих в измерениях, и предположить, что ноль является единственным пределом ($\Delta x \rightarrow 0; \Delta t \rightarrow 0$) для этих интервалов в конце вычислений. Вполне возможно, что будущие разработки квантовой теории покажут, что нулевой предел для таких

* См. Г. Гамов «Гравитация».

интервалов является абстракцией без физического смысла; однако в настоящее время, по-видимому, нет оснований для введения каких-либо пределов».

Однако шесть лет спустя Гейзенберг изменил свое мнение о десяти словах, следующих за словом «однако» в предыдущем предложении, и высказал мысль о том, что «расхождения», возникающие в различных областях квантовой теории, могут быть устранины путем введения элементарной длины порядка 10^{-18} см.

Что означает слово «расхождение»? В математике этот термин относится к «бесконечным рядам», то есть к бесконечным последовательностям чисел, которые складываются друг с другом. Например:

$$1 + 2 + 3 + 4 + 5 + \dots \text{ (и так до бесконечности).}$$

Очевидно, результат сложения будет бесконечным. Но что насчет:

$$1 + \frac{1}{2} + \frac{1}{3} + \frac{1}{4} + \frac{1}{5} + \dots \text{ (и так до бесконечности)?}$$

Можно показать, что это суммирование также становится бесконечным или расходится, как говорят математики. С другой стороны, ряд:

$$1 + \frac{1}{1!} + \frac{1}{2!} + \frac{1}{3!} + \frac{1}{4!} + \frac{1}{5!} + \dots \text{ (и так до бесконечности)}$$

(где $n!$ означает произведение всех целых чисел от 1 до n) сходится и равен 2,3026... Точно так же ряды $1 - \frac{1}{3!} + \frac{1}{5!} - \frac{1}{7!} + \dots$ (и так до бесконечности) сходятся к значению 0.

Результаты расчетов, проведенных в теоретической физике, часто представлены в виде бесконечных рядов.

Если они сходятся, как это часто бывает, у нас есть четкий ответ и определенное числовое значение для физической величины, которую мы пытаемся вычислить. Но если ряд расходится, результат не имеет смысла, приводя к бесконечному значению рассматриваемой величины. В качестве первого примера таких расхождений рассмотрим проблему массы электрона. Если мы представляем себе электрон в виде крошечной электрически заряженной сферы с зарядом $e = 4,80 \times 10^{-10}$ электростатических единиц и радиусом r_0 , то классическая электростатика говорит нам, что энергия окружающего его электрического поля равна $\frac{1}{2} \frac{e^2}{r_0}$. Согласно закону эквивалентности массы и энергии Эйнштейна,

масса этого поля равна $\frac{1}{2} \frac{e^2}{r_0 c^2}$. Поскольку эта масса не должна превышать наблюдаемой массы m_0 электрона ($= 0,9 \times 10^{-27}$ г), из этого следует, что:

$$\frac{e^2}{2r_0 c^2} \leq m_0, \text{ или } r_0 \geq \frac{e^2}{2m_0 c^2} = 2.82 \times 10^{-13} \text{ см.}$$

Однако, если предположить, что электрон является точечным зарядом ($r_0 = 0$), масса окружающего его электрического поля становится бесконечной! С другой стороны, существует много веских теоретических причин, чтобы предположить, что электрон является точечным зарядом. Подобные противоречия стали возникать в больших количествах в ходе дальнейшего развития физики элементарных частиц, и все постоянно приходили к расходящимся (бесконечным) результатам, если только не отсекали бесконечные математические ряды, возникающие из прямых вычислений в определенной точке, без видимой на то причины. Паули в шутку назвал работу в этом направлении «Die Abschneidungsphysik» (Физика отсечений).

Характерно, что отсечения всегда происходили на расстоянии порядка 10^{-18} см.

Когда в последующие годы диапазон сил, действующих между нуклонами, был измерен экспериментально с достаточной точностью, он оказался равным $2,8 \times 10^{-18}$ см; то есть точно таким же, как и так называемый классический радиус электрона, рассчитанный теоретически в предположении, что его масса целиком обусловлена электростатическим полем, окружающим его. Становится все более и более очевидным, что существует нижний предел расстояния, элементарная длина λ , ожидаемая Пифагором, Анри Пуанкаре, Берtrandом Расселом, Вернером Гейзенбергом и др., которая является фундаментальной в физике. Так же, как никакая скорость не может превышать скорость света c , никакое механическое воздействие не может быть меньше, чем элементарное воздействие h , никакое расстояние не может быть меньше элементарной длины λ , и ни один временной интервал не может быть короче элементарного интервала λ/c . Когда мы узнаем, как ввести λ (и λ/c) в основные уравнения теоретической физики, мы сможем гордо заявить: «Теперь, наконец, мы понимаем, как работают материя и энергия!»

Но после тридцати изобильных лет в начале нынешнего столетия мы переживаем теперь трудные, бесплодные годы и с наде-

ждой смотрим в будущее. Несмотря на все усилия старшего поколения: Паули, Гейзенberга и других, а также молодого поколения: Фейнмана, Швингера, Гелл-Мана и других, теоретическая физика за последние три десятилетия добилась весьма незначительного прогресса, сравнительно с тремя предыдущими.

К настоящему моменту опубликованы сотни статей об элементарных частицах, а мы все еще блуждаем в темноте неопределенности по этому вопросу. Будем надеяться, что через одно или два десятилетия или, по крайней мере, к началу двадцать первого века нынешние бесплодные годы теоретической физики завершатся взрывом совершенно новых революционных идей, подобных тем, которые ознаменовали начало века двадцатого.

Один, два, три... бесконечность

Факты и размышления о науке

*Посвящается моему сыну Игорю,
который хотел стать ковбоем.*



Один парень по беспечности
Извлек корень из бесконечности.
Цифры без края,
Нервы терзая,
Привели несчастного к вопросам Вечности.

«Пришло время, — сказал Морж,
поговорить о многом»...

Льюис Кэрролл
«Алиса в Зазеркалье»

ПРЕДИСЛОВИЕ

...Об атомах, звездах и туманностях, энтропии и генах; о том, можно ли искривить пространство и почему ракета сжимается в движении. Да-да, в этой книге мы обсудим это, а также многие другие темы, вызывающие интерес.

Эта книга — подборка наиболее интересных фактов и теорий современной науки. Она скомпонована таким образом, чтобы дать читателю общую картину Вселенной в ее микроскопических и макроскопических проявлениях и представить такой, какой она открывается взору современного ученого¹. Выполняя столь масштабный замысел, я не стремился рассказать всю историю, зная, что любая подобная попытка неминуемо приведет к многотомной энциклопедии. В то же время темы для обсуждения выбирались так, чтобы кратко рассмотреть все области фундаментальных научных знаний и не оставить ни одного неосвещенного вопроса.

В первую очередь я руководствовался тем, чтобы тема была важной и интересной, и это неизбежно привело к определенному неравенству в изложении. Некоторые главы книги настолько просты, что их поймет и ребенок, но, чтобы полностью понять другие, потребуются сосредоточенность и усердие. Тем не менее я надеюсь, что читатель, не являющийся специалистом в области физики, не столкнется при чтении книги со слишком уж серьезными трудностями.

¹ Книга впервые издавалась в 1947 г. — Примеч. ред. (Здесь и далее, за исключением особо оговоренных случаев, примечания автора отмечены звездочками, примечания переводчика — цифрами)

Следует отметить, что последняя часть книги, в которой обсуждается «макрокосмос», значительно короче части, посвященной «микрокосмосу». Это прежде всего связано с тем, что я уже подробно рассмотрел многие проблемы, связанные с макрокосмосом в «Рождении и смерти Солнца» и «Биографии Земли»* и дальнейшее подробное обсуждение было бы утомительным повторением уже сказанного. Поэтому в этой части я ограничился изложением общих физических фактов и событий в мире планет, звезд, туманностей и законов, которые их регулируют. И углублялся в детали только при рассмотрении проблем, на которые прогресс научных знаний пролил свет сравнительно недавно. Следуя этому принципу, я уделил особое внимание самым современным взглядам, согласно которым грандиозные звездные взрывы, известные как «сверхновые», вызываются мельчайшими из всех известных науке частиц — нейтрино. Я рассмотрел новую планетарную теорию, которая отменяет принятное сейчас мнение, будто планеты возникли в результате столкновений Солнца с другими, и восстанавливает в правах старые полузабытые воззрения Канта и Лапласа.

Я хочу выразить признательность многочисленным художникам и иллюстраторам, чья работа, топологически трансформированная (см. параграф II, глава III), послужила основой для многих иллюстраций, украшающих книгу. Но больше всего я благодарен моему молодому другу Марине фон Нейман, которая утверждает, что знает все лучше, чем ее знаменитый отец. За исключением, конечно же, математики, которую, по ее словам, она знает лишь так же хорошо, как и он. Изначально я предполагал написать книгу для детей, но после того как ее прочитала Марина фон Нейман и сообщила, что многого не поняла, мне стало ясно, что замысел не оправдался и у меня получилась книга для взрослых.

Г. Гамов
1 декабря 1946 года

* The Viking Press, New York, 1940 и 1941 гг. соответственно.

Предисловие к изданию 1961 года

Все книги о науке имеют тенденцию устаревать уже через несколько лет после публикации, особенно если речь идет о быстро развивающихся направлениях. В этом смысле моей книге «Один, два, три... бесконечность», впервые опубликованной тринацать лет назад, повезло. Она была написана сразу после ряда важных научных достижений, которые я включил в текст, и потребовалось внести не так уж много изменений и дополнений, чтобы она соответствовала современным взглядам.

Одним из важных достижений за прошедшее время было успешное высвобождение ядерной энергии в результате термоядерных реакций при испытаниях водородных бомб, а также медленный, но неуклонный прогресс в достижении контроля над высвобождением энергии в результате термоядерных процессов. Поскольку принцип термоядерных реакций и их применение в астрофизике были описаны в главе XI первого издания этой книги, повествование о прогрессе человека на пути к этой цели было добавлено в конец главы VII.

Другие изменения включают: увеличение предположительно-го возраста нашей Вселенной от двух или трех миллиардов лет до пяти или более, а также пересмотренную астрономическую шкалу расстояний, полученную в результате исследований с помощью нового 200-дюймового телескопа Хейла, который находится на горе Паломар в Калифорнии.

Недавний прогресс биохимии вынудил меня переделать рис. 101 и изменить текст, относящийся к нему, а также добавить в конец главы IX новый материал, касающийся искусственного выведения простейших организмов. В первом издании я писал: «Да, переходная ступень между живой и неживой материяй у нас

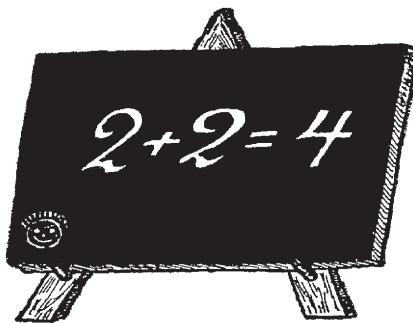
определенno есть, и когда — возможно, не в таком уж и далеком будущем — какой-нибудь талантливый биохимик сможет синтезировать молекулу вируса из обычных химических элементов, он будет оправдываться, восклицая: “Да я всего лишь вдохнул жизнь в частицу мертвой материи!”». Так вот, несколько лет назад это было и в самом деле сделано (или почти сделано) в Калифорнии, и читатель найдет краткий отчет о данной работе в конце главы IX.

И еще одно изменение. Моя книга в первом ее издании была посвящена «Моему сыну Игорю, который хочет стать ковбоем». Многие читатели интересовались в своих письмах ко мне, действительно ли он стал ковбоем. Ответ — нет; он оканчивает университет этим летом и, имея специализацию в биологии, планирует работать в области генетики.

Г. Гамов
Университет Колорадо,
ноябрь 1960 г.

Часть I

Играя с числами



Глава I

Большие числа

1. ДО СКОЛЬКИХ ТЫ СМОЖЕШЬ СОСЧИТАТЬ?

Существует история о двух венгерских аристократах, решивших сыграть в игру, в которой побеждает тот, кто назовет самое большое число.

— Итак, — сказал один из них, — ты первый называешь число.

После нескольких минут напряженных размышлений второй аристократ наконец назвал самое большое число, которое смог придумать.

— Три, — сказал он.

Настала очередь первого аристократа размышлять, но после 15 минут раздумий он сдался.

— Ты победил, — признал он свое поражение.

Определенно два венгерских аристократа не являются собой примера высокого интеллекта*, а сама история, возможно, злая

* Это подтверждается другой историей из той же серии, в ней группа венгерских аристократов заблудилась в Альпах во время туристического похода. Один из них, говорится в истории, достал карту и, после длительного ее изучения, воскликнул:

- Я знаю, где мы находимся!
- Где? — спросили остальные.
- Видите вон ту большую гору? Мы находимся как раз на ее вершине.

клевета, но такой разговор мог иметь место, если бы два господина были бы не венграми, а готтентотами. И мы оставляем на совести исследователей африканского континента их заявления, что в словарях многих готтентотских племен нет цифры больше трех. Спросите местного жителя тех краев, сколько у него сыновей или сколько врагов он убил, и, если число будет больше трех, он просто ответит: «Много». Таким образом, свирепые воины из страны готтентотов в искусстве подсчетов могут проиграть любому американскому ребенку, который ходит в детский сад и может похвастать способностью считать до 10!

Или вы можете написать это число в краткой форме: 3×10^{74} .

Маленькая цифра ⁷⁴ сверху и справа от 10 указывает на то, сколько нулей должно быть написано. Другими словами, 3 нужно умножить на 10, умноженное на себя 74 раза.

Но в древние времена этой упрощенной арифметической системы еще не знали. Собственно, ее изобрел неизвестный индийский математик менее двух тысяч лет назад. До его великого открытия — а оно действительно великолепное, хотя обычно мы не осознаем этого — цифры записывали с помощью специальных символов (сейчас вместо них мы используем десятичные числа), повторяя каждый символ столько раз, сколько насчитывалось единиц в цифре. Например, число 8732 древние египтяне записали бы так:



тогда как писец во времена Цезаря изобразил бы его в следующем виде:

MMMMMMMDCCXXXII

* Исходя из данных самого большого телескопа в мире.

Последняя система счисления должна быть вам знакома, так как римские цифры все еще иногда используются — для нумерации томов или глав в книгах либо для того, чтобы написать дату исторического события на помпезной мемориальной доске. Однако, поскольку потребности древней бухгалтерии не превышали сумм в несколько тысяч, символов для больших чисел не существовало, и если бы древнего римлянина, не важно, насколько хорошо он был обучен арифметике, попросили написать «один миллион», он был бы чрезвычайно смущен. В лучшем случае он, чтобы исполнить просьбу, мог бы последовательно написать тысячу раз символ M , что потребовало бы много часов кропотливой работы (рис. 1).

Для людей эпохи античности очень большие количества, такие как совокупность звезд на небе, рыб в море или песчинок на пляже, были «неисчислимы». В то время как для готтентота неисчислимым было число «пять», и обозначалось просто словом «много»!

Понадобился гений Архимеда, прославленного ученого третьего тысячелетия до н.э., чтобы показать, что записывать действительно большие числа вполне возможно.

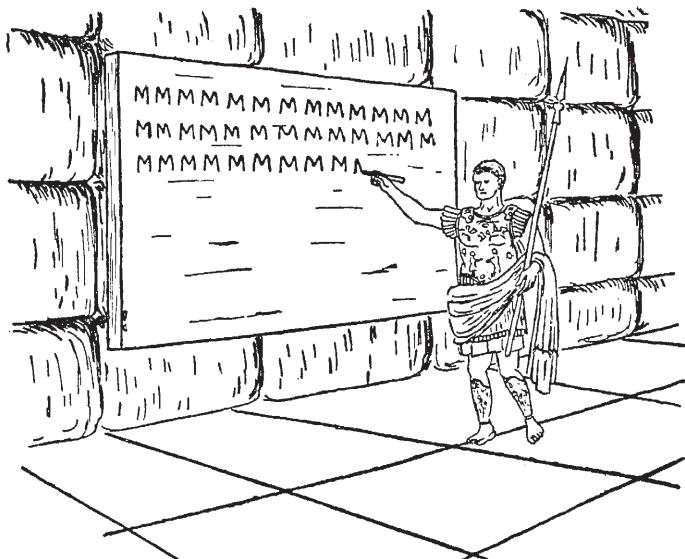


Рис. 1. Древний римлянин, похожий на Августа Цезаря, пытается написать римскими цифрами «один миллион». На доске же едва поместится «сто тысяч».

В своем трактате «*Псаммит, или Исчисление песчинок*» Архимед говорит: «Некоторые люди считают, что песчинок бесконечное множество; и я имею в виду не только тот песок, который есть в Сиракузах и на остальной части Сицилии, а песок, который можно найти во всех уголках Земли, населенных или необитаемых. Есть также те, кто не считает количество песчинок бесконечным, но тем не менее думают, что *невозможно назвать число достаточно большое, чтобы оно превысило то, которое отражает совокупность всех земных песчинок*. Ясно, что те, кто придерживается этой точки зрения, вообразив кучу песка, равную по размерам и массе Земле вместе со всеми ее морями и низинами и самыми высокими горами, будут еще более уверены, что число большее, чем то, которое необходимо, дабы обозначить количество песчинок в этой собирательной куче, — невозможно выразить. Но я попытаюсь показать, что из чисел, называемых мною, некоторые превышают не только количество песчинок, равное по массе Земле, наполненной всем, что описано выше, но даже количество песка, равное по размерам Вселенной».

Способ написания больших чисел, предложенный Архимедом в его знаменитом труде, подобен способу написания таковых в современной науке. Он начал с самого большого числа, существовавшего в древнегреческой арифметике, — «мириады», или десяти тысяч. Затем он ввел новое число — «мириада мириад» (сто миллионов), которое назвал «октада», или «единица второго класса». «Октада октада» (или десять миллионов миллиардов) представляет «единицу третьего класса». «Октада октады октада» — «единица четвертого класса» и так далее.

Написание больших чисел может показаться слишком незначительной темой, чтобы посвящать ей несколько страниц книги, но во времена Архимеда изобретение подобного способа стало великим открытием и важным шагом вперед в развитии математической науки.

Для подсчета числа песчинок, необходимых для заполнения всей Вселенной, Архимед должен был знать, насколько она велика. В его времена верили, что Вселенная заключена в кристальную сферу, к которой прикреплены неподвижные звезды; его знаменитый современник, астроном Аристарх Самосский, оценил рас-

стояние от земли до окружности небесной сферы в 10 000 000 000 стадий*, или примерно в 1 000 000 000 миль¹.

Сопоставляя размер сферы с размером песчинки, Архимед сделал несколько вычислений, которые довели бы какого-нибудь старшеклассника до ночных кошмаров, и в итоге пришел к такому заключению: «Очевидно, что количество песчинок, которые могут быть заключены в пространстве, столь большом, сколь то, что ограничено небесной сферой, если брать ее размеры по Аристарху, — составляет не больше одной тысячи мириад единиц восьмого класса»**.

Следует отметить, что радиус Вселенной, по оценкам Архимеда, несколько меньше, чем по оценкам современных ученых. Расстояние в один миллиард миль — это лишь чуть дальше, чем до планеты Сатурн нашей Солнечной системы. Как мы увидим позже, Вселенную исследовали с помощью телескопов до расстояния в 5 000 000 000 000 000 000 000 миль от нас, так что количество песчинок, необходимое для заполнения всей видимой Вселенной, будет свыше:

$$10^{100} \text{ (то есть } 1 \text{ и } 100 \text{ нулей).}$$

Это, конечно же, намного больше, чем общее количество атомов во Вселенной, заявленное в начале этой главы, — 3×10^{74} , но мы не должны забывать, что Вселенная *не набита атомами битком*, на самом деле на кубический метр пространства приходится в среднем лишь 1 атом.

Но нет никакой необходимости идти на радикальные меры и набивать Вселенную песком, чтобы получить действительно большие числа. Собственно, они частенько возникают в случаях, которые кажутся на первый взгляд очень простыми и в которых вы не ожидаете получить число большее, чем несколько тысяч.

Одной из жертв ошеломляющих чисел стал магараджа Индии Ширхам, который, согласно старой легенде, захотел вознаградить

* Один греческий стадий равен 606 футам и 6 дюймам, или 188 метрам (м).

¹ 1 миля равна 1,6 км.

** В наших обозначениях это выглядело бы так:

тысяча мириад	2-го класса	3-го класса	4-го класса
$(10\,000\,000)$	$\times (100\,000\,000)$	$\times (100\,000\,000)$	$\times (100\,000\,000) \times$
5-го класса	6-го класса	7-го класса	8-го класса
$(100\,000\,000)$	$\times (100\,000\,000)$	$\times (100\,000\,000)$	$\times (100\,000\,000)$

или просто:

$$10^{63} \text{ (то есть } 1 \text{ и } 63 \text{ ноля).}$$

своего великого визиря Сиссу Бен Дахира за то, что тот изобрел шахматы и представил эту игру ему. Желания столь даровитого визиря казались очень скромными. «Ваше величество, — сказал он, преклонив колени перед магараджей, — пожалуйте мне одно зерно пшеницы, дабы положить его на первое поле¹ этой шахматной доски, и два зерна, чтобы положить на второе поле, и четыре зерна — на третье, и восемь зерен — на четвертое. И так, о повелитель, удваивая количество зерен для каждого следующего поля, пожалуйте мне достаточно зерна, дабы покрыть все 64 поля доски».

«Ты не много просишь, о мой верный слуга, — воскликнул магараджа, втайне наслаждаясь мыслью, что великолепное предложение одарить изобретателя дивной игры не будет стоить ему изрядной доли сокровищ. — Твое желание будет всенепременно исполнено». И он приказал принести в тронный зал мешок пшеницы.



Рис. 2. Великий визирь и искусный математик Сисса Бен Дахир просит награду у магараджи Индии Ширхама.

Но когда начался подсчет — 1 зерно на первое поле, 2 на второе, 4 на третье и так далее — мешок опустел еще до того, как добрались до двадцатого поля. Магарадже принесли больше мешков пшеницы, но количество зерен, необходимое для каждого следующего поля, увеличивалось столь быстро, что вскоре стало ясно: даже отдав весь урожай Индии, магараджа не сможет выпол-

¹ Имеется в виду клетка шахматной доски.

нить обещание, данное Сиссе Бену. Для этого потребовалось бы 18 446 744 073 709 551 615 зерен!*

Это не столь большое число, как общее количество атомов во Вселенной, но в любом случае оно достаточно велико. Бушель¹ пшеницы содержит, предположительно, 5 000 000 зерен, и нужно было бы примерно 4000 миллиардов бушелей, чтобы удовлетворить требование Сиссы Бена. Поскольку мировое производство пшеницы составляет в среднем около 2 000 000 000 бушелей в год, количество, запрошенное великим визиром, равнялось бы *количеству пшеницы, произведенной во всем мире примерно за две тысячи лет!*

Так магараджа Ширхам оказался по уши в долгах перед своим визиром и должен был либо иметь дело с непрестанным потоком требований последнего, либо отрубить тому голову. Мы подозреваем, что магараджа выбрал второй вариант.

Другая история, в которой большое число играет главную роль, тоже из Индии, и она имеет отношение к проблеме «Конца света». У. У. Р. Болл, историк с фантазией математика, повествует ее так**.

В великом храме в Бенаресе, что стоит в центре мира, лежит бронзовая пластина, в которой закреплены три алмазные иглы в локоть высотой (один локоть равен примерно 20 дюймам) и толщиной, как тело пчелы. Во время Творения на одну из этих игл

* Количество пшеничных зерен, которое потребовал хитроумный визирь, можно представить следующим образом:

$$1 + 2 + 2^2 + 2^3 + 2^4 + \dots + 2^{62} + 2^{63}.$$

В арифметике последовательность чисел, каждое из которых увеличивается путем умножения на один и тот же множитель (в данном случае множитель 2), называется геометрической прогрессией. Можно показать, что сумма всех членов в такой прогрессии может быть найдена возведением постоянного множителя (в данном случае 2) в степень, представляющую количество шагов в прогрессии (в данном случае 64), вычитанием из него первого члена (в данном случае 1) и делением результата на выше упомянутый постоянный множитель минус 1. Это можно выразить так:

$$\frac{2^{63} \times 2 - 1}{2 - 1} = 2^{64} - 1$$

и записать в виде точного числа:

$$18\,446\,744\,073\,709\,551\,615.$$

¹ Бушель — единица объема в английской системе мер, содержит примерно 35–37 кг зерна.

^{**} W. W. R. Ball, Mathematical Recreations and Essays (The Macmillan Co., New York, 1939). [Рус. изд.: У. Болл, Г. Коксетер. Математические эссе и развлечения. М.: Мир, 1986.]

Бог нанизал шестьдесят четыре диска из чистого золота: самый большой диск поконится на бронзовой пластине, каждый следующий — меньше предыдущего. Эта пирамида из дисков — башня Брахмы. День и ночь без устали дежурный священник переносит диски с одной алмазной иглы на другую, соблюдая вечные и непреложные законы Брахмы, которые требуют, чтобы священник перемещал только один диск за раз, а диски на иглы нанизывал так, чтобы меньший по размеру диск никогда не оказывался ниже большего. Когда все шестьдесят четыре диска будут перенесены подобным образом с иглы, на которую Бог нанизал их во время Творения, на одну из двух других, башня, храм и брахманы распыляются в пыль, грянет гром и мир исчезнет.

Рис. 3 иллюстрирует положение вещей, описанное в этой истории, за исключением того, что на нем изображено меньшее количество дисков. Вы можете и сами сделать такую игру-головоломку, используя вместо золотых дисков и алмазных гвоздей из индийской легенды диски из обычного картона и длинные железные гвозди.

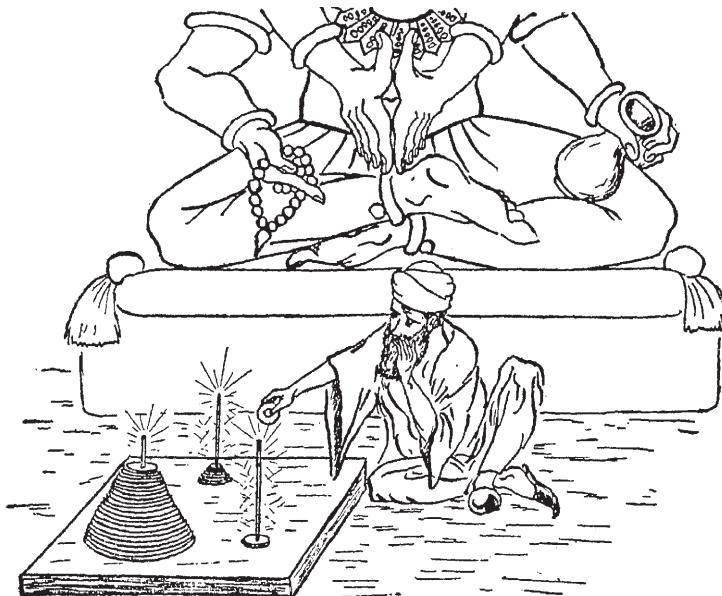


Рис. 3. Священник трудится над решением проблемы «Конца света» перед гигантской статуей Брахмы. Количество изображенных золотых дисков меньше 64, так как было бы затруднительно нарисовать их все.

Общее правило, по которому следует перемещать диски, найти нетрудно, и когда вы его найдете, то увидите, что перенос каждого нового диска требует в два раза больше действий, чем перенос предыдущего. Первый диск требует лишь одного перемещения, но количество действий необходимых для каждого следующего диска растет геометрически, поэтому, когда дело дойдет до 64-го диска, его придется переместить столько раз, сколько было зерен в том количестве пшеницы, которое запросил Сисса Бен Дахир!*

Сколько времени потребовалось бы, чтобы перенести все шестьдесят четыре диска башни Брахмы с одной иглы на другую? Предположим, что священники трудились бы день и ночь, без выходных и отпусков, совершая одно перемещение за одну секунду. Поскольку в году около 31 558 000 секунд, понадобилось бы немногим более *пятидесяти восьми тысяч миллиардов лет*, чтобы довести это дело до конца.

Интересно сравнить пророчество касательно продолжительности существования Вселенной из чистой легенды с прогнозом современной науки. В соответствии с нынешней теорией об эволюции Вселенной¹ звезды, Солнце и планеты, включая нашу Землю, образовались из бесформенных масс, около 3 000 000 000 лет назад. Мы также знаем, что «ядерного топлива», которое питает звезды и, в частности, наше Солнце, может хватить еще на 10 000 000 000 или 15 000 000 000 лет. (См. главу о «Днях творения».) Следовательно, общий период жизни нашей Вселенной определенно короче 20 000 000 000 лет и уж никак не 58 000 миллиардов лет, которые выходят, если опираться в расчетах на индийскую легенду! Но, в конце концов, это всего лишь легенда!

* Если у нас всего семь дисков, количество необходимых перемещений составит

$$1 + 2^1 + 2^2 + 2^3 + \text{так далее}$$

или

$$2^7 - 1 = 2 \times 2 \times 2 \times 2 \times 2 \times 2 \times 2 - 1 = 127.$$

Если бы мы перемещали диски быстро и без ошибок, нам понадобилось бы около часа на выполнение этой задачи. Когда у нас 64 диска, общее количество необходимых перемещений становится

$$2^{64} - 1 = 18\,446\,744\,073\,709\,551\,615,$$

и это то же самое число, что и количество зерна, потребованное Сиссой Бен Дахиром.

¹ Книга была написана в середине предыдущего столетия.

Однако, вероятно, самое большое число, которое когда-либо упоминалось в литературе, имеет отношение к известной «Проблеме печатной строки». Предположим, что мы создали бы печатный станок, который бы непрерывно печатал одну строку за другой, автоматически выбирая для каждой строки отличную от прочих комбинацию букв алфавита и других типографских знаков. Такая машина состояла бы из ряда отдельных дисков с нанесенными на них по ободу буквами и знаками. Диски располагались бы по отношению друг к другу подобно тому, как расположены диски с цифрами в индикаторе пробега вашего автомобиля, и полное вращение диска перемещало бы следующий на одно деление. После каждого такого перемещения бумагу, по мере ее поступления из рулона, автоматически прижимало бы к цилиндуру. Подобный автоматический печатный станок можно построить без особых трудностей; то, как он мог бы выглядеть, схематически изображено на рис. 4.

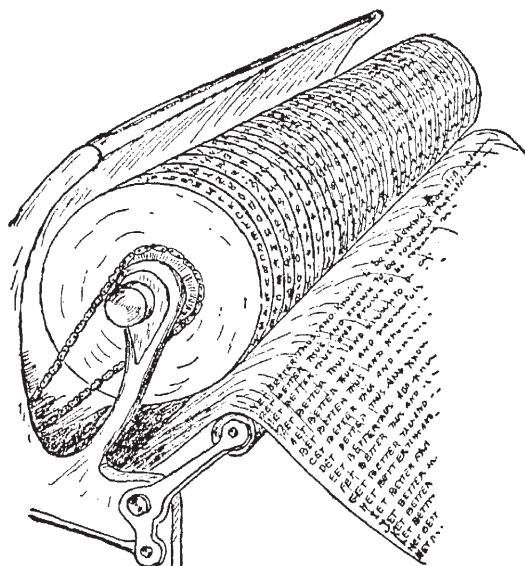


Рис. 4. Автоматический печатный станок, который только что без единой ошибки напечатал строчку из Шекспира.

Давайте запустим этот станок и ознакомимся с бесконечной последовательностью самых разных печатных строк, которые выходят из-под пресса. Большинство из них не имеет никакого смысла. Они выглядят так:

«aaaaaaaaaaa...»,

или

«бообообообообо...»,

или же

«заукпорпкоссцилм...».

Но так как станок печатает *все возможные* комбинации букв и знаков, мы находим среди полной ерунды предложения, в которых есть смысл. Получается, конечно же, и много никуда не годных предложений, таких как

«У лошади шесть ног и...»

или же

«Мне нравятся яблоки, приготовленные в терпентине¹...».

Но изучение результатов выявит также и каждую строчку, когда-либо написанную Шекспиром, даже ту, лист с которой он сам бросил в мусорную корзину!

Собственно, такой автоматический станок напечатал бы все, что было написано с того времени, когда люди научились писать: каждую строчку прозы и поэзии, каждую передовую статью и рекламное объявление, каждый увесистый том научных трудов, каждое любовное письмо, каждую записку молочнику...

Более того, станок напечатал бы все, что напишут в грядущие столетия. На бумаге, выходящей из-под вращающегося цилиндра, мы бы нашли поэзию тридцатого века, будущие научные открытия, выступления, которые прозвучат в 500-м Конгрессе Соединенных Штатов, и отчеты о межпланетных дорожно-транспортных происшествиях в 2344 году. Станок напечатал бы и страницы коротких рассказов и длинных романов, которые еще не написаны человеческой рукой, и издателям, имеющим такие станки у себя в подвалных этажах, оставалось бы только выбирать из великого множества ерунды дельные фрагменты и редактировать их, что, впрочем, сейчас они и делают.

¹ Смолистый сок некоторых хвойных деревьев; скипидар, канифоль.

Почему это невозможно?

Что ж, давайте подсчитаем, какое количество строк надо было бы напечатать станку, чтобы перебрать все возможные комбинации букв и других типографских знаков.

В английском алфавите 26 букв, десять цифр (0, 1, 2... 9) и 14 часто применяемых знаков (пробел, точка, запятая, двоеточие, точка с запятой, вопросительный знак, восклицательный знак, тире, дефис, кавычки, апостроф, квадратные скобки, круглые скобки, фигурные скобки); всего 50 символов. Давайте предположим также, что станок имеет 65 дисков, соответствующих каждому из 65 положений в средней печатной строке. Печатная строка может начинаться с любого из 50 знаков, так что мы имеем 50 возможностей. Для *каждой* из этих 50 возможностей существует 50 возможностей занять в строке второе место, то есть всего $50 \times 50 = 2500$ возможностей. Но для каждой данной комбинации двух первых букв кандидата на третье место мы также выбираем из 50 возможных знаков и так далее. Совокупность всех возможных вариантов полной строки можно выразить следующим образом:

$$\overbrace{50 \times 50 \times 50 \dots \times 50}^{65 \text{ раз}},$$

или 50^{65} ,

что равно 10^{110} .

Чтобы ощутить огромность этого числа, предположим, что каждый атом во Вселенной представляет собой отдельный печатный станок, так что мы имеем $3 \cdot 10^{74}$ одновременно работающих станков. Предположим далее, что все эти станки работали без остановки с момента сотворения Вселенной, то есть в течение периода в 3 миллиарда лет, или 10^{17} секунд, печатая со скоростью колебаний атома, то есть 10^{15} строк в секунду. К настоящему времени они напечатали бы около

$$3 \cdot 10^{74} \times 10^{17} \times 10^{15} = 3 \cdot 10^{106}$$

строк, что является всего лишь примерно одной тридцатой 1-го процента от искомого общего числа.

О да, попытка выбрать хоть что-нибудь из автоматически напечатанного материала действительно заняла бы очень много времени!

2. КАК СЧИТАТЬ БЕСКОНЕЧНОСТИ

В предыдущем параграфе мы обсуждали числа, многие из которых довольно большие. Но, хотя такие числовые гиганты, как количество пшеницы, потребованное Сиссой Беном, трудно даже вообразить, они тем не менее конечны, и, имея достаточно времени, их можно написать вплоть до последнего десятичного знака.

Но существуют некоторые действительно бесконечные числа, большие, чем любое число, которое, в теории, мы все же можем написать целиком вне зависимости от того, сколько придется потратить на это времени. Так, «количество всех чисел» явно бесконечно и «количество всех геометрических точек на прямой» тоже. Есть ли что-то еще, что можно сказать о таких числах, кроме того, что они бесконечны? Можно ли, например, сравнить две разные бесконечности, чтобы узнать, какая из них «больше»?

Есть ли смысл в вопросе: «Является ли количество всех чисел больше или меньше, чем количество всех точек на прямой?» Такие вопросы, как этот, кажущиеся на первый взгляд фантастичными, впервые рассмотрел известный математик Георг Кантор, которого воистину можно назвать основателем «арифметики бесконечности».

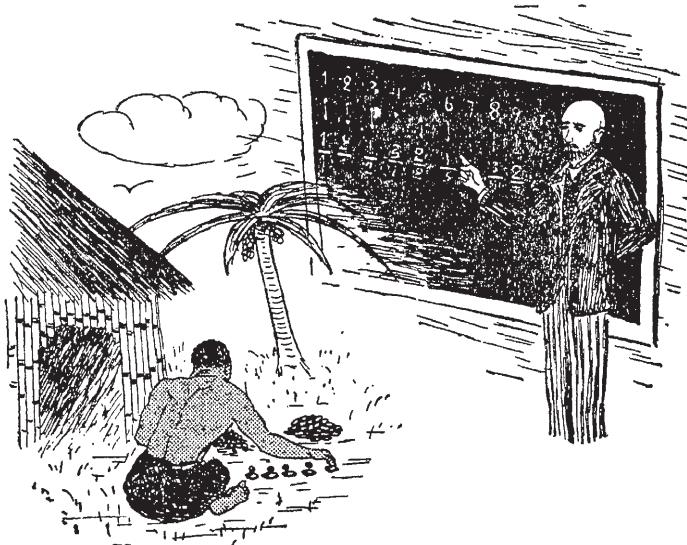


Рис. 5. Уроженец Африки и профессор Г. Кантор сравнивают числа, которые не могут сосчитать.

Когда речь заходит о больших и меньших бесконечностях, мы сталкиваемся с проблемой сравнения чисел, которые не можем ни назвать, ни написать, и, более или менее, находимся в положении готтентота, инспектирующего свой сундук с сокровищами, желая узнать, чего больше в его распоряжении — стеклянных бус или медных монет. Но, как вы помните, готтентот не может считать более чем до трех. Откажется ли он от попыток сравнить число бусинок с количеством монет только потому, что не может их сосчитать? Вовсе нет. Если он достаточно умен, то получит ответ, сравнивая бусинки с монетами поштучно. Он поместит одну бусинку рядом с одной монетой, другую бусинку рядом с другой монетой и так далее, и так далее, и так далее... Если у него закончились бусинки, а монеты еще есть, он знает, что у него больше монет, чем бусинок; если у него закончились монеты, а бусинки остаются, он знает, что у него больше бусинок, чем монет; а если закончились и те и другие одновременно, даже ему будет ясно, что бусинок у него столько же, сколько и монет.

Точно такой же метод был предложен Кантором для сравнения двух бесконечностей: если мы сможем соединить в пары объекты двух бесконечных групп так, чтобы каждый объект одного бесконечного множества стал парой для каждого объекта другого бесконечного множества, и если ни один объект из обеих групп не останется без пары, то две бесконечности равны. Если, однако, такое распределение невозможно и в одном из множеств остаются объекты без пары, мы говорим, что бесконечность объектов в данном множестве больше, или сильнее, чем бесконечность объектов в другом множестве.

Это, несомненно, наиболее разумное и, в сущности, единственное правило, которое можно использовать для сравнения бесконечных количеств, но мы должны быть готовы к некоторым неожиданностям — когда начинаем применять его на деле. Возьмем, к примеру, бесконечность всех четных и бесконечность всех нечетных чисел. Вы, конечно же, чувствуете интуитивно, что четных чисел существует столько же, сколько и нечетных, и это полностью согласуется с вышеупомянутым правилом, поскольку соответствие «один к одному» вполне применимо к этим числам:

$$\begin{array}{ccccccccccccc}
 1 & 3 & 5 & 7 & 9 & 11 & 13 & 15 & 17 & 19 & \text{и т.д.} \\
 \downarrow & \uparrow & \\
 2 & 4 & 6 & 8 & 10 & 12 & 14 & 16 & 18 & 20 & \text{и т.д.}
 \end{array}$$

В этой таблице каждому нечетному числу соответствует четное и наоборот, следовательно, бесконечность четных чисел равна бесконечности нечетных чисел. И это на самом деле кажется простым и совершенно естественным!

Но погодите минутку. Что, по вашему мнению, больше: количество всех чисел — как четных, так и нечетных, или количество только четных чисел? Вы, конечно же, скажете, что множество всех чисел больше, потому что оно содержит в себе все четные числа и к тому же все нечетные. Но это только ваше впечатление, а для того, чтобы получить точный ответ, вы должны использовать приведенное выше правило сравнения двух бесконечностей. И если вы его примените, то обнаружите, к своему удивлению, что ваше впечатление было ошибочным. Собственно, вот таблица соответствия «один к одному» всех чисел, с одной стороны, и только четных чисел, с другой:

$$\begin{array}{cccccccccc} 1 & 2 & 3 & 4 & 5 & 6 & 7 & 8 & \text{и т.д.} \\ \downarrow & \downarrow \\ 2 & 4 & 6 & 8 & 10 & 12 & 14 & 16 & \text{и т.д.} \end{array}$$

Основываясь на правиле сравнения бесконечностей, мы вынуждены констатировать, что бесконечность четных чисел так же велика, как и бесконечность всех чисел. Это звучит, конечно же, парадоксально, так как четные числа представляют собой всего лишь часть всех чисел, но нам следует помнить, что здесь мы опираемся на бесконечными числами и должны быть готовы столкнуться с иными свойствами.

На самом деле в мире бесконечности *часть может быть равна целому!* Вероятно, лучшей иллюстрацией этому станет пример, взятый из одной из историй о знаменитом немецком математике Дэвиде Гильберте.

Говорят, в своих лекциях о бесконечности он объяснял это парадоксальное свойство бесконечных чисел таким образом:*

«Давайте представим себе гостиницу с конечным количеством номеров и предположим, что все номера заняты. Туда приходит новый гость и просит номер. «Извините, — говорит владелец, — но

* Из неопубликованной и даже ненаписанной, но широко распространенной книги Р. Куранта «Полное собрание историй Гильберта».

все номера заняты». Теперь представим себе гостиницу с бесконечным количеством номеров, и все номера тоже заняты. В эту гостиницу также приходит новый гость и просит номер.

«Конечно! Одну минутку!» — восклицает владелец и переселяет человека, занимающего номер 1, в номер 2, человека из номера 2 в номер 3, человека из номера 3 в номер 4 и так далее... И новый постоялец получает номер 1, который освобождается в результате этих переселений.

Теперь представим себе гостиницу с бесконечным количеством номеров, которые все заняты, и бесконечное число новых гостей, которые приходят и просят номер.

«Конечно, джентльмены, — говорит владелец, — одну минутку».

Он переселяет постояльца из номера 1 в номер 2, постояльца из номера 2 в номер 4, постояльца из номера 3 в номер 6 и так далее, и так далее, и так далее...

В итоге освобождаются все нечетные номера, и в них можно поселить бесконечное число новых гостей».

Что ж, нелегко представить себе условия, описанные Гильбертом, в Вашингтоне, даже во время войны, но данный пример, безусловно, наталкивает на мысль, что, оперируя бесконечными числами, мы сталкиваемся со свойствами, отличными от тех, к которым привыкли в обычной арифметике.

Следуя правилу сравнения двух бесконечностей Кантора, мы также можем теперь доказать, что количество всех обыкновенных арифметических дробей, таких как $\frac{3}{7}$ или $\frac{735}{8}$, совпадает с количеством всех целых чисел. Собственно, мы можем расположить все обыкновенные дроби в линию согласно следующему правилу. Напишем сначала дроби, в которых сумма числителя и знаменателя равна 2. Есть только одна такая дробь, а именно: $\frac{1}{1}$. Затем напишем дроби с суммами равными 3: $\frac{2}{1}$ и $\frac{1}{2}$. Затем — с суммами равными 4: $\frac{3}{1}$, $\frac{2}{2}$, $\frac{1}{3}$. И так далее. Следуя этой процедуре, мы получаем бесконечную последовательность дробей, содержащих любую дробь, какую только можно придумать (рис. 5). Теперь напишем над этой последовательностью последовательность целых чисел, и у нас получится соответствие «один к одному» между бесконечностью дробей и бесконечностью целых чисел. Следовательно, их количество одинаково!

«Ну, все это очень мило, — можете сказать вы, — но разве это просто не означает, что *все* бесконечности равны друг другу? И если так, какой смысл их сравнивать?»

Нет, это не так, и можно с легкостью найти бесконечность, которая больше бесконечности всех целых чисел или всех арифметических дробей.

На самом деле, если мы рассмотрим вопрос, заданный ранее в этой главе, — касательно числа точек на прямой линии в сравнении с количеством всех целых чисел, мы найдем, что эти две бесконечности разные; на прямой гораздо больше точек, чем существует целых чисел или дробей. Чтобы доказать это утверждение, давайте попробуем установить соответствие «один к одному» между точками на прямой линии длиной, скажем, в 1 дюйм и последовательностью целых чисел.

Каждая точка на прямой определяется расстоянием, которое отсчитывается от одного конца этой линии, и это расстояние можно записать в виде бесконечной десятичной дроби, например, $0,7350624780056 \dots$ или $0,38250375632 \dots$ * Следовательно, мы должны сравнить количество всех целых чисел с количеством всех возможных бесконечных десятичных дробей. Какова разница между бесконечными десятичными дробями, подобными вышеприведенным, и обыкновенными арифметическими дробями, такими как $\frac{3}{7}$ или $\frac{8}{277}$?

Вы должны помнить из арифметики, что каждая обыкновенная дробь может быть преобразована в бесконечную *периодическую* десятичную дробь. Так, $\frac{2}{3} = 0,66666 \dots = 0,(6)$, а $\frac{3}{7} = 0,428571|428571|428571|4 = 0,(428571)$. Мы уже доказали выше, что количество всех обыкновенных арифметических дробей равно количеству всех целых чисел, поэтому количество всех *периодических* десятичных дробей также должно совпадать с количеством всех целых чисел. Но точки на прямой не всегда представлены *периодическими* десятичными дробями, в большинстве случаев мы получим бесконечные дроби, в которых десятичные цифры появляются без какой-либо периодичности вообще. И нетрудно показать, что в этом случае никакое линейное соответствие невозможно.

Предположим, что некто утверждает, будто установил такое соответствие и выглядит оно примерно так:

* Все эти дроби меньше единицы, так как мы предположили, что длина прямой — один дюйм.

N
1 0,38602563078 ...
2 0,57350762050 ...
3 0,99356753207 ...
4 0,25763200456 ...
5 0,00005320562 ...
6 0,99035638567 ...
7 0,55522730567 ...
8 0,05277365642 ...
.....
.....
.....
.....
.....
.....

Поскольку невозможно на самом деле написать бесконечность чисел с бесконечным числом десятичных знаков в каждом, выше-приведенное утверждение означает, очевидно, что у автора таблицы есть некое общее правило, аналогичное использованному нами для организации обыкновенных дробей, в соответствии с которым он составил таблицу, и это правило гарантирует, что любая десятичная дробь, какая только придет на ум, рано или поздно появится в таблице.

Итак, совершенно нетрудно показать, что любые утверждения такого рода являются несостоительными, так как мы всегда можем написать бесконечную десятичную дробь, которой *нет* в этой бесконечной таблице. Как это можно сделать? Да очень легко. Просто напишите дробь с первым десятичным знаком, который отличается от первого десятичного знака у дроби под номером № 1 из таблицы, и вторым десятичным знаком, который отличается от второго десятичного знака у дроби под номером № 2 из таблицы, и так далее. Число, которое вы получите, будет выглядеть примерно так:

не 3	не 7	не 3	не 6	не 5	не 6	не 3	не 5	
↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	и т.д. —
0,	5	2	7	4	0	7	1	2

и это число не входит в таблицу, как бы долго вы его там ни искали. Собственно, если автор таблицы скажет вам, что дробь, кото-

рую написали вы, находится в его таблице под № 137 (или под любым другим номером), вы тут же можете возразить: «Нет, это не та же самая дробь, потому что сто тридцать седьмой десятичный знак в вашей дроби отличается от ста тридцать седьмого десятичного знака в дроби, которая на уме у меня».

Таким образом, невозможно установить соответствие «один к одному» между точками на прямой и целыми числами, что означает: *бесконечность точек на прямой линии больше, или сильнее, чем бесконечность всех целых чисел или дробей*.

Мы обсуждали точки на отрезке прямой линии в «1 дюйм длиной», но теперь легко показать, что, согласно правилам «арифметики бесконечности», то же самое верно в отношении отрезка прямой линии любой длины. Собственно, *на отрезке прямой линии длиной хоть в один дюйм, хоть в один фут, хоть в одну милю находится одинаковое количество точек*. Чтобы получить доказательство этому, просто взгляните на рис. 6, на котором сравнивается количество точек на двух отрезках прямых линий AB и AC разной длины. Чтобы установить соответствие «один к одному» между точками этих двух отрезках прямых, проведите через каждую точку на отрезке прямой AB линии параллельные BC и соедините точки пересечений в пары, как например, D и D' , E и E' , F и F' и так далее. Каждая точка на AB имеет соответствующую точку на AC и наоборот; как видим, согласно правилу, две бесконечности точек равны.

Еще более поразительный результат анализа бесконечности состоит в утверждении, что *число всех точек на плоскости равно числу всех точек на прямой*. Чтобы доказать это, рассмотрим точки на отрезке прямой AB длиной в один дюйм, а также точки внутри квадрата $CFED$ (рис. 7).

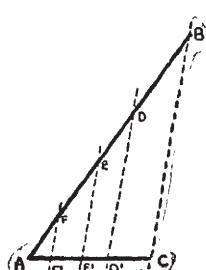


Рис. 6.

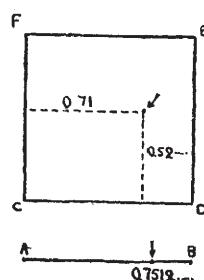


Рис. 7.

Предположим, что положение точки на отрезке прямой задано неким числом, скажем, 0,75120386... Выбрав четные и нечетные десятичные знаки и объединив их, мы можем составить из этого числа два других. Мы получаем:

$$0,7108 \dots$$

и

$$0,5236 \dots$$

Отмерим в квадрате расстояния, заданные этими числами, в горизонтальном и вертикальном направлениях и назовем полученную таким образом точку «парной точкой» для исходной точки на отрезке прямой. И наоборот, если в квадрате имеется точка, положение которой определяется, скажем, числами

$$0,4835 \dots$$

и

$$0,9907 \dots$$

мы получаем положение соответствующей «парной точки» на отрезке прямой путем соединения этих двух чисел:

$$0,49893057 \dots$$

Ясно, что эта операция устанавливает соответствие «один к одному» между двумя наборами точек. Каждая точка на отрезке прямой линии будет иметь пару внутри квадрата, каждая точка внутри квадрата будет иметь пару на отрезке прямой линии, и ни одна не останется без пары. Таким образом, согласно критерию Кантора, бесконечность всех точек внутри квадрата равна бесконечности всех точек на отрезке прямой.

Аналогичным образом легко также доказать, что бесконечность всех точек внутри куба равна бесконечности точек внутри квадрата или бесконечности точек на отрезке прямой. Для этого нам просто нужно разбить исходную десятичную дробь на три части* и использовать полученные таким образом три новые дроби, чтобы определить положение «парной точки» внутри куба.

* Например, из

0,735106822548312 ... и так далее

мы составляем:

0,71853 ...

0,30241 ...

0,56282 ...

И, как и в случае двух отрезков прямых линий разной длины, число точек в квадрате или кубе будет то же самое вне зависимости от их размера.

Но, хотя число всех геометрических точек и больше, чем число всех целых чисел и дробей, оно не является самым большим из известных в математике. Собственно, было установлено, что множество всех возможных кривых, в том числе самой необычной формы, имеет большее количество членов, чем совокупность всех геометрических точек, и, следовательно, должно описываться третьим числом бесконечной последовательности.

Согласно Георгу Кантору, создателю «арифметики бесконечности», бесконечные числа обозначаются еврейской буквой («алеф») и маленьким числом внизу и справа от нее, которое указывает на порядок бесконечности. Последовательность чисел (включая бесконечные!) теперь содержит:

$$1. 2. 3. 4. 5 \dots \aleph_0 \aleph_1 \aleph_2 \dots$$

и мы говорим: «существует \aleph_0 точек на прямой» или «существует \aleph_0 различных кривых», — точно так же, как мы говорим: «существует 7 частей света» или «в колоде 52 карты».

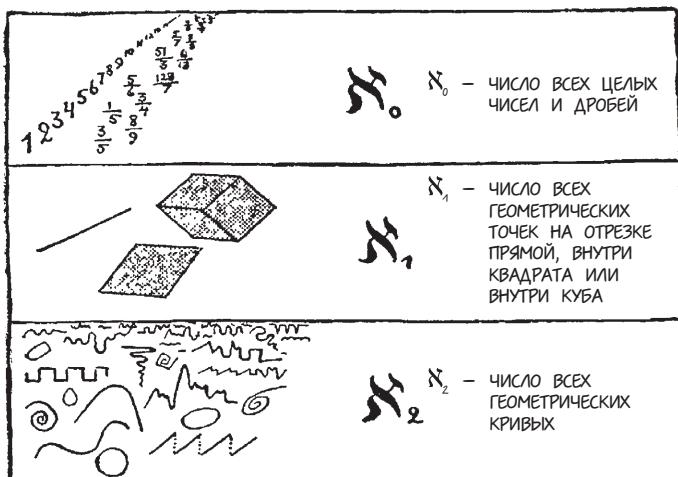


Рис. 8. Первые три бесконечных числа.

Завершая наш разговор о бесконечных числах, хотелось бы отметить, что эти числа превышают пределы любых мыслимых наборов цифр, к каким только возможно их применить. Мы знаем, что \aleph_0 представляет число всех целых чисел, \aleph_1 — число всех геометрических точек, а \aleph_2 — число всех кривых, но никто пока не в состоянии вообразить какое-либо определенное бесконечное множество объектов, которое бы описывалось \aleph_3 . Кажется, что трех первых бесконечных чисел достаточно, чтобы сосчитать все, о чем только можно подумать, — и тут мы оказываемся в положении прямо противоположном расположению нашего старого друга готтентота, у которого было много сыновей, а считать он мог только до трех!

Глава II

Натуральные и ненатуральные числа

1. ЧИСТЕЙШАЯ МАТЕМАТИКА

Математику обычно называют царицей всех наук (особенно сами математики). И, будучи царицей, она, естественно, пытается избежать морганатических отношений с другими отраслями знаний. Так, например, когда Дэвида Гильберта на «Объединенном конгрессе теоретической и прикладной математики» попросили произнести вступительную речь, которая помогла бы преодолеть враждебность, существовавшую, как казалось, между двумя группами математиков, он начал так:

«Нам часто говорят, что теоретическая и прикладная математики враждебны друг другу. Это неправда, теоретическая и прикладная математики не враждебны друг другу, теоретическая и прикладная математики никогда не были враждебны друг другу, теоретическая и прикладная математики никогда не будут враждебны друг другу, теоретическая и прикладная математики не могут быть враждебны друг другу, потому что на самом деле между ними нет абсолютно ничего общего».

Но, хотя математика любит пребывать в теоретическом поле и держаться в стороне от других наук, другие науки, особенно физика, любят математику и стараются подружиться с ней как можно крепче. Собственно, практически каждая отрасль теоретической математики сейчас работает на объяснение того или иного свойства физической Вселенной. Это включает в себя такие дисциплины, как абстрактная теория групп, некоммутативная алгебра и неевклидова геометрия, которые всегда считались самыми теоретическими и ни к чему не применимыми.

Тем не менее одна большая математическая система умудрилась до сих пор оставаться совершенно бесполезной, найти ей применение можно разве что в качестве гимнастики, стимулирующей ум, а потому она может с честью носить «корону теории». Речь идет о так называемой теории чисел (в смысле, целых чисел) — одном из самых старых и самых мудреных детищ чистой математической мысли.

Это может показаться странным, но теорию чисел можно назвать, с определенной точки зрения, эмпирической или даже экспериментальной наукой. Большая часть ее утверждений была сформулирована на самом деле в результате попыток проделать совсем другие операции с числами, — так же, как законы физики явились результатом попыток проделать другие операции с материальными объектами. И так же, как в физике, некоторые из этих утверждений были доказаны «математически», в то время как другие все еще остаются, по своему происхождению, чисто эмпирическими и по-прежнему будоражат умы лучших математиков.

Возьмем, к примеру, проблему простых чисел, то есть чисел, которые нельзя представить как произведение двух или более меньших сомножителей. 1, 2, 3, 5, 7, 11, 13, 17 и так далее — простые числа, тогда как 12, например, не простое число, так как его можно записать в виде $2 \times 2 \times 3$.

Является ли количество простых чисел бесконечным или же существует некое самое большое простое число, после которого каждое число можно представить как произведение простых чисел, уже имеющихся в нашем распоряжении? Впервые эту проблему штурмовал сам Евклид, который нашел очень простое и одновременно элегантное доказательство, что количество простых чисел выходит за любые пределы, поэтому и не существует такого понятия, как «самое большое простое число».

Чтобы рассмотреть этот вопрос, предположим, что известно лишь ограниченное количество простых чисел и что некое большое число, обозначенное буквой N , представляет собой самое большое простое число из известных. Теперь давайте получим произведение всех простых чисел и добавим к нему 1. Мы можем записать это в таком виде:

$$(1 \times 2 \times 3 \times 5 \times 7 \times 11 \times 13 \times \dots N) + 1.$$

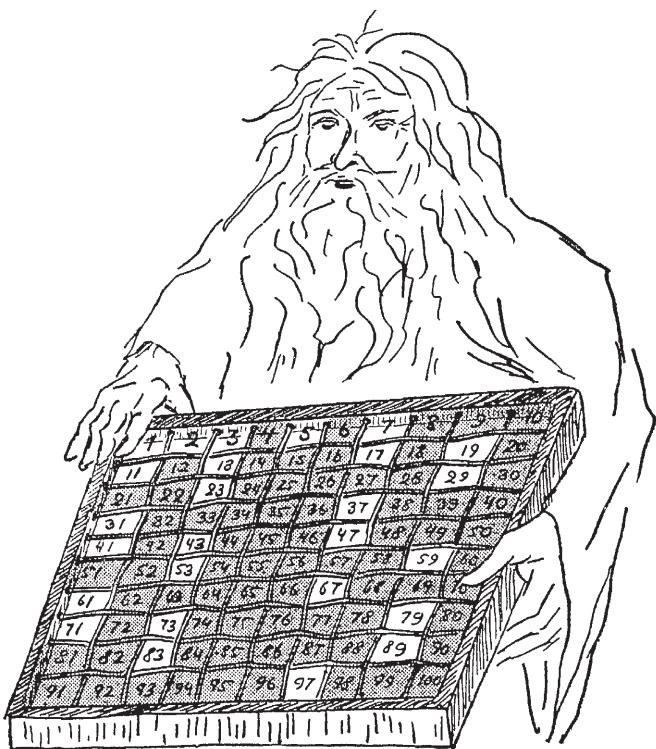


Рис. 9.

Результат, конечно же, намного больше, чем заявленное «самое большое простое число» N . Ясно, однако, что данное число нельзя точно разделить на любое из наших простых чисел (на N включительно), так как по самой его структуре мы видим, что деление на любое из этих простых чисел выйдет с остатком 1.

Следовательно, искомое число должно либо быть простым числом, либо делиться на простое число большее, чем N , оба случая противоречат нашему первоначальному предположению, что N является самым большим из существующих простых чисел.

Доказательство получается в результате *reductio ad absurdum*, или доведения до абсурда, что является одним из излюбленных инструментов математиков.

Как только мы убедились, что количество простых чисел бесконечно, мы можем задаться вопросом, есть ли какой-нибудь легкий способ выстроить их последовательность и ни одного не

пропустить. Впервые такой способ предложил древнегреческий философ и математик Эратосфен, и известен он как «Решето». Все, что вам нужно сделать, — это написать полную последовательность целых чисел: 1, 2, 3, 4 и так далее, а затем вычеркнуть сначала все кратные 2, затем 3, затем 5 и так далее. На рис. 9 показано решето Эратосфена для первой сотни чисел. Оно содержит всего двадцать шесть простых чисел. С использованием вышеупомянутого простого метода «просеивания» были составлены таблицы простых чисел вплоть до одного миллиарда.

Однако было бы гораздо проще, владей мы формулой, с помощью которой могли бы быстро и автоматически находить только простые числа и все простые числа. Но, несмотря на попытки, которые предпринимались на протяжении веков, такой формулы не существует до сих пор. В 1640 году известный французский математик Ферма счел, что составил формулу, которая будет давать только простые числа.

В его формуле $2^n + 1$, n обозначает последовательные значения 1, 2, 3, 4 и так далее.

Используя эту формулу, мы находим:

$$\begin{aligned} 2^2 + 1 &= 5 \\ 2^{2^2} + 1 &= 17 \\ 2^{2^3} + 1 &= 257 \\ 2^{2^4} + 1 &= 65537. \end{aligned}$$

И в самом деле, каждое из этих чисел является простым. Но примерно век спустя после заявления Ферма немецкий математик Эйлер показал, что в пятом расчете Ферма, $2^{2^5} + 1$, результат 4 294 967 297 является не простым числом, а произведением 6 700 417 и 641. В итоге эмпирическое правило Ферма для вычисления простых чисел оказалось неверным.

Есть еще одна замечательная формула, дающая много простых чисел:

$$n^2 - n + 41,$$

в которой n снова равно 1, 2, 3 и так далее. Было показано, что во всех случаях, когда n обозначает число от 1 до 40, применение приведенной выше формулы не дает ничего, кроме простых чисел, но, к сожалению, на сорок первом шаге она терпит неудачу.

В действительности

$$(41)^2 - 41 + 41 = 41^2 = 41 \times 41$$

является не простым, а квадратным числом.

Еще одна формула-неудачница,

$$n^2 - 79n + 1601,$$

использующая n в прежнем качестве, дает простые числа вплоть до 79, но терпит крах на 80!

Таким образом, проблема общей формулы, применение которой давало бы только простые числа, до сих пор не решена.

Другой интересный пример теоремы теории чисел, которая не была ни доказана, ни опровергнута, так называемая гипотеза Гольдбаха, сформулированная в 1742 году; она утверждает, что *каждое четное число можно представить в виде суммы двух простых чисел*. Вы можете легко убедиться, что это верно применительно к некоторым простым примерам, так: $12 = 7 + 5$, $24 = 17 + 7$ и $32 = 29 + 3$. Но, несмотря на огромное количество работы, проделанной в этом направлении, математики так и не сумели ни убедительно доказать непогрешимость этого утверждения, ни найти пример, который бы опроверг его. Сравнительно недавно, в 1931 году, русскому математику Шнирельману посчастливилось сделать первый конструктивный шаг навстречу желаемому доказательству. Он смог показать, что *каждое четное число — это сумма не более чем 300 000 простых чисел*. Еще ближе к нам по времени — значительное сокращение разрыва между «суммой трехсот тысяч простых чисел» Шнирельмана и желаемой «суммой двух простых чисел», которого добился другой русский математик, Виноградов; ему удалось уменьшить этот разрыв до «суммы четырех простых чисел». Но последние два шага от четырех простых чисел Виноградова до двух простых чисел Гольдбаха будут, пожалуй, самыми трудными из всех, и никто не может сказать, сколько лет или несколько веков понадобится еще, чтобы доказать либо опровергнуть эту сложную теорему.

Итак, мы, похоже, по-прежнему далеки от того, чтобы вывести формулу, которая бы автоматически давала все простые числа вплоть до любого желаемого большого числа, и нет даже гарантии, что такая формула когда-либо будет найдена.

В таком случае мы можем поставить более скромный вопрос — вопрос о проценте простых чисел, которые можно найти в преде-

лах данного числового промежутка. Сохраняется ли этот процент примерно постоянным по мере того, как мы движемся к большим и большим числам? И если нет, увеличивается он или уменьшается? Мы можем попытаться ответить на этот вопрос эмпирически — путем подсчета количества простых чисел по таблицам простых чисел. Таким путем мы находим, что есть 26 простых чисел меньше 100, 168 простых чисел меньше 1000, 78 498 простых чисел меньше 1 000 000 и 50 847 478 простых чисел меньше 1 000 000 000. Разделив данные количества простых чисел на соответствующие числовые промежутки, получаем следующую таблицу:

Интервал $1-N$	Количество простых чисел	Относитель- ное количе- ство простых чисел	$\frac{1}{\ln n_N}$	Отклонение от оценки %
1–100	26	0,260	0,217	20
1–1000	168	0,168	0,145	16
$1-10^6$	78498	0,078498	0,072382	8
$1-10^9$	50847478	0,050847478	0,048254942	5

Эта таблица показывает прежде всего, что относительное количество простых чисел постепенно уменьшается по мере увеличения количества всех целых чисел, но не существует предела, за которым нет простых чисел.

Есть ли какой-нибудь нехитрый способ представить математически это уменьшающееся процентное соотношение присутствия простых чисел среди больших чисел? Да, есть, и закон, регулирующий среднее распределение простых чисел представляет собой одно из самых замечательных открытий во всей математике. В нем говорится, что *процент простых чисел в промежутке от 1 до любого большего числа N приблизительно определяется натуральным логарифмом N^* .* И чем больше N , тем точнее приближение.

Обратные величины натуральных логарифмов N вы найдете в 4-м столбце приведенной таблицы. Если сравнить их со значениями из предыдущих столбцов, вы увидите, что соответствие довольно близкое, и чем больше N , тем ближе соответствие.

Как и многие другие утверждения в теории чисел, приведенная выше теорема простых чисел была впервые открыта эмпирически

* Говоря простыми словами, натуральный логарифм — это обычный логарифм из таблицы, умноженный на коэффициент 2,3026.

и в течение очень долгого времени не имела строгого математического доказательства.

Так продолжалось почти до конца предыдущего века¹, именно тогда французскому математику Адамару и бельгийцу де ла Валле Пуссену удалось наконец доказать ее, правда, их метод слишком сложен, чтобы обсуждать его на страницах этой книги.

Обсуждая целые числа, нельзя не упомянуть знаменитую «великую теорему Ферма», которая служит примером класса проблем, не всегда связанных со свойствами простых чисел. Корнями эта проблема уходит в Древний Египет, где каждый хороший плотник знал, что треугольник с тремя сторонами в соотношении 3:4:5 включает один прямой угол. Древние египтяне и в самом деле использовали именно такой треугольник, теперь он известен как «египетский треугольник», или как «угольник плотника»*.

В третьем веке Диофант Александрийский заинтересовался вопросом, являлись ли 3 и 4 двумя единственными целыми числами, сумма квадратов которых равна квадрату третьего. Он смог показать, что есть другие тройки чисел (на самом деле их количество бесконечно), имеющие такое же свойство, и дал общее правило их нахождения. Прямоугольные треугольники, в которых все три стороны измеряются целыми числами, ныне известны как «пифагоровы треугольники», и египетский треугольник — первый из них. Проблему построения пифагоровых треугольников можно выразить с помощью алгебраического уравнения, в котором x , y и z должны быть целыми числами:**

$$x^2 + y^2 = z^2.$$

¹ Речь идет о девятнадцатом веке.

* Теорема Пифагора в школьной геометрии утверждает, что: $3^2 + 4^2 = 5^2$.

** Используя общее правило Диофанта (возьмите такие любые два числа a и b , чтобы $2ab$ было полным квадратом. $x = a + \sqrt{2ab}$, $y = b + \sqrt{2ab}$, $z = a + b + \sqrt{2ab}$). Тогда $x^2 + y^2 = z^2$, что легко проверить с помощью обычной алгебры), можно составить таблицу всех возможных решений, которая начинается с:

$$3^2 + 4^2 = 5^2 \text{ (египетский треугольник)}$$

$$5^2 + 12^2 = 13^2$$

$$6^2 + 8^2 = 10^2$$

$$7^2 + 24^2 = 25^2$$

$$8^2 + 15^2 = 17^2$$

$$9^2 + 12^2 = 15^2$$

$$9^2 + 40^2 = 41^2$$

$$10^2 + 24^2 = 26^2.$$

В 1621 году Пьер Ферма купил в Париже экземпляр книги Диофанта «*Арифметика*» в новом французском переводе; в ней обсуждались пифагоровы треугольники. Когда он прочитал ее, то сделал на полях короткую заметку следующего содержания: в то время как уравнение $x^2 + y^2 = z^2$ имеет бесконечное количество целочисленных решений, *любое уравнение типа*

$$x^n + y^n = z^n,$$

где n больше 2, не имеет решения вообще.

«Я нашел действительно чудесное доказательство этому, — добавил Ферма, — для которого, однако, поле книги слишком узко».

Когда Ферма умер, книгу Диофанта нашли в его библиотеке и содержание заметки на полях стало известно миру. Это было три века назад¹, и с тех самых пор лучшие математики в каждой стране пытались воспроизвести доказательство, которое было на уме у Ферма, когда он писал свою заметку на полях. Но до настоящего времени никаких доказательств так и не было найдено. Правда, в попытках доказать теорему Ферма в направлении конечной цели был достигнут значительный прогресс, а также возникла совершенно новая ветвь математики — так называемая теория идеалов. Эйлер продемонстрировал невозможность целочисленного решения уравнений: $x^3 + y^3 = z^3$ и $x^4 + y^4 = z^4$, Дирихле доказал то же самое для уравнения $x^5 + y^5 = z^5$, кроме того, благодаря совместным усилиям нескольких математиков у нас имеется теперь доказательство, что решение уравнения Ферма невозможно, когда n имеет значение меньше 269. И все же общего доказательства, верного для любых значений показателя n , так и не нашли, и крепнет подозрение, что сам Ферма либо не имел доказательства, либо сделал в нем ошибку. Проблема стала особенно популярна, когда за ее решение был обещан приз в сто тысяч немецких марок, хотя, конечно, все усилия жадных до денег любителей не достигли ничего.

Несомненно, всегда остается вероятность, что теорема неверна и что можно найти пример, в котором сумма двух равных верхних степеней двух целых чисел равна той же самой степени третьего целого числа. Но поскольку в поисках такого примера теперь нужно использовать только показатели больше 269, дело это не из легких.

¹ На сегодняшний день — более трех веков назад.

2. ТАИНСТВЕННЫЙ $\sqrt{-1}$

Давайте теперь займемся чуть более сложной арифметикой. Дважды два — четыре, трижды три — девять, четырежды четыре — шестнадцать и пятью пять — двадцать пять. Отсюда следует, квадратный корень из четырех — два, квадратный корень из девяти — три, квадратный корень из шестнадцати — четыре, а квадратный корень из двадцати пяти — пять*.

Но каким будет квадратный корень из отрицательного числа? Имеют ли какой-нибудь смысл выражения типа $\sqrt{-5}$ и $\sqrt{-1}$?

Если вы попытаетесь понять это на рациональном уровне, то, несомненно, придет к выводу, что приведенные выше выражения не имеют вообще никакого смысла. Процитирую слова математика двенадцатого века брахмана Бхаскары: «Квадрат положительного числа, так же как и отрицательного, положителен. Отсюда, квадратный корень из положительного числа является двойственным — положительным и отрицательным. Не существует квадратного корня из отрицательного числа, так как отрицательное число не является квадратом».

Но математики — люди упрямые, и когда нечего, что, казалось бы, не имеет смысла, продолжает появляться в их формулах, они делают все возможное, чтобы придать этому смысла. А квадратные корни отрицательных чисел упорно продолжают появляться всюду — будь то простые арифметические вопросы, которые занимали математиков прошлого, или проблема унификации пространства и времени в рамках теории относительности в двадцатом веке.

Первым храбрецом, записавшим формулу, которая включала явно бессмысленный квадратный корень из отрицательного числа, был итальянский математик шестнадцатого века Кардано. Обсуждая возможность разбиения числа 10 на две части, произведение которых дало бы 40, он показал, что, хотя эта проблема не имеет рационального решения, можно получить ответ в виде двух невозможных математических выражений:

$$5 + \sqrt{-15} \text{ и } 5 - \sqrt{-15} **.$$

* Квадратные корни многих других чисел находятся также легко. Так, например, $\sqrt{5} = 2,236\dots$ потому что $(2,236\dots) \times (2,236\dots) = 5,000\dots$ и $\sqrt{7,3} = 2,702$, потому что $(2,702\dots) \times (2,702\dots) = 7,300\dots$

** Доказательство следующее: $(5 + \sqrt{-15}) + (5 - \sqrt{-15}) = 5 + 5 = 10$ и $(5 + \sqrt{-15}) \times (5 - \sqrt{-15}) = (5 \times 5) + 5\sqrt{-15} - 5\sqrt{-15} - (\sqrt{-15} \times 5\sqrt{-15}) = (5 \times 5) - (-15) = 25 + 15 = 40$

Кардано написал вышеупомянутые строки с оговоркой, что все это бессмысленно, надуманно и мнимо, — но все же он их написал.

И проблему разбиения числа 10 на две желаемые части решить можно, пусть даже для этого придется дерзнуть и написать квадратные корни из отрицательных чисел, мнимых или нет. Как только лед был сломлен, квадратные корни из отрицательных чисел, или «мнимые числа», как их называли, позаимствовав один из эпитетов Кардано, использовались различными математиками все чаще и чаще, хотя всегда с великими оговорками и надлежащими оправданиями. В книге по алгебре, изданной в 1770 году знаменитым немецким математиком Леонардом Эйлером, мы находим большое количество применений мнимых чисел, снабженное, однако, успокаивающим комментарием: «Все такие выражения, как $\sqrt{-1}$, $\sqrt{-2}$, являются невозможными, или мнимыми, числами, так как они представляют собой корни из отрицательных величин, а о таких числах мы воистину можем утверждать, что они ни ничто, ни больше, чем ничто, ни меньше, чем ничто, и это неотвратимо делает их мнимыми, или невозможными».

Но, несмотря на все дурное обращение и на все оправдания, мнимые числа вскоре стали такими же неизбежными в математике, как дроби или радикалы, и без их применения практически ничего невозможно сделать.

Семейство мнимых чисел представляет собой, так сказать, воображаемое зеркальное отражение обычных, или действительных, чисел, и точно так же, как можно воспроизвести все действительные числа, начиная с основного числа 1, можно выстроить последовательность всех мнимых чисел от основной мнимой единицы $\sqrt{-1}$, которая обычно обозначается символом i .

Легко видеть, что $\sqrt{-9} = \sqrt{9} \times \sqrt{-1} = 3i$; $\sqrt{-7} = \sqrt{7} \cdot \sqrt{-1} = 2,646\dots i$ и тому подобное, так что у каждого обычного действительного числа есть свой мнимый двойник. Также можно объединять действительные и мнимые числа для образования особых выражений, таких как $5 + \sqrt{-15} = 5 + i\sqrt{15}$, как это впервые сделал Кардано. Такие гибридные формы известны как «комплексные числа».

В течение более двух веков после того, как мнимые числа вошли во владения математики, они оставались окутаны завесой тайны и невероятия, пока, наконец, двое математиков-любителей — норвежский землемер по имени Бессель и парижский бух-

галтер Робер Арган — не дали им простую геометрическую интерпретацию.

Согласно их интерпретации, комплексное число, к примеру $3 + 4i$, можно представить так, как это показано на рис. 10, где 3 соответствует расстоянию по горизонтали, а 4 — по вертикали, или по оси ординат.

И в самом деле, все обычные действительные числа (положительные или отрицательные) могут быть представлены как соответствующие точки на горизонтальной оси, в то время как все чисто мнимые числа — как точки на вертикальной оси. Когда мы умножаем действительное число, скажем, 3, представляющее точку на горизонтальной оси, на мнимую единицу i , мы получаем чисто мнимое число $3i$, которое нужно отложить на вертикальной оси. Следовательно, *умножение на i геометрически эквивалентно повороту под прямым углом против часовой стрелки*. (См. рис. 10.)



Рис. 10.

Если теперь мы умножим $3i$ снова на i , мы должны сделать еще один поворот на 90 градусов, чтобы полученная в результате точка вновь оказалась на горизонтальной оси, но находилась теперь на стороне отрицательных чисел. Следовательно,

$$3i \times i = 3i^2 = -3, \text{ или } i^2 = -1.$$

Таким образом, утверждение, что квадрат из i равен -1 , является гораздо более понятным, чем утверждение, что, «совершив поворот дважды под прямым углом (оба поворота — против часовой стрелки), вы окажетесь в прямо противоположном направлении».

Это же правило применимо, безусловно, и к гибридным комплексным числам. Умножив $3 + 4i$ на i , мы получаем:

$$(3 + 4i) i = 3i + 4i^2 = 3i - 4 = -4 + 3i.$$

И как вы можете видеть на рис. 10, точка $-4 + 3i$ соответствует точке $3 + 4i$, которая повернута против часовой стрелки на 90 градусов вокруг начала координат. Аналогично умножение на $-i$ не что иное, как поворот вокруг начала координат по часовой стрелке, что тоже можно видеть на рис. 10.

Если у вас все еще сохраняется ощущение, что мнимые числа окружены таинственностью, то вы, вероятно, сможете рассеять ее, решив простую задачу, в которой они имеют практическое применение.

Один молодой человек, любитель приключений, нашел среди бумаг своего прадеда кусок пергамента, на котором было изображено местонахождение спрятанного сокровища. Инструкция гласила: «Следуй курсом _____ северной широты и _____ западной долготы* и найдешь необитаемый остров. На северном берегу острова простирается безбрежный луг, на котором стоят одинокий дуб и одинокая сосна**. Увидишь там ты и старую виселицу, на которой мы некогда имели обыкновение вешать предателей. Свой путь начинай ты от виселицы и иди к дубу, считая шаги. У дуба поверни под прямым углом *направо* и отсчитай то же число шагов. Отсчитав, вбей колышек в землю. Теперь вернись к виселице и иди к сосне, считая шаги. У сосны поверни под прямым углом *налево*, потрудись отсчитать столько же шагов и вбей в землю другой колышек. Копай на полпути между колышками, там сокровище и лежит».

Инструкция была полностью понятной и точной, поэтому молодой человек зафрахтовал корабль и отплыл в Южные моря. Он нашел остров, поле, дуб и сосну, но, к его великому сожалению, там не оказалось виселицы. С тех пор как инструкция была написана, прошло слишком много времени, дождь, солнце и ветер разрушили дерево и вернули его земле, не оставив и следа от того места, где некогда стояла виселица.

* В инструкции значения долготы и широты приводились, но здесь мы их опустили, чтобы сохранить секрет.

** Названия деревьев также изменены — по той же причине, что и описанная выше. Очевидно, что на тропическом острове сокровищ растут другие виды деревьев.

Молодой авантюрист впал в отчаяние, но потом, в гневном исступлении, начал копать землю наугад по всему полю. Но его усилия оказались напрасны: остров был слишком большим! В итоге он отплыл с пустыми руками. А сокровище, вероятно, все еще там.

Грустная история, но еще грустнее то, что парень мог получить сокровище, зная он хоть что-нибудь о математике, в частности как использовать мнимые числа. Давайте посмотрим, сможем ли мы найти для него сокровище, даже если уже слишком поздно и пользы ему от этого никакой.

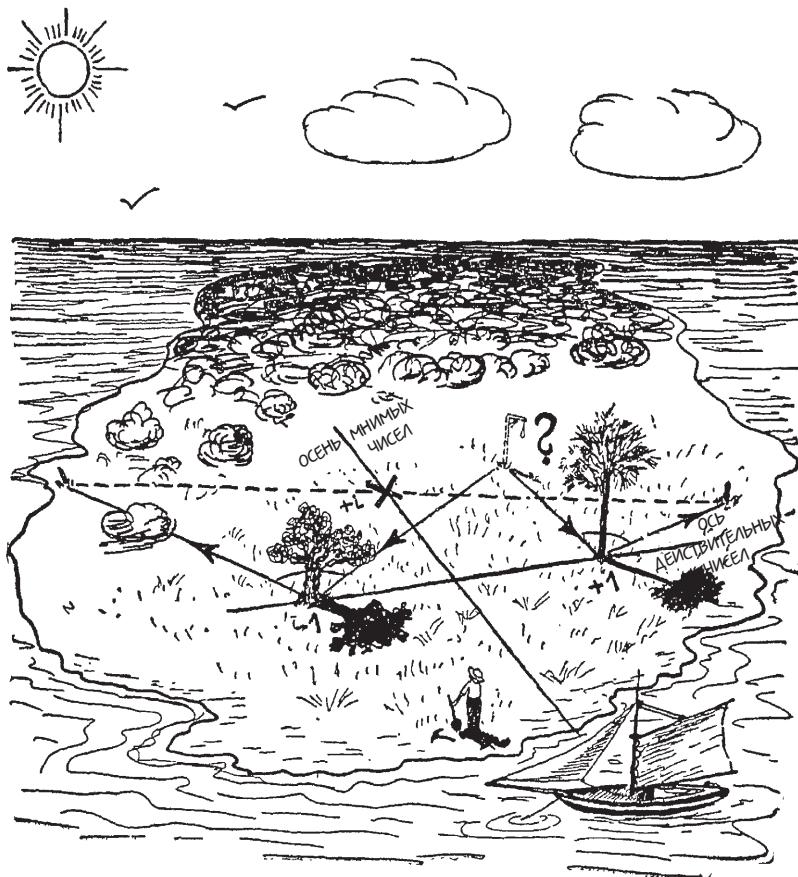


Рис. 11. Охота за сокровищами с помощью мнимых чисел.

Рассмотрим остров как плоскость комплексных чисел; проведем одну ось (действительных чисел) через основания двух деревьев, а другую ось (мнимых чисел) под прямым углом к первой, через точку на полпути между деревьями (рис. 11). Взяв половину расстояния между деревьями за единицу длины, мы можем сказать, что дуб находится в точке -1 на оси действительных чисел, а сосна — в точке $+1$. Мы не знаем, где находилась виселица, поэтому давайте обозначим ее гипотетическое местоположение греческой буквой « Γ » (заглавная «гамма»), которая даже выглядит как виселица. Поскольку виселица необязательно находилась на одной из двух осей, Γ следует рассматривать как комплексное число: $\Gamma = a + bi$, в котором значения a и b становятся понятными, если посмотреть на рис. 11.

Далее, памятуя правила умножения мнимых чисел, приведенные выше, давайте сделаем несколько простых расчетов. Если виселица находится на Γ , а дуб на -1 , расстояние, которое их разделяет, и его направление можно обозначить как $(-1) - \Gamma = -(1 + \Gamma)$. Аналогично расстояние, разделяющее виселицу и сосну, составляет $1 - \Gamma$. Чтобы повернуть эти два расстояния под прямым углом по часовой стрелке (вправо) и против часовой стрелки (лево), мы должны, согласно приведенным выше правилам, умножить их на $-i$ и i , таким образом, места, в которых мы должны поместить два колышка определяются следующим образом:

$$\begin{aligned} \text{первый колышек: } & (-i) [-(1 + \Gamma)] + 1 = i(\Gamma + 1) - 1, \\ \text{второй колышек: } & (+i)(1 - \Gamma) - 1 = i(1 - \Gamma) + 1. \end{aligned}$$

Поскольку сокровище находится на полпути между колышками, теперь мы должны найти половину суммы двух вышеуказанных комплексных чисел. И мы получаем:

$$\begin{aligned} \frac{1}{2}[i(\Gamma + 1) + 1 + i(1 - \Gamma) - 1] &= \frac{1}{2}[+i\Gamma + i + 1 + i - i\Gamma - 1] = \\ &= \frac{1}{2}(+2i) = +i. \end{aligned}$$

В итоге мы видим, что неизвестное положение виселицы, обозначенное Γ , выпало из наших расчетов где-то по пути и что независимо от того, где стояла виселица, сокровище должно находиться в точке $+i$.

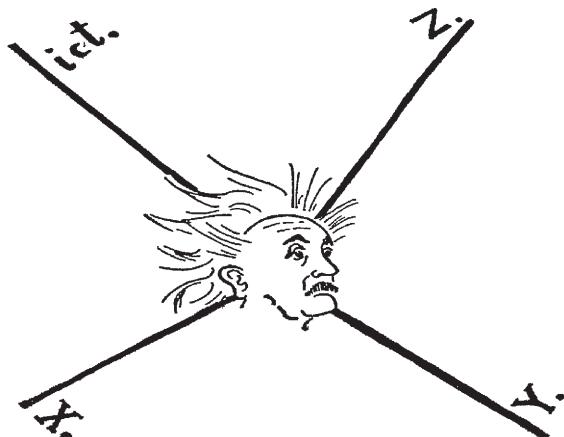
Итак, если бы молодой авантюрист использовал капельку математики, ему не потребовалось бы перекапывать весь остров, он бы искал клад в точке, обозначенной на рис. 11 крестиком, и там бы его и нашел.

Если вы по-прежнему не верите, что нет абсолютно никакой необходимости знать положение виселицы, чтобы найти клад, отметьте на листе бумаги положение двух деревьев и несколько раз попробуйте следовать инструкции из пергамента, беря каждый раз иное положение виселицы. Во всех случаях вы получите одну и ту же точку, соответствующую числу $+i$ на комплексной плоскости!

Еще одним спрятанным сокровищем, найденным с помощью мнимого квадратного корня из -1 , явилось ошеломляющее открытие, что наши обычные трехмерное пространство и время можно объединить в одну четырехмерную картину, подчиняющуюся правилам четырехмерной геометрии. Мы непременно займемся этим открытием в одной из следующих глав, в которой обсудим идеи Альберта Эйнштейна и его теорию относительности.

Часть II

Пространство, время и Эйнштейн



Глава III Необычные свойства пространства

1. ИЗМЕРЕНИЯ И КООРДИНАТЫ

Хотя все мы знаем, что такое пространство, мы бы оказались в весьма неловком положении, если бы нас попросили дать точное определение этому слову. Мы, вероятно, сказали бы, что пространство — это *то*, что нас окружает и в чем мы можем передвигаться вперед или назад, вправо или влево, вверх или вниз. Существование трех независимых, взаимно перпендикулярных направлений представляет собой одно из самых фундаментальных свойств физического пространства, в котором мы живем; мы говорим, что наше пространство является трехнаправленным, или трехмерным. Любое положение в пространстве можно определить, указав эти три направления. Если мы находимся в незнакомом городе и спрашиваем в гостинице у служащего за стойкой регистрации, как найти офис одной хорошо известной фирмы, он может ответить: «Пройдите пять кварталов на юг, два квартала направо и поднимитесь до седьмого этажа». Три приведенных числа обычно называют координатами, и в данном случае они относятся к взаимосвязи между

улицами города, этажами здания и пунктом отправления из лобби гостиницы. Ясно, однако, что направления к тому же местоположению можно дать из любой другой точки, используя систему координат, которая верно отражает взаимосвязь между новым пунктом отправления и пунктом назначения, и что новые координаты можно выразить с помощью старых, прибегнув к простой математической процедуре, при условии, что мы знаем положение новой системы координат относительно старой. Этот процесс известен как *преобразование координат*. Можно еще добавить, что вовсе необязательно, чтобы все три координаты выражались числами, представляющими определенные направления, собственно, в некоторых случаях удобнее использовать угловые координаты.

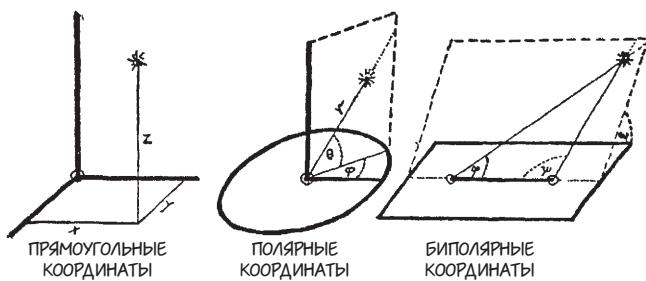


Рис. 12.

Так, например, местоположения в Нью-Йорке описываются наиболее естественно с помощью *прямоугольной* системы координат, представленной соответствующим расположением улиц и проспектов, тогда как система местоположений Москвы (Россия) наверняка бы выиграла, превратившись в *полярную* систему координат. Этот старый город вырос вокруг центральной крепости Кремля, улицы и несколько бульваров расходятся от него радиально, концентрическими кругами, поэтому естественнее было бы говорить о доме, расположенном, скажем, в двадцати кварталах к северо-северо-западу от Кремлевской стены.

Другой классический пример прямоугольной и полярной системы координат представлен зданиями Министерства военно-морских сил и Военного министерства¹ Пентагона в Вашингтоне,

¹ Существовало с 1789 по 1947 год. В 1947 году преобразовано в Национальное военное ведомство, а в 1949 году — в Министерство обороны.

округ Колумбия, которые знакомы всем, кто были связаны с работами для фронта во время Второй мировой войны.

На рис. 12 мы приводим несколько примеров, показывающих, как по-разному можно описать положение точки в пространстве с помощью трех координат, одни из которых — расстояния, а другие — углы. Но какую бы систему мы ни выбрали, нам всегда будут нужны *три* величины, так как мы имеем дело с трехмерным пространством.

Несмотря на то что нам с нашей трехмерной концепцией пространства трудно и представить сверхпространства, в которых имеется более трех измерений (хотя, как мы увидим позже, такие пространства существуют), подпространство с количеством измерений меньшим, чем три, нам вообразить легко. Плоскость, поверхность сферы да, по сути, любая другая поверхность является двумерным подпространством, так как положение точки на поверхности всегда можно описать всего двумя числа. Точно так же линия (прямая или кривая) является одномерным подпространством, и для описания положения на ней требуется лишь одно число. Можно также сказать, что точка является подпространством с нулевыми измерениями, так как в пределах точки нет различных местоположений. Но кому вообще интересны точки!

Мы трехмерные существа, и нам гораздо легче понять геометрические свойства линий и поверхностей, на которые мы можем посмотреть «извне», чем аналогичные свойства трехмерного пространства, частью которого сами являемся. Это объясняет, почему — хотя у вас нет трудностей с пониманием, что означает «кривая линия» или «кривая поверхность», — вас тем не менее может озадачить утверждение, что трехмерное пространство также может быть кривым.

Однако немного поупражнявшись на практике и осознав, что действительно означает слово «кривизна», вы найдете понятие «кривизны трехмерного пространства» очень простым и, по мере продвижения к концу следующей главы, станете уже с легкостью говорить (мы надеемся!) о том, что на первый взгляд может показаться вообще кошмарным понятием, — о «кривом четырехмерном пространстве».

Но прежде чем мы перейдем к этому, давайте потренируем ум, освоив некоторые факты об обычном трехмерном пространстве, двумерных поверхностях и одномерных линиях.

2. ГЕОМЕТРИЯ БЕЗ ИЗМЕРЕНИЙ

Хотя геометрия, то есть наука о пространственных измерениях*, с которой вы познакомились в школьные годы, и состоит, по вашим воспоминаниям, в основном из большого количества теорем о числовых соотношениях между различными расстояниями и углами (как, например, знаменитая теорема Пифагора о прямоугольном треугольнике), — большое количество самых фундаментальных свойств пространства вообще не требуют никаких измерений длины или угла. Связанная с этими вопросами ветвь геометрии, известная как *analysis situs*, или *топология***, — один из самых волнующих и самых трудных разделов математики.

Давайте рассмотрим в качестве примера типичной топологической проблемы замкнутую геометрическую поверхность, скажем, сферу, разделенную сетью линий на множество отдельных частей. Мы можем подготовить такую фигуру, нанеся на поверхность сферы произвольное количество точек и соединив их непересекающимися линиями. Какие существуют отношения между количеством исходных точек, количеством линий, представляющих границы между соседними частями, и количеством самих частей?

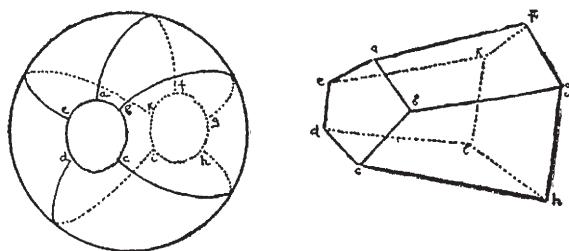


Рис. 13.
Сфера, разделенная на части
и трансформированная в многогранник.

* Название геометрии происходит от двух греческих слов: *ge* — «земля» (как «почва») и *metrein* — «измеряю». Видимо, в то время, когда слово формировалось, на интерес древних греков к предмету влиял их интерес к недвижимости.

** Что означает, в переводе с латинского и греческого, соответственно, изучение местоположений.

Прежде всего, совершенно ясно, что, если бы вместо сферы мы взяли сфероид сплюснутый, как тыква, или тело, вытянутое, как огурец, количество точек, линий и частей было бы точно таким же, как и на идеальной сфере. Собственно, мы можем взять любую замкнутую поверхность, которая получается, если деформировать резиновый шар, растягивая его, сжимая и делая с ним все что душе угодно (нельзя только резать и рвать), — и ни формульное выражение, ни ответ на наш вопрос не изменится ни в малейшей степени. Этот факт резко противоречит фактам обычных числовых соотношений в геометрии (таких как соотношения, которые существуют между линейными размерами, площадями поверхностей и объемами геометрических тел). Такие соотношения действительно значительно исказились бы, если бы мы растянули куб до параллелепипеда или сжали сферу до блина.

Одна из трансформаций, которой мы можем подвергнуть сферу, разделенную на некоторое количество отдельных частей, — это выровнять каждую часть так, чтобы сфера стала многогранником; в этом случае линии, ограничивающие разные части, становятся ребрами многогранника, а исходное множество точек — его вершинами.

Теперь мы можем переформулировать предыдущую проблему, не меняя каким-либо образом ее смысл, в вопрос, касающийся соотношения между количеством вершин, ребер и граней в многограннике произвольного типа.

На рис. 14 мы показываем пять правильных многогранников, то есть таких, у которых все грани имеют одинаковое количество сторон и вершин, и один неправильный — плод воображения.

В каждом из этих геометрических тел мы можем посчитать количество вершин, количество ребер и количество граней. Каково соотношение между этими тремя числами, если таковое вообще имеется?

Простой подсчет вершин, ребер и граней позволяет нам, для удобства сопоставления, составить таблицу.

Название	V	E	F	V + F	E + 2
	количество вершин	количество ребер	количество граней		
Тетраэдр (пирамида)	4	6	4	8	8
Гексаэдр (куб)	8	12	6	14	14
Октаэдр	6	12	8	14	14

Название	V	E	F	V + F	E + 2
	количество вершин	количество ребер	количество граней		
Икосаэдр	12	30	20	32	32
Додекаэдр, или Пентагон-додекаэдр	20	30	12	32	32
«Уродец»	21	45	26	47	47

Сначала может показаться, что цифры, приведенные в трех столбцах (под V , E и F), не демонстрируют какой-либо определенной корреляции, но после непродолжительного изучения вы обнаружите, что сумма цифр в столбцах V и F всегда превышает значение в столбце E на два. Таким образом, мы можем записать математическое соотношение:

$$V + F = E + 2.$$

Свойственно ли это соотношение только пяти конкретным многогранникам, показанным на рис. 14, или оно также верно для любого многогранника? Если вы нарисуете несколько других многогранников, отличных от тех, что изображены на рис. 14, и подсчитаете их вершины, ребра и грани, вы обнаружите, что вышеуказанное соотношение имеет место в каждом случае. Видимо, тогда $V + F = E + 2$ — общая математическая теорема топологического характера, так как выражение соотношения не зависит от измерения длин ребер или площадей граней, а касается лишь имеющегося количества различных геометрических единиц (то есть вершин, ребер, граней).

Соотношение между количеством вершин, ребер и граней многогранника, которое мы только что нашли, впервые заметил знаменитый французский математик семнадцатого века Рене Декарт, а позднее другой гениальный математик, Леонард Эйлер, дал его строгое доказательство, которое носит теперь его имя.

Для демонстрации того, как подобное делается, приведем полное доказательство теоремы Эйлера, взятое из книги Р. Куранта и Г. Роббинса «Что такое математика?»*.

* Автор благодарит докторов Куранта и Роббинса и издательство Оксфордского университета за разрешение воспроизвести нижеследующий отрывок. Те читатели, которые заинтересовались проблемами топологии, увлеченные несколькими приведенными здесь примерами, найдут более

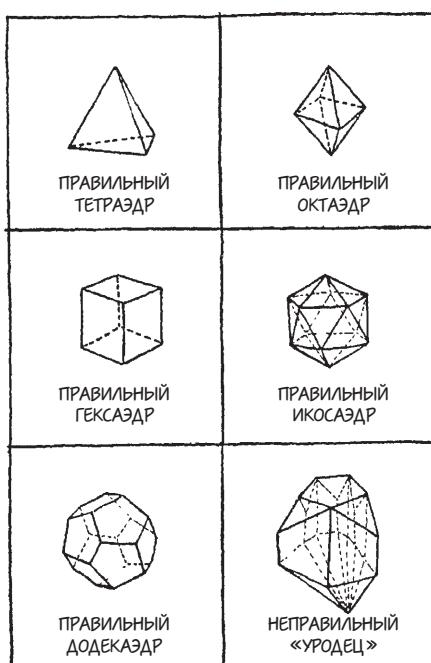


Рис. 14. Пять правильных многогранников (единственно возможных) и один неправильный «Уродец».

«Для доказательства формулы Эйлера давайте представим, что данный простой многогранник — полый, а поверхность его — из тонкой резины [рис. 15 a]. Если мы вырежем одну из граней полого многогранника, то тогда сможем деформировать, растягивая, оставшуюся поверхность до тех пор, пока она не станет полностью плоской [рис. 15 b]. Конечно, в процессе наших действий площади граней и углы между ребрами многогранника изменятся. Но плоская сетка вершин и ребер будет содержать то же самое количество вершин и ребер, что и исходный многогранник, а количество многоугольников будет на один меньше, чем в исходном многограннике, так как одну грань мы удалили. Мы покажем, что для плоской сетки $V - E + F = 1$, а следовательно, для исходного многогранника, если считать удаленную грань, $V - E + F = 2$.

подробное описание предмета в книге «Что такое математика?». [Рус. изд.: Р. Курант, Г. Роббинс. Что такое математика? — 3-е изд., испр. и доп. М.: МЦНМО, 2001. — 568 с.]

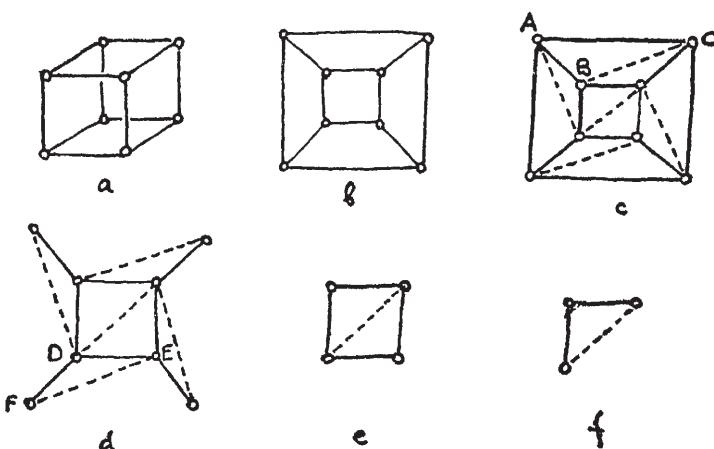


Рис. 15. Доказательство теоремы Эйлера. Рис. сделан для куба, но будь это любой другой многогранник, результат оказался бы таким же.

Сначала «триангулируем» плоскую сетку следующим образом. В каком-нибудь многоугольнике сетки, который не является треугольником, проведем диагональ. В результате значения E и F увеличатся на 1, тем самым сохранив неизменным значение выражения $V - E + F$. Продолжим проводить диагонали, соединяя пары точек, пока сетка в итоге не будет состоять из одних лишь треугольников [рис. 15с]. В «триангулированной» сетке величина $V - E + F$ имеет то же значение, какое она имела и до разделения на треугольники, так как проведение диагоналей этого значения не изменило.

У некоторых треугольников ребра одновременно являются границами сетки. Среди них есть такие, как, например, ABC , у которых имеется лишь одно ребро-граница, и другие — у которых по два ребра-границы. Возьмем один из таких «пограничных» треугольников и удалим ту его часть, которая не принадлежит какому-нибудь другому треугольнику. Так, из треугольника ABC удалим ребро AC и собственно грань, оставляя вершины A , B , C и ребра AB и BC , а в треугольнике DEF удалим грань, два ребра DF и FE и вершину F .

Удаление треугольника типа ABC уменьшает значения E и F на 1, а значение V остается неизменным, так что значение $V - E + F$ также не меняется. Удаление треугольника типа DEF уменьшает значение V на 1, E — на 2 и F — на 1, так что значение $V - E + F$

опять не меняется. Избрав верную последовательность операций, мы можем удалять один за другим все «пограничные» треугольники (граница будет меняться с каждым удаленным треугольником), пока, наконец, не останется единственный треугольник — с тремя ребрами, тремя вершинами и одной гранью. Для такой простой сетки $V - E + F = 3 - 3 + 1 = 1$. Но мы видели, что постоянное удаление из сетки треугольников не меняло значение $V - E + F$. Следовательно, в исходной плоской сетке значение $V - E + F$ также должно было равняться 1, и то же самое верно и для многогранника с удаленной гранью. Мы приходим к заключению, что для целого (до удаления грани) многогранника значение $V - E + F = 2$. Это и завершает доказательство теоремы Эйлера».

Интересным следствием выведения формулы Эйлера является доказательство того, что *существует всего пять правильных многогранников, которые как раз и изображены на рис. 14*.

Просмотрев внимательно материал, который обсуждался на нескольких последних страницах, вы, возможно, заметите, что при создании чертежей многогранников «всех видов», изображенных на рис. 14, так же как и в ходе математических рассуждений, ведущих к доказательству теоремы Эйлера, мы руководствовались одним неявным предположением, которое в результате существенно уменьшило наш выбор. Мы ограничились только многогранниками, в которых, так сказать, *нет сквозных дыр*; когда мы говорим о дырах, то имеем в виду не что-то вроде рваной дыры, проделанной в надувном шарике, а, скорее, нечто похожее на отверстие в пончике или в закрытой полости резиновой камеры автомобильной шины.

Взгляните на рис. 16, и ситуация прояснится. Мы видим два разных геометрических тела, каждое из которых является многогранником ничуть не меньше, чем любое из тел, изображенных на рис. 14.

Давайте теперь посмотрим, применима ли теорема Эйлера к этим новым многогранникам.

В первом случае подсчет дает нам всего 16 вершин, 32 ребра и 16 граней, поэтому $V + F = 32$, тогда как $E + 2 = 34$. Во втором случае у нас есть 28 вершин, 46 ребер и 30 граней, так что $V + F = 58$, тогда как $E + 2 = 48$. Опять неверно!

Почему так, какова причина того, что общее доказательство теоремы Эйлера, приведенное выше, не выполняется в этих случаях?

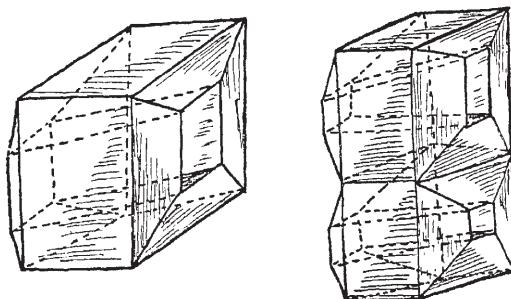


Рис. 16. Две противоположные грани обычного куба с одним и двумя сквозными отверстиями. Не все их грани — прямоугольники, но, как мы уже видели, в топологии это не имеет значения.

Проблема, конечно же, в том, что, в то время как все типы многогранников, рассмотренные выше, можно отнести к камере футбольного мяча или к надувному шарику, полые многогранники нового типа больше похожи на камеру автомобильной шины или на еще более сложные изделия резиновой промышленности. К таким многогранникам, как эти последние, вышеупомянутое математическое доказательство применить нельзя, потому что с телами такого типа мы не можем выполнить все операции, необходимые для доказательства. Нас ведь просили: «Вырезать одну из граней полого многогранника и деформировать, растягивая и сплющивая, оставшуюся поверхность, пока она не станет полностью плоской».

Если вы возьмете камеру футбольного мяча и вырежете ножницами часть ее поверхности, вам не составит труда выполнить это требование.

Но вы не сможете, как бы ни старались, проделать то же самое с тем же успехом с камерой автомобильной шины. Если рис. 16 не убедит вас, достаньте старую камеру и попробуйте осуществить это на практике!

Вы не должны думать, однако, что для многогранников более сложного типа не существует соотношения между V , E и F , — существует, но это другое соотношение.

Для пончикообразного многогранника, или, если говорить научным языком, для тора¹, $V + F = E$, тогда как для «кренделя» мы получаем $V + F = E - 2$. В общем, $V + F = E + 2 - 2N$, где N — количество отверстий.

¹ Или тороида.

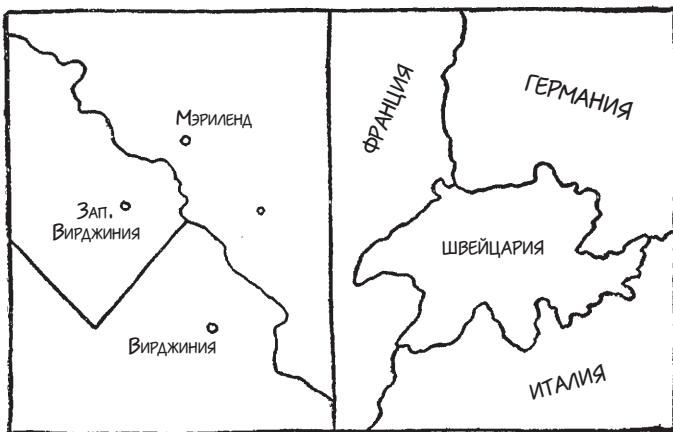


Рис. 17. Топологические карты Мэриленда, Вирджинии и Западной Вирджинии (слева) и Швейцарии, Франции, Германии и Италии (справа).

Другая типичная топологическая проблема, тесно связанная с теоремой Эйлера, — это так называемая проблема четырех цветов. Предположим, у нас есть поверхность сферы, разделенная на некое количество отдельных частей, и нас просят раскрасить эти части таким образом, чтобы две соседние (то есть те, которые имеют общую границу) не были одного и того же цвета. Каково наименьшее количество разных цветов, которое необходимо для выполнения такой задачи? Ясно, что лишь двух цветов не хватит, поскольку, когда три границы сходятся в одной точке (как, например, границы Вирджинии, Западной Вирджинии и Мэриленда на карте Соединенных Штатов, рис. 17), нам понадобятся разные цвета для всех трех штатов.

Нетрудно также найти пример (Швейцария после аншлюса Австрии Германией), где необходимы четыре цвета (рис. 17)*.

Но, как ни старайтесь, вы никогда не сможете создать воображаемую карту — ни на глобусе, ни на листе бумаги**, — для

* До аншлюса хватило бы и трех цветов: Швейцария — зеленый, Франция и Австрия — красный, Германия и Италия — желтый.

** Плоская карта и глобус — одно и то же с точки зрения проблемы раскраски, поскольку, решив проблему для глобуса, мы всегда можем сделать маленькую дырочку в одной из раскрашенных частей и выровнять получившуюся поверхность на плоскости. И снова — типичная топологическая трансформация.

которой потребуется более четырех цветов. Похоже, что, независимо от сложности карты, четырех цветов всегда будет достаточно, чтобы не перепутать граничащие друг с другом государства.

Итак, если это последнее утверждение верно, оно доказуемо математически, но, несмотря на усилия поколений и поколений математиков, доказательства до сих пор нет. Вот вам типичный случай математического утверждения, в котором практически никто не сомневается, но доказать его так никто и не смог. Лучшее, что было сделано математически, так это доказано, что всегда достаточно пяти цветов. Это доказательство основано на соотношении Эйлера, которое применили к количеству стран, количеству их границ и количеству тройных, четверных и так далее точек, в которых встречаются несколько стран.

Мы не приводим это доказательство, так как оно довольно сложное и уведет нас прочь от основного предмета обсуждения, но читатель может найти его в книгах по топологии и приятно провести вечер (и, возможно, бессонную ночь), размышляя над ним. Он также может попытаться найти доказательство того, что не только пяти, но даже и четырех цветов достаточно, чтобы раскрасить любую карту, или, если он подвергает сомнению обоснованность этого утверждения, то может нарисовать карту, для которой четырех цветов окажется недостаточно. В случае успеха в любой из двух попыток его имя будетувековечено в анналах теоретической математики.

Достаточно иронично, но проблему раскраски, решение которой для глобуса или плоской карты столь успешно ускользает, можно сравнительно просто решить для более сложных поверхностей, таких как у пончика или кренделя. Например, было неопровергимо доказано, что семи разных цветов достаточно, чтобы раскрасить любую возможную комбинацию частей пончика, избегая одного и того же цвета в двух смежных частях, и были приведены примеры, в которых оказались необходимы все семь цветов.

Если читатель хочет еще больше головной боли, он может раздобыть накачанную камеру автомобильной шины и набор из семи разных красок и попробовать раскрасить поверхность камеры таким образом, чтобы каждая часть соприкасалась с шестью другими частями, отличающимися по цвету как от нее, так и друг от друга. Сделав это, он с полным правом сможет сказать, что «знает пончик как свои пять пальцев».

3. ВЫВОРАЧИВАЯ ПРОСТРАНСТВО НА ИЗНАНКУ

До сих пор мы обсуждали топологические свойства только поверхностей, то есть подпространств двух измерений, но ясно, что аналогичные вопросы можно задать также и в отношении трехмерного пространства, в котором мы сами живем. В соответствии с этим, обобщение проблемы раскраски карты для трех измерений можно сформулировать как-нибудь так: нас попросили сложить пространственную мозаику, используя множество фрагментов разнообразных форм и из различных материалов, и сделать это так, чтобы никакие две части, сделанные из одного и того же материала, нигде не соприкасались на общей поверхности. Сколько различных материалов необходимо?

Какова трехмерная аналогия проблемы раскраски поверхности сферы или тора? Можно ли представить некие необычные трехмерные пространства, которые состоят в тех же отношениях с нашим обычным пространством, что и поверхности сферы или тора с обычной плоской поверхностью? С первого взгляда вопрос выглядит бессмысленным. Собственно, в то время как мы с легкостью можем представить поверхности различной формы, мы склонны полагать, что существует лишь один тип трехмерного пространства, а именно знакомое физическое пространство, в котором мы живем. Но такое мнение представляет собой опасное заблуждение. Если мы немного подтолкнем наше воображение, то сможем представить трехмерные пространства, которые изрядно отличаются от тех, что мы изучали в учебниках по евклидовой геометрии.

Нам трудно представить себе такие странные пространства, главным образом, потому, что, будучи сами трехмерными существами, мы вынуждены смотреть на пространство, так сказать, «изнутри», а не «снаружи», как смотрим на различные диковинные поверхности. Но, немного потренировав ум, мы покорим без особых проблем и другие странные измерения.

Давайте сначала попробуем построить модель трехмерного пространства, которая имела бы свойства, аналогичные свойствам поверхности сферы.

Основной особенностью сферической поверхности является, безусловно, то, что, хотя у нее нет границ, она тем не менее имеет конечную площадь: эта поверхность делает полный оборот и замыкается сама на себя. Можем ли мы представить трехмерное пространство, которое замыкается само на себя подобным же

образом и обладает поэтому конечным объемом, не имея притом отчетливых границ? Представьте два сферических тела, каждое из которых ограничено сферической поверхностью, как мякоть яблока ограничена кожурой.

Представьте теперь, что эти два сферических тела прошли «друг сквозь друга» и соединились под одной внешней поверхностью. Мы не пытаемся сказать вам, конечно же, что можно взять два физических тела, таких как упомянутые два яблока, и вдавить их друг в друга так, чтобы их кожура склеилась вместе. Яблоки были бы раздавлены, но никогда бы не проникли друг в друга.

Скорее следует представить яблоко с запутанной системой каналов, выеденных червями. Должно быть два вида червей, скажем, белый и черный, которые недолюбливают друг друга и никогда не соединяют принадлежащие им каналы внутри яблока, хотя и могут начать их прокладку, стартовав в соседних точках на поверхности. Яблоко, атакованное этими двумя видами червей, будет выглядеть в итоге как нечто похожее на рис. 18 — двойная сеть каналов, тесно переплетенных и заполняющих все внутреннее пространство яблока. Но, хотя «белые» и «черные» каналы проходят очень близко друг от друга, единственный способ попасть из одной половины лабиринта в другую — это выйти на поверхность. Если представить, что каналы становятся все тоньше, а их количество все больше, вы, в конце концов, придете к образу пространства внутри яблока, которое образовано наложением двух независимых пространств, связанных лишь общей поверхностью.



Рис. 18.

Если вы не любите червей, то можете представить две системы закрытых коридоров и лестниц, которые могли быть построены, например, внутри гигантской сферы на последней Всемирной выставке в Нью-Йорке.

Предполагается, что каждая система лестниц проходит через весь объем сферы, но, чтобы попасть из одной точки первой системы в соседнюю точку второй системы, нужно пройти весь путь до поверхности сферы, где находятся входы в обе системы, а затем, войдя во вторую систему, проделать такой же путь в обратном направлении. Мы говорим, что две сферы накладываются друг на друга, но не проникают друг в друга, и ваш приятель, например, может быть очень близко от вас, вот только чтобы увидеть его и пожать ему руку, вам придется дать большой крюк! Важно отметить, что точки соединения двух лестничных систем в действительности не отличаются от любой другой точки в пределах сферы, так как всегда есть возможность деформировать всю структуру так, что точки соединения будут втянуты внутрь, а точки, которые ранее находились внутри, выйдут на поверхность. Вторым важным моментом в нашей модели является то, что, хотя общая суммарная длина каналов конечна, в ней нет «тупиков». Вы можете продвигаться по коридорам и лестницам все дальше и дальше, без остановки, не встречая на своем пути ни стен, ни ограждений, и, если вы зайдете достаточно далеко, вы неизбежно окажетесь там, откуда начали. Глядя на всю структуру *снаружи* можно сказать, что человек, движущийся по лабиринту, в конечном итоге вернется к месту, откуда начал движение, просто потому, что коридоры постепенно поворачивают, но для людей, которые находятся *внутри* и даже не знают, что такое понятие, как «снаружи» существует, пространство кажется *конечным и одновременно без каких-либо явных границ*. Как мы увидим в одной из следующих глав, «замкнутое само на себя пространство трех измерений», которое не имеет видимых границ и все же совсем не бесконечное, признали весьма полезным при обсуждении свойств Вселенной в целом. На самом деле наблюдения, проводившиеся настолько далеко, насколько хватало мощностей телескопов, свидетельствуют, похоже, о том, что на гигантских расстояниях пространство начинает искривляться, обнаруживая ярко выраженную тенденцию вернуться и замкнуться само на себя так же, как каналы в примере с яблоком, изъеденным червями. Но, прежде чем перейдем к этим захватываю-

щим проблемам, мы должны изучить немного глубже другие свойства пространства.

Однако мы еще не закончили с яблоками и червями, и следующий вопрос, которым задаемся: возможно ли превратить изъеденное червями яблоко в пончик? О нет, мы не хотим заставить его стать пончиком на вкус — просто выглядеть как пончик. Мы обсуждаем геометрию, а не искусство приготовления пищи. Давайте возьмем двойное яблоко, такое какое обсуждалось выше, то есть два свежих яблока, «вложенных друг в друга» и «склеенных вместе» поверхностями. Предположим, что червь выел в одном из яблок широкий круговой канал, как показано на рис. 19. Обратите внимание, в *одном* из яблок у нас есть лишь мякоть, которую червь не съел. В то время как снаружи канала каждая точка является двойной, принадлежащей обоим яблокам. Теперь у «двойного яблока» имеется свободная поверхность, образованная внутренними стенками канала (рис. 19a).

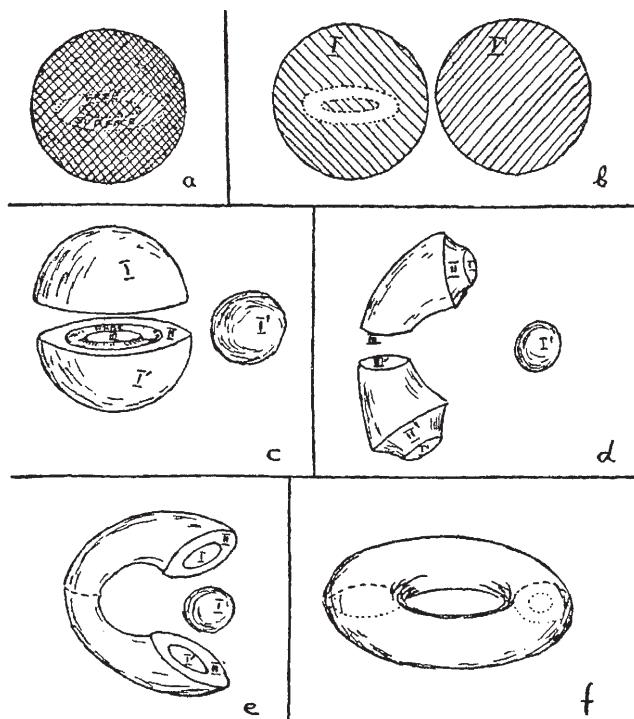


Рис. 19. Как превратить двойное яблоко, изъеденное червем, в целый пончик. Никакой магии, просто топология!

Можете ли вы изменить форму этого испорченного яблока так, чтобы превратить его в пончик? Предполагается, конечно, что мякоть яблока весьма пластична, так что можно придать ей форму, какую душе угодно, единственное условие — не рвать ее. Для облегчения операции мы можем мякоть яблока разрезать, при условии, что после завершения требуемой деформации снова склеим ее.

Мы начинаем операцию с освобождения обеих частей, образующих «двойное яблоко», от «кожуры» и отделения их друг от друга (рис. 19b). Обозначим две «отделенные» друг от друга поверхности цифрами I и I', чтобы отслеживать их в последующих операциях и чтобы потом, перед тем как закончим, мы могли снова склеить их. Теперь разрежем часть, содержащую выеденный червем канал, пополам так, чтобы и сам канал был разрезан пополам (рис. 19c). Эта операция дает нам две новые поверхности, которые мы отметим II, II' и III, III' — чтобы знать, где именно скреплять их вместе потом. Операция также обнажает свободные поверхности канала, из которых будет образована свободная поверхность пончика. Далее, возьмем отрезанные части и растянем их так, как показано на рис. 19d. Свободная поверхность оказывается изрядно растянутой (но, согласно нашему предположению, используемый материал прекрасно растягивается!). В то же время отрезанные поверхности I, II и III уменьшились в размерах. Поработав над первой половиной «двойного яблока», мы также должны уменьшить и вторую половину — и мы сжимаем ее до размера вишни. Теперь мы готовы вновь склеить части в местах разрезов, которые сделали. Сначала, и это легко, соединим поверхности III, III' и получаем таким образом форму, показанную на рис. 19e. Затем поместим сжатую до «вишни» половину яблока между двумя образовавшимися концами, похожими на клемши, и сведем их вместе. Поверхность шара, помеченная I', приклеивается к поверхности I, от которой она была отсоединенна вначале, а отрезанные поверхности II и II' смыкаются. Так мы и получаем пончик — легко и просто.

Какой смысл во всем этом?

Вообще никакого, кроме того, чтобы дать вам упражнение из воображаемой геометрии, формы умственной гимнастики, которая подготовит вас к пониманию таких необычных вещей, как кривое пространство и пространство замкнутое само на себя.

Если вы хотите расширить рамки воображения еще немного — вот вам «практическое применение» процедуры, описанной выше.

Ваше тело также имеет форму пончика, хотя вы, вероятно, никогда не задумывались об этом. Собственно, на самом раннем этапе своего развития (эмбриональный период) каждый живой организм проходит стадию, известную как «гастрula», в которой он обладает сферической формой с широким каналом, проходящим в ней. Через один конец поступает еда, через другой выходит то, что осталось от еды после ее усвоения. В полностью развитых организмах внутренний канал становится гораздо более тонким и гораздо более сложным, но принцип остается прежним: все геометрические свойства пончика остаются неизменными.

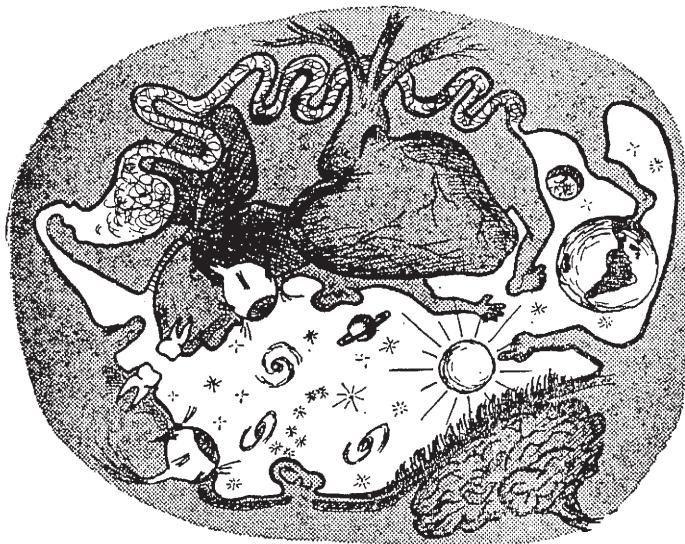


Рис. 20. Вселенная наизнанку. Этот сюрреалистический рисунок представляет человека, гуляющего по поверхности Земли и глядящего на звезды. Изображение трансформировано топологическим методом, который иллюстрирует рис. 19. В соответствии с этим методом Земля, Солнце и звезды втиснуты в сравнительно узкий канал, проходящий через тело человека и окруженный его внутренними органами.

Итак, поскольку вы пончик, попробуйте выполнить трансформацию обратную той, что показана на рис. 19, — попытайтесь трансформировать ваше тело (мысленно, конечно!) в двойное яблоко с каналом внутри. В частности, вы обнаружите, что, в то

время как разные части вашего тела, местами перекрывая друг друга, примут форму «двойного яблока», вся Вселенная, включая Землю, Луну, Солнце и звезды, будет тесниться во внутреннем круговом канале!

Попробуйте нарисовать, как это будет выглядеть, и, если у вас хорошо получится, сам Сальвадор Дали признает за вами превосходство в искусстве сюрреалистической живописи! (Рис. 20.)

Мы не можем завершить эту часть повествования, какой бы длинной она ни оказалась в итоге, без небольшого обсуждения право- и левосторонних тел и их родства с общими свойствами пространства. Наиболее удобный способ поднять эту проблему — обратиться к паре перчаток. Если вы сравните две перчатки из пары (рис. 21), вы найдете их идентичными по всем параметрам, но, тем не менее, есть и большое отличие: вы не можете надеть левую перчатку на правую руку и наоборот. Крутите и вертите их сколько угодно, но правая перчатка останется правой, а левая — левой. Ту же разницу между право- и левосторонними объектами можно заметить в конструкции туфель и рулевого механизма автомобилей (американских и британских марок), в клюшках для гольфа и многих других вещах.

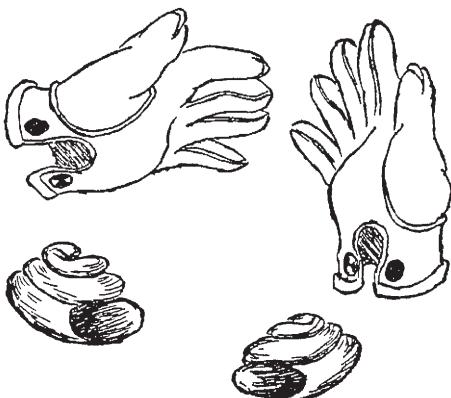


Рис. 21. Право- и левосторонние объекты кажутся полностью одинаковыми, но на самом деле они совершенно разные.

С другой стороны, такие вещи, как мужские шляпы, теннисные ракетки и многие другие объекты, не обнаруживают подобных различий; никто не глуп настолько, чтобы заказать в магазине

десятка чашек для левшей, и кто-то явно дурачится, если просит вас одолжить у соседа левосторонний гаечный ключ. Какова же разница между двумя типами этих объектов? Если вы немного подумаете, то обратите внимание на то, что такие предметы, как шляпы или чашки, обладают тем, что мы называем плоскостью симметрии, то есть плоскостью, вдоль которой их можно разрезать на две одинаковые половины. Но никакой подобной плоскости симметрии не существует у перчаток или туфель, и, сколько ни пытайтесь, вы не сможете разрезать перчатку на две одинаковые части. Если объект не обладает плоскостью симметрии и является, как мы говорим, асимметричным, он относится к одной из двух разновидностей — правосторонней или левосторонней. Эта разница встречается не только у рукотворных объектов, таких как перчатки или клюшки для гольфа, но также очень часто и в природе. Например, есть два вида улиток, которые одинаковы во всех отношениях и отличаются лишь тем, как строят свой дом: у одного вида раковина закручена в спираль по часовой стрелке, тогда как у другого — против часовой стрелки. Даже так называемые молекулы, крошечные частицы, из которых строится вся материя, часто обладают право- и левосторонней формами, очень похожими на те, которые присущи правой и левой перчатке или раковинам улиток, закрученным в спираль по часовой и против часовой стрелки. Вы, конечно, не можете видеть молекулы, но их асимметрия проявляется в форме кристаллов и некоторых оптических свойствах тех или иных веществ. Существует, например, два разных вида сахара, право- и левосторонний и существует также два вида бактерий, питающихся сахаром, и, хотите — верьте, хотите — нет, каждый вид бактерий ест лишь свой вид сахара.

Как было сказано выше, кажется абсолютно невозможным превратить правосторонний объект, например перчатку, в левосторонний. Но так ли это на самом деле? Нельзя ли представить какой-нибудь диковинный вид пространства, в котором подобное возможно? Чтобы ответить на этот вопрос, давайте изучим его с точки зрения плоских жителей поверхности, которую мы рассматриваем с высоты нашего трехмерного мировоззрения. Взглядните на рис. 22, изображающий примеры возможных жителей Плоскоземелья, то есть пространства двух измерений. Человека, стоящего с гроздью винограда в руке, можно назвать «анфасмен», так как у него есть «анфас», но нет «профиля». Животное, наоборот, — «профильный осел», или, если говорить более точно,

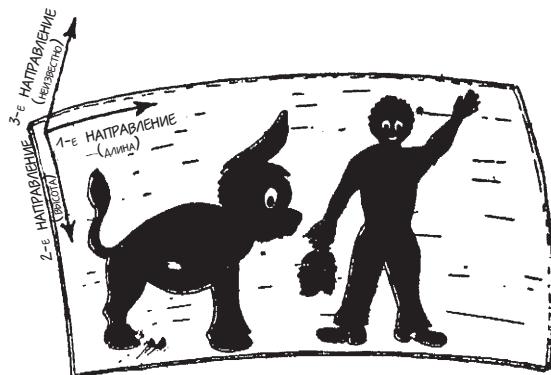


Рис. 22. Вот так могут выглядеть двухмерные «теневые существа», живущие на плоскости. Такой вид двухмерных существ не слишком-то «практичен». У человека есть анфас, но нет профиля, и он не в состоянии положить в рот виноградину из грозди, которую держит в руке. Осел может прекрасно съесть весь виноград, но способен идти только вправо и вынужден пятиться назад, чтобы двигаться влево. Не так уж необычно для ослов, но, вообще-то, не очень удобно.

«глядящий-вправо-профильный-осел». Безусловно, мы можем также нарисовать «глядящего-влево-профильного-осла», но, поскольку оба осла ограничены поверхностью, они так же отличаются друг от друга с двумерной точки зрения, как правая и левая перчатки в пространстве привычном для нас. Вы не можете наложить «левого осла» на «правого осла», так как, для того чтобы совместить их носы и хвосты, вам пришлось бы перевернуть одного из них вверх тормашками, и, следовательно, его ноги болтались бы в воздухе, вместо того чтобы твердо стоять на поверхности.

Но, если вы извлечете одного осла из поверхности, перевернете его в пространстве и вернете обратно, оба осла станут идентичными. По аналогии правую перчатку можно превратить в левую, если вынуть ее из нашего пространства в четвертом направлении и, повернув должным образом, вернуть назад. Но у нашего физического пространства нет четвертого измерения, и вышеописанный метод должен рассматриваться как абсолютно невозможный. Разве нет какого-нибудь другого способа?

Что ж, давайте снова вернемся к двухмерному миру, но вместо рассмотрения обычной плоской поверхности, как на рис. 22, исследуем свойства так называемой ленты Мёбиуса. Эту поверх-

ность, названную в честь немецкого математика, который первым изучил ее почти столетие¹ назад, можно легко сделать, взяв длинную полоску обычной бумаги, повернув один из ее концов на 180 градусов и склеив оба конца так, чтобы в итоге получилось кольцо. Рис. 23 поможет вам с этим. Данная поверхность имеет много своеобразных свойств, одно из которых легко обнаружить, если разрезать ее ножницами вдоль по всей длине, параллельно краю (по стрелкам на рис. 23). При этом вы ожидаете, конечно же, что разрежете ленту на два кольца. Сделайте это, и вы увидите, что ваше предположение было неверным: вместо двух колец вы получите одно, но в два раза длиннее оригинала и вдвое тоньше!

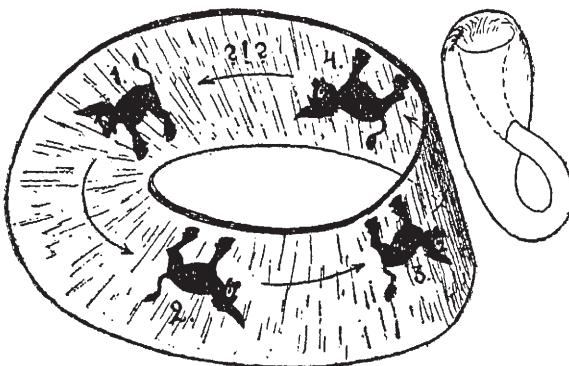


Рис. 23. Лента Мёбиуса и бутылка Клейна.

Давайте теперь посмотрим, что произойдет с «теневым» ослом, когда он пойдет по ленте Мёбиуса. Предположим, он начинает с позиции 1 (рис. 23), и в этот момент он рассматривается как «левопрофильный осел». Хорошо видный на картинке, он идет и идет, минует позиции 2 и 3 и наконец приближается к месту, с которого начал. Но, к вашему и своему удивлению, осел оказывается (позиция 4) в неловком положении — вверх ногами. Осел может, конечно, повернуть поверхность вовнутрь — чтобы встать на ноги, но тогда он окажется на неверном пути.

Короче говоря, шагая по поверхности Мёбиуса, «левопрофильный осел» превратился в «правопрофильного». И, заметьте, это произошло, несмотря на то что осел оставался все время на

¹ На сегодняшний день уже более столетия назад.

поверхности и никто его не брал и не переворачивал в пространстве. Таким образом, мы находим, что *на скрученной поверхности, просто перемещаясь по ней вдоль, правосторонний объект может превратиться в левосторонний и наоборот*. Лента Мёбиуса, изображенная на рис. 23, представляет собой часть более общей поверхности, известной как бутылка Клейна (на рис. 23 справа), которая имеет лишь одну сторону и замыкается сама на себя, не имея явных границ. Если это возможно на двухмерной поверхности, то же самое должно быть верно и для трехмерного пространства, при условии, конечно, что оно скручено надлежащим образом. Естественно, поворот Мёбиуса в космосе представить нелегко. Мы не можем посмотреть на наше пространство снаружи, как смотрели на «ослиную» поверхность, это всегда непросто — ясно видеть вещи, когда вы находитесь непосредственно среди них. Однако не так уж и невозможно то, что астрономическое пространство замыкается само на себя и к тому же скручено, как лента Мёбиуса.

Если это действительно так, то путешественники, пересекшие всю Вселенную, возвращались бы левосторонними, с сердцем, расположенным в груди справа, а производители перчаток или обуви имели бы сомнительную возможность упростить производство, изготавливая только один вид обуви или перчаток и отправляя половину продукции через всю Вселенную, чтобы получить обратно тот их вид, который необходим для другой половины рук или ног мира.

На этой фантастической мысли мы и заканчиваем обсуждение необычных свойств необычных пространств.

Глава IV

Мир четырех измерений

1. ВРЕМЯ — ЧЕТВЕРТОЕ ИЗМЕРЕНИЕ

Понятие четвертого измерения обычно окружено тайной и вызывает настороженность. Как мы, создания длины, высоты и ширины, вообще дерзаем говорить о четырехмерном пространстве? Возможно ли, даже используя весь наш трехмерный интеллект, представить себе сверхпространство четырех измерений? И как бы выглядели четырехмерный куб или четырехмерная сфера? Когда вам говорят: «представьте» гигантского дракона с длинным чешуйчатым хвостом, из ноздрей которого вырывается пламя, или суперавиалайнер с бассейном и парой теннисных кортов на крыльях, — на самом деле вы рисуете мысленную картину, как бы то или иное выглядело, появившись оно внезапно перед вами. И рисуете вы эту картину на фоне знакомого трехмерного пространства, в котором находятся привычные объекты, в том числе и вы сами. Если это является значением слова «представьте», тогда представить четырехмерную фигуру на фоне обычного трехмерного пространства так же невозможно, как невозможно вжать трехмерное тело в плоскость. Но погодите минутку. Мы, в определенном смысле, *действительно* вжимаем трехмерные тела в плоскость — когда рисуем их. Во всех этих случаях, однако, мы не используем, конечно же, гидравлический пресс или любую другую физическую силу, а применяем метод известный как геометрическая «проекция», или построение тени. Разница между двумя способами «вжатия» тела (например, тела лошади) в плоскость можно мгновенно понять, взглянув на рис. 24.

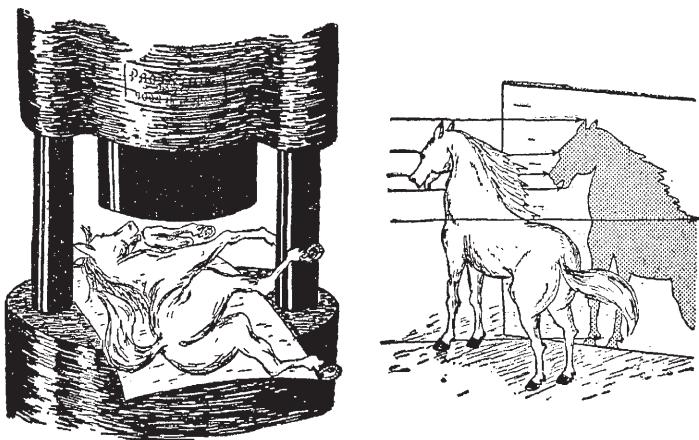


Рис. 24. Неправильный и правильный способы «вжать» трехмерное тело в двумерную поверхность.

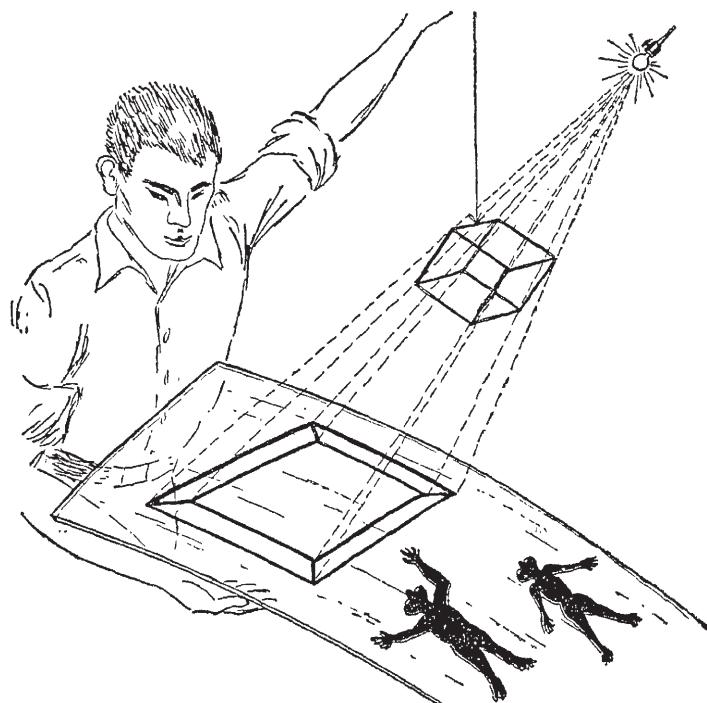


Рис. 25. Двумерные существа смотрят с удивлением на тень трехмерного куба, проецируемого на их поверхность.

Проведя аналогию, мы можем сделать вывод, что, хотя невозможно «вжать» четырехмерное тело в трехмерное пространство без того, чтобы различные его части не торчали при этом во все стороны, можно говорить о «проекциях» четырехмерных фигур на наше пространство трех измерений. Но надо помнить: точно так же как проекции на плоскость трехмерных тел являются двумерными, или плоскими, фигурами, проекции четырехмерных супертел на наше обычное пространство будут представлены пространственными фигурами.

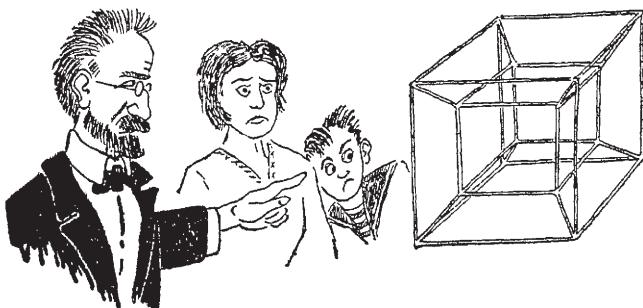
Чтобы прояснить вопрос, давайте сначала подумаем, как двумерные теневые существа, живущие на поверхности, восприняли бы идею трехмерного куба; мы с легкостью можем представить себе это, поскольку, будучи трехмерными существами и потому превосходящими их, мы способны посмотреть извне, то есть из третьего направления, на мир двух измерений. Единственный способ «вжать» куб в плоскость — «спроектировать» его на эту плоскость так, как показано на рис. 25. Рассматривая такую проекцию и прочие проекции, которые получаются при поворачивании исходного куба, наши двумерные друзья смогут, по крайней мере, сформировать некоторое представление о таинственной фигуре, называемой «трехмерный куб». Они не в состоянии «выпрыгнуть» из своей поверхности и вообразить куб, как делаем это мы, но, просто рассмотрев проекцию, они могут сказать, например, что куб имеет восемь вершин и двенадцать ребер. Теперь взгляните на рис. 26, и вы окажетесь точно в той же ситуации, что и бедняги двумерные теневые существа, изучающие проекцию обыкновенного куба на их поверхность. Замысловатая структура, которую с таким удивлением изучает некое семейство, на самом деле проекция четырехмерного гиперкуба на наше трехмерное пространство*.

Внимательно изучив эту фигуру, вы легко определите те же особенности, которые приводят в замешательство и теневых существ на рис. 25: в то время как проекция обычного куба на плоскость представляет собой два квадрата, один из которых находится внутри другого, а вершины их соединены, аналогичным образом проекция гиперкуба на обычное пространство состоит из двух кубов, один из которых находится внутри другого, а вершины их

* Точнее, на рис. 26 показана проекция на плоскость бумаги проекции четырехмерного гиперкуба на наше пространство.

соединены. И, подсчитав, вы легко увидите, что гиперкуб имеет 16 вершин, 32 ребра и 24 грани. Вот это куб!

Теперь давайте посмотрим, как выглядит четырехмерная сфера. Чтобы узнать это, мы должны снова обратиться к более знакомому слухаю — к проекции обычной сферы на плоскую поверхность. Представьте, например, прозрачный земной шар с изображенными на нем континентами и океанами, который спроектировали на белую стену (рис. 27).



*Рис. 26. Гость из четвертого измерения!
Прямая проекция четырехмерного гиперкуба.*

В проекции два полушария, наложатся, конечно же, друг на друга, и, судя по проекции, может показаться, что расстояние от Нью-Йорка (США) до Пекина (Китай) очень мало. Но это только впечатление. На самом деле каждая точка на проекции представляет собой фактически две противоположные точки на настоящей сфере, и проекция на земной шар авиалайнера, летящего из Нью-Йорка в Китай, будет двигаться до самого края плоской проекции, а затем весь тот же путь назад. И, несмотря на то что проекции двух разных авиалайнеров могут накладываться на изображении, никакого столкновения не произойдет, если авиалайнеры «на самом деле» на противоположных сторонах земного шара.

Таковы свойства плоской проекции обыкновенной сферы. Если мы немного напряжем воображение, то без особого труда представим, как выглядит пространственная проекция четырехмерной гиперсферы. Точно так же, как проекция на плоскость обычной сферы состоит из двух плоских дисков, сложенных вместе (точка к точке) и соединенных внешней окружностью, про-

странственную проекцию гиперсферы следует представлять в виде двух сферических тел, проходящих друг сквозь друга и соединивших в одну свои внешние поверхности. Но мы уже обсуждали такую необычную структуру, как эта, в предыдущей главе — в качестве примера замкнутого трехмерного пространства, аналогичного замкнутой сферической поверхности. Таким образом, все, что мы должны добавить к сказанному, — трехмерная проекция четырехмерной сферы является не чем иным, как подобием яблок — сиамских близнецов, образованных двумя обычными яблоками, выращенными вместе под одной кожурой, которые мы обсуждали ранее.

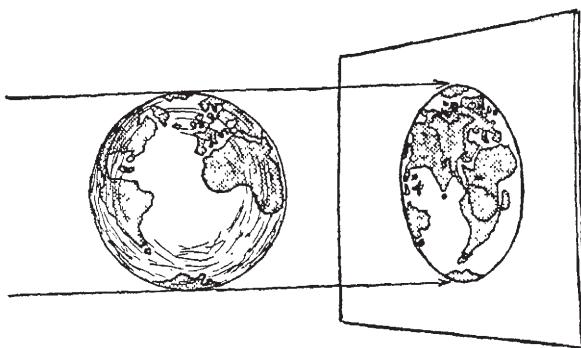


Рис. 27. Проекция земного шара на плоскость.

Подобным же образом, используя метод аналогии, мы можем ответить на многие другие вопросы, касающиеся свойств четырехмерных фигур, хотя «представить» четвертое независимое направление в нашем физическом пространстве мы не сможем никогда, как бы ни старались.

Но если вы подумаете над этим еще немного, то поймете, что вовсе необязательно впадать в мистику, чтобы постичь четвертое направление. На самом деле существует слово, которое большинство из нас использует каждый день, чтобы обозначить то, что может и должно рассматриваться в физическом мире как четвертое независимое направление. Мы говорим о времени, которое, вместе с пространством, постоянно используется для описания событий, происходящих вокруг нас. Когда мы упоминаем какие-либо события во Вселенной, будь то случайная встреча с другом на улице или взрыв далекой звезды, мы обычно указываем не

только, где это событие состоялось, но и когда. Таким образом, мы добавляем еще один факт — дату — к трем имеющимся направлениям, которые определяют наше местонахождение.

Рассматривая вопрос дальше, вы также легко поймете, что каждый физический объект обладает четырьмя измерениями — тремя в пространстве и одним во времени. Так, дом, в котором вы живете, простирается на такую-то длину, такую-то ширину, такую-то высоту и на такое-то время, последний размер — период времени от даты, когда дом был построен, до даты, когда он, в конце концов, либо сгорит, либо будет разрушен какой-нибудь компанией, занимающейся сносом зданий, либо рухнет сам.

Безусловно, направление времени не совсем то же самое, что три направления в пространстве. Временные интервалы измеряются часами, которые издают звук «тик-так», озвучивая секунды, и звук «дин-дон», озвучивая часы, в отличие от пространственных интервалов, которые измеряются линейкой. И, хотя вы можете использовать одну и ту же линейку для измерения длины, ширины и высоты, вы не в состоянии превратить ее в часы, чтобы измерить длительность времени. Также, несмотря на то что в пространстве вы можете двигаться вперед, вправо, вверх, а затем вернуться назад, вы не в состоянии вернуться назад во времени, которое принудительно гонит вас из прошлого в будущее. Но, принимая во внимание различия между направлением времени и тремя направлениями в пространстве, мы все же можем использовать время в качестве четвертого направления в мире физических событий, памятая, однако, что это не совсем одно и то же.

Выбрав время в качестве четвертого измерения, мы обнаруживаем, что с его помощью проще представлять четырехмерные фигуры, обсуждавшиеся в начале этой главы. Помните, например, странную фигуру — проекцию четырехмерного куба? Шестнадцать вершин, тридцать два ребра и двадцать четыре грани! Неудивительно, что люди на рис. 26 смотрят на этого геометрического монстра с таким изумлением.

С нашей новой точки зрения, однако, четырехмерный куб — это обычный куб, который существует в течение определенного периода времени.

Представьте, что вы соорудили куб из двенадцати кусочков прямой проволоки первого мая и месяц спустя разобрали его.

Каждая угловая точка такого куба теперь должна рассматриваться на самом деле как линия, продолжающаяся в направлении времени на длину в один месяц. Вы можете прикрепить маленький календарь к каждой вершине и переворачивать странички каждый день, и это будет демонстрировать продвижение во времени.

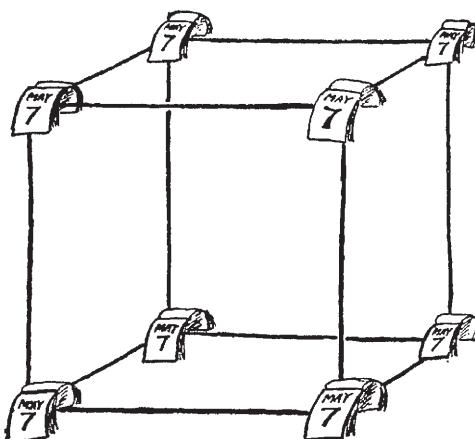


Рис. 28.

Количество ребер в этой четырехмерной фигуре теперь легко подсчитать. В начале ее существования у вас есть, собственно, двенадцать пространственных ребер, восемь «временных ребер», представляющих длительность каждой вершины, и двенадцать пространственных ребер в конце существования*. Всего тридцать два ребра. Аналогичным образом мы подсчитываем, что существует шестнадцать вершин: восемь пространственных вершин 7 мая и те же восемь пространственных вершин 7 июня. Подсчет, тем же способом, количества граней нашей четырехмерной фигуры мы оставляем читателю в качестве упражнения. При этом необходимо помнить, что некоторые из этих граней будут обычными квадратными гранями исходного куба, тогда как остальные — «полупространственными-полувременными» гранями, образованными ис-

* Если вы не понимаете этого, представьте квадрат с четырьмя угловыми точками и четырьмя сторонами, который мы перемещаем перпендикулярно его поверхности (в третьем направлении) на расстояние, равное его сторонам.

ходными ребрами нашего куба, растянувшимися во времени с 7 мая по 7 июня.

Сказанное о четырехмерном кубе применимо, безусловно, к любой другой геометрической фигуре или материальному объекту, мертвому или живому.

В частности, представьте себя как четырехмерную фигуру — чем-то вроде длинного резинового стержня, тянущегося во времени с момента вашего рождения до конца вашего земного бытия. К сожалению, четырехмерные предметы на бумаге не изобразить, так что на рис. 29 мы попытались передать эту идею на примере двумерного теневого человека, взяв за направление времени направление в пространстве, перпендикулярное двумерной плоскости, на которой он живет. Изображение представляет собой лишь небольшой отрезок жизни нашего теневого человека. Вся продолжительность жизни должна быть представлена гораздо более длинным резиновым стержнем, который довольно тонок в начале, когда человек еще ребенок, а далее, в течение многих лет жизни, скользит, колеблясь и виляя, и обретает постоянную форму лишь в момент смерти (потому что мертвые не двигаются), после чего начинает распадаться.

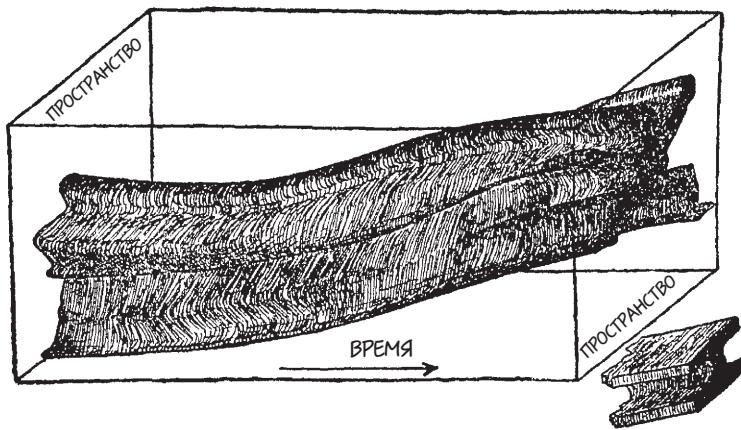


Рис. 29.

Мы должны уточнить, что этот четырехмерный стержень образован чрезвычайно многочисленной группой отдельных волокон, каждое из которых состоит из отдельных атомов. На протя-

жении жизни большинство этих волокон держатся группой, лишь некоторые из них выпадают — например, при стрижке волос или ногтей. Поскольку атомы не разрушаются, в действительности распад человеческого тела после смерти следует рассматривать как рассеивание отдельных волокон (за исключением, пожалуй, тех, которые образуют кости) во всех направлениях.

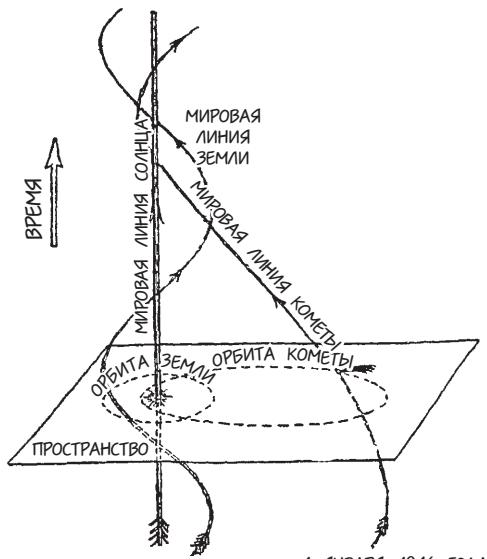


Рис. 30.

На языке четырехмерной пространственно-временной геометрии линия, представляющая историю каждой отдельной материальной частицы, называется «мировая линия». Точно так же мы можем говорить о «мировых пучках», которые состоят из групп мировых линий, образующих комбинированное тело.

На рис. 30 мы даем пример из астрономии, демонстрирующий мировые линии Солнца, Земли и некой кометы*. Здесь, как и в предыдущем примере с прыгающим человеком, мы взяли двумерное пространство (плоскость земной орбиты) и направили ось времени перпендикулярно к ней. Мировая линия Солнца представлена на этой схеме прямой линией, параллельной оси времени, так как мы

* Собственно, мы должны говорить здесь о «мировых пучках», но с астрономической точки зрения звезды и планеты можно рассматривать как точки.

рассматриваем Солнце как неподвижное тело*. Мировая линия Земли, которая движется по орбите, очень близкой к круговой, — спираль, обвивающая линию Солнца, тогда как мировая линия кометы приближается к линии Солнца и снова уходит прочь.

Мы видим, что с точки зрения геометрии четырехмерного пространства-времени топография и история Вселенной сливаются в одну гармоничную картину, и все, что нам нужно рассмотреть, — это пучок перепутанных мировых линий, представляющих собой движение отдельных атомов, животных, звезд.

2. УРАВНИВАЯ ВРЕМЯ И ПРОСТРАНСТВО

Рассматривая время как четвертое измерение, более или менее эквивалентное трем пространственным измерениям, мы сталкиваемся с довольно трудным вопросом. Когда мы измеряем длину, ширину или высоту, мы можем использовать во всех трех случаях одну и ту же единицу, скажем, 1 дюйм или 1 фут. Но длительность времени нельзя измерить ни в футах, ни в дюймах, и мы должны использовать совершенно другие единицы, скажем, минуты или часы. Ну и как эти единицы измерения сопоставить? Если мы рассматриваем четырехмерный куб, чьи размеры в пространстве 1 фут на 1 фут на 1 фут, как долго он должен просуществовать во времени, чтобы сделать все четыре измерения равными? Одну секунду, 1 час или 1 месяц, как мы брали в предыдущем примере? 1 час длиннее 1 фута или короче?

С первого взгляда вопрос звучит бессмысленно, но если вы немного подумаете, то найдете разумный способ, с помощью которого можно сопоставить длину и интервал времени. Часто можно слышать, например, что некто живет «в двадцати минутах езды на автобусе от центра города» или что какое-то место «всего в пяти часах езды на поезде». В этих примерах мы определяем расстояния, указывая время, необходимое на их покрытие с помощью того или иного вида транспорта.

Таким образом, если бы мы сумели договориться о *некой стандартной* скорости, мы смогли бы выражать временные интервалы в единицах длины и наоборот. Ясно, конечно, что стандартная

* На самом деле наше Солнце движется относительно звезд, так что по отношению к звездной системе мировая линия Солнца должна несколько отклоняться в сторону.

скорость, которую нужно выбрать в качестве фундаментального коэффициента превращения пространства во время и времени в пространство должна иметь в равной степени фундаментальный и универсальный характер, будучи всегда одной и той же, независимо от личных пристрастий или физических обстоятельств. Единственная известная в физике скорость, которая обладает желаемой степенью универсальности, — это скорость распространения света в вакууме. Хотя обычно она называется «скоростью света», ее лучше описать как «скорость распространения физического взаимодействия», так как любые виды сил, которые действуют между материальными телами, будь то силы электрического притяжения или силы гравитации, распространяются в вакууме с одинаковой скоростью.

Кроме того, как мы увидим позже, скорость света представляется собой верхний предел любой возможной материальной скорости, и ни один объект не может двигаться в пространстве со скоростью, превышающей ее.

Первую попытку измерить скорость света предпринял в семнадцатом веке известный итальянский ученый Галилео Галилей. Одной темной ночью, взяв с собой два фонаря, оснащенных механической заслонкой, Галилей вместе со своим помощником отправился в открытые поля неподалеку от Флоренции. Двое мужчин заняли позиции в нескольких милях друг от друга, и в определенный момент Галилей открыл фонарь и направил луч света в сторону помощника (рис. 31А). Последний получил инструкцию открыть свой фонарь, как только увидит световой сигнал, идущий от Галилея.

Поскольку свету требовалось некоторое время, чтобы дойти от Галилея до помощника и затем вернуться обратно к Галилею, ожидалось, что между моментом, когда Галилей отодвинет заслонку фонаря, и моментом, когда он увидит ответ помощника, будет некоторая задержка. Маленькая задержка действительно наблюдалась, но когда Галилей отправил помощника на позицию, которая находилась вдвое дальше, и повторил эксперимент, никакого увеличения задержки не произошло. По-видимому, свет распространялся так быстро, что на преодоление расстояния в несколько миль не потребовалось практически никакого времени вообще, а наблюдавшаяся задержка была вызвана тем, что помощник Галилея не мог открыть свой фонарь в тот же момент, когда видел свет, — запаздывающий рефлекс, это сейчас так называется.

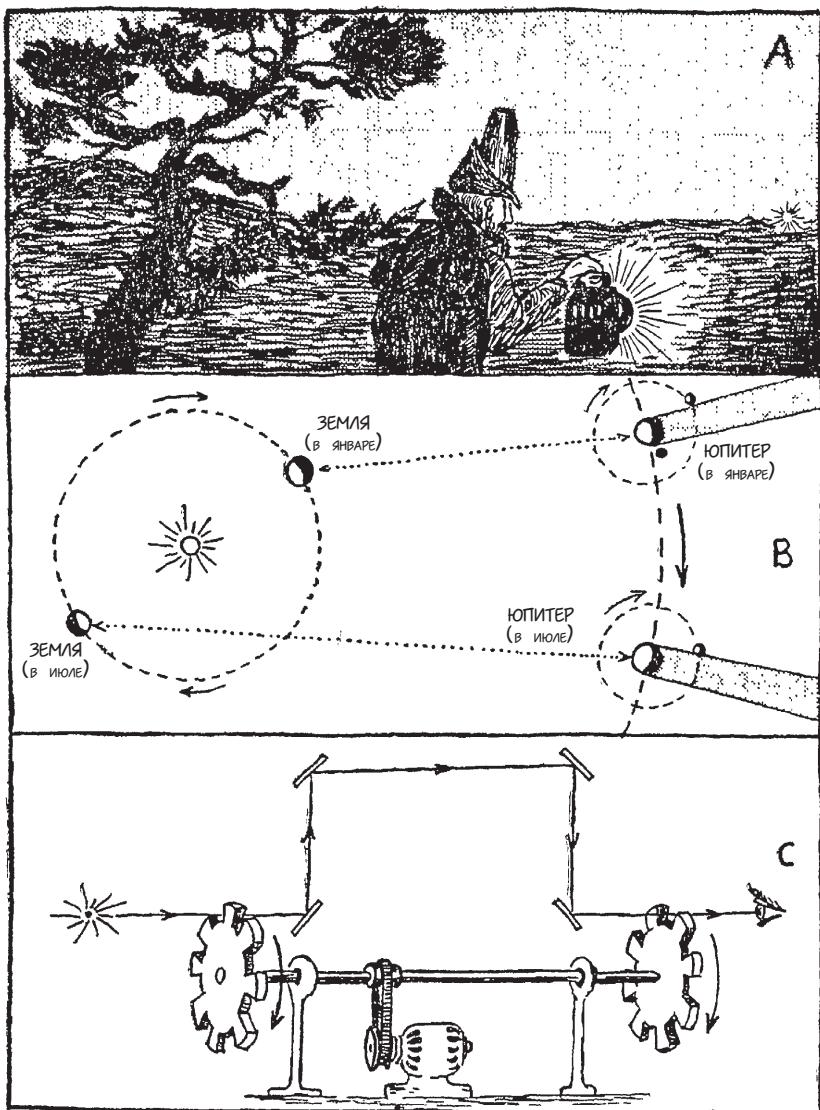


Рис. 31.

Хотя эксперимент Галилея не привел ни к какому положительному результату, одно из его других открытий — касательно лун Юпитера — заложило основу для первого фактического измерения скорости света. В 1675 году датский астроном Рёмер, наблюдая затмения лун Юпитера, заметил, что временные интервалы между моментами исчезновения лун в тени, отбрасываемой планетой, не всегда одинаковы, и оказываются короче или длиннее в зависимости от расстояния между Юпитером и Землей в то или иное время. Рёмер сразу понял (как поймете и вы, изучив рис. 31В), что этот эффект вызван не каким-то нарушением в движении лун Юпитера, а просто тем, что из-за меняющегося расстояния между Юпитером и Землей мы видим эти затмения с различными задержками. На основании его наблюдений мы и смогли найти, что скорость света около ста восьмидесяти пяти тысяч миль в секунду. Неудивительно, что Галилей оказался не в состоянии измерить скорость света с помощью своего устройства, так как свету от его фонаря понадобилось всего лишь несколько сотен тысячных долей секунды, чтобы достичь его помощника и вернуться обратно!

Но то, что не смог сделать Галилей со своим фонарем с примитивной заслонкой, было сделано позже с помощью более совершенного физического оборудования. На рис. 31С мы видим установку, впервые использованную французским физиком Физо, для измерения скорости света на сравнительно малых расстояниях. Основная часть его установки состоит из двух зубчатых колес, прикрепленных к общей оси таким образом, что, если вы смотрите на колеса параллельно оси, то вы видите, что зубцы первого колеса закрывают промежутки между зубцами второго. Таким образом, тонкий луч света, направленный параллельно оси, не может пройти, как бы ось ни поворачивалась. Теперь представим, что систему этих двух зубчатых колес установили на быстрое вращение. Поскольку свету, проходящему между двумя зубцами первого колеса, требуется некоторое время, прежде чем он достигнет второго колеса, он сможет пройти между зубцами второго колеса, если за то же самое время система зубчатых колес повернется на половину расстояния между двумя зубцами второго колеса. Ситуация в данном случае подобна той, в которой автомобиль движется с подходящей скоростью по дороге с синхронизированной системой светофоров. Если колеса будут вращаться в два раза быстрее, зубец второго колеса закроет просвет к тому времени, когда свет достигнет его, и пройти дальше луч уже не сможет.

Но при еще более высокой скорости вращения свет снова сможет пройти, так как зубчатое колесо пропустит луч света, благодаря тому, что следующий просвет между зубцами откроется как раз в нужное время, чтобы пропустить его. Таким образом, фиксируя скорость вращения соответствующую последовательному появлению и исчезновению света можно рассчитать скорость света, движущегося между двумя колесами. Для усовершенствования эксперимента и уменьшения необходимой скорости вращения свет можно заставить преодолевать большее расстояние при движении от первого зубчатого колеса ко второму; как показано на рис. 31С, это можно сделать с помощью зеркал. В ходе эксперимента в первый раз Физо смог увидеть свет, который прошел через промежуток между зубцами ближайшего к нему колеса, когда установка вращалась со скоростью 1000 оборотов в секунду. Это доказало, что с такой скоростью зубцы проходили половину расстояния просвета между ними за то же время, за которое свет преодолевал расстояние от одного колеса до другого. Поскольку у каждого колеса было по 50 зубцов одинакового размера, это расстояние было, очевидно, $\frac{1}{100}$ окружности колеса, а время прохождения — та же доля от времени, которое потребовалось колесу, чтобы совершить полный оборот. Соотнеся эти расчеты с расстоянием, которое свет преодолевал от одного колеса до другого, Физо пришел к скорости 300 000 км в секунду, или 186 000 миль в секунду, что приблизительно равно результату, полученному Рёмером в его наблюдениях за спутниками Юпитера.

Продолжая дело этих пионеров, другие экспериментаторы сделали большое количество собственных измерений, использовав методы как астрономии, так и физики. Самое точное исчисление скорости света в пространстве (обычно обозначается буквой «с»), доступное на сегодняшний день, — это

$$c = 299\,776 \frac{\text{км}}{\text{с}}, \text{ или } 186\,300 \frac{\text{миль}}{\text{с}}.$$

Чрезвычайно высокое значение делает скорость света удобным стандартом, с помощью которого можно измерять астрономические расстояния настолько огромные, что выразить их в милях или километрах означало бы иметь дело с числовыми обозначениями, которые заполнили бы целые страницы. Поэтому астроном, говоря, что определенная звезда находится на расстоянии 5 «световых лет», вкладывает в свои слова тот же смысл, который вкладываем мы, когда говорим о месте, что находится в 5 часах

езды на поезде. Поскольку год содержит $31\,558\,000$ с, один световой год соответствует $31\,558\,000 \times 299\,776 = 9\,460\,000\,000\,000$ км, или $5\,879\,000\,000\,000$ миль. Употребляя термин «световые годы» для обозначения измерения расстояния, мы практически признаем время в качестве измерения, а единицы времени в качестве меры пространства. Мы также можем осуществить и обратную процедуру и говорить о «световых милях», имея в виду время, необходимое свету, чтобы преодолеть расстояние в одну милю. Используя приведенное выше значение скорости света, находим, что одна световая миля равна $0,0000054$ с. Точно так же один «световой фут» — это $0,000000011$ с. Это отвечает на наш вопрос о четырехмерном кубе, который обсуждался в предыдущем параграфе. Если пространственные размеры этого куба 1 фут на 1 фут на 1 фут, его пространство-время должно быть лишь около $0,00000001$ с. Если пространственный фут куба существует в течение всего месяца, он должен рассматриваться как четырехмерный стержень, сильно вытянутый вдоль оси времени.

3. ЧЕТЫРЕХМЕРНОЕ РАССТОЯНИЕ

Решив вопрос с сопоставимыми единицами, которые можно использовать и на оси пространства, и на оси времени, далее мы можем спросить себя, что следует понимать под расстоянием между двумя точками в четырехмерном мире пространства-времени. Следует помнить, что в этом случае каждая точка соответствует тому, что известно как «*событие*», то есть комбинация положения в пространстве и даты. Чтобы прояснить этот вопрос, давайте рассмотрим, например, следующие два события.

Событие I. Банк, расположенный на первом этаже на углу Пятой авеню и 50-й улицы в Нью-Йорке, ограбили в 9:21 утра 28 июля 1945 года*.

Событие II. В 9:36 утра того же дня, в Нью-Йорке же, заблудившийся в тумане военный самолет врезался в стену 79-го этажа Эмпайр Стейт Билдинг на 34-й улице между Пятой и Шестой авеню (рис. 32).

Два этих события в пространстве разделяли 16 кварталов по линии север—юг, $\frac{1}{2}$ квартала по линии восток—запад, а также

* Если на этом углу действительно есть банк — сходство является чисто случайнym.

78 этажей, а во времени — 15 минут. Очевидно, что для описания разделения двух событий в пространстве нет необходимости указывать номера стоящих на авеню отдельных домов, а также этажей, поскольку мы можем объединить их в единое прямое расстояние с помощью известной теоремы Пифагора, согласно которой расстояние между двумя точками в пространстве — это квадратный корень из суммы квадратов отдельных координатных расстояний (рис. 32, в углу). Чтобы применить теорему Пифагора, мы, конечно же, должны сначала выразить в сопоставимых единицах, таких как футы, все имеющиеся расстояния. Если длина одного дома по линии север—юг составляет 200 футов, одного дома по линии восток—запад — 800 футов, а средняя высота од-

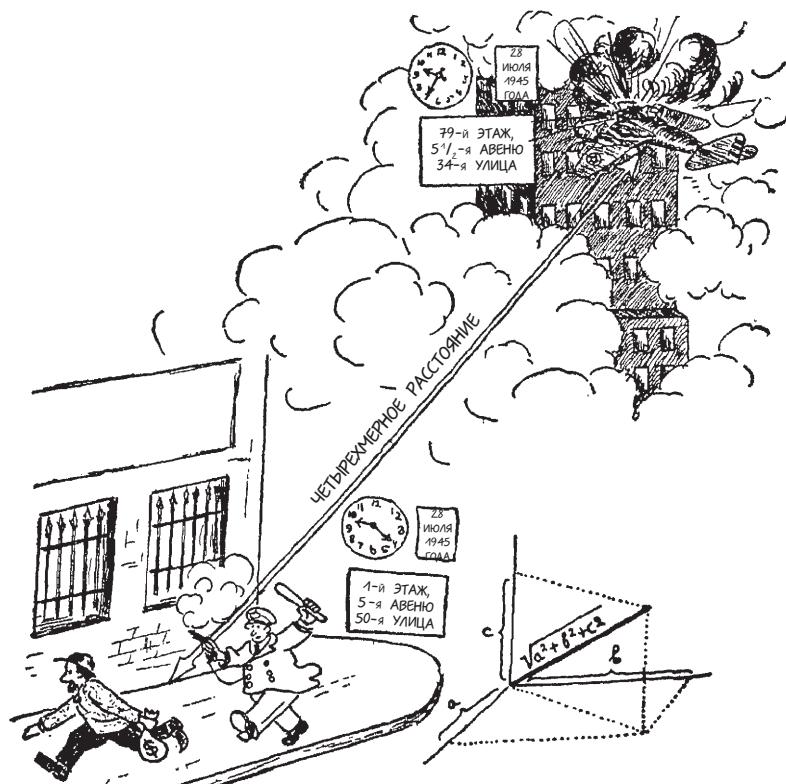


Рис. 32.

ного этажа Эмпайр Стейт Билдинг — 12 футов, три координатных расстояния становятся 3200 футами в направлении север—юг, 400 футами в направлении запад—восток, 936 футами в вертикальном направлении. Для прямого расстояния между двумя местоположениями, используя теорему Пифагора, мы получаем:

$$\sqrt{(3200)^2 + (400)^2 + (936)^2} = \sqrt{11\,280\,000} = 3360 \text{ футов.}$$

Если понятие времени как четвертой координаты можно хоть как-то применить на практике, у нас должно получиться объединить цифру 3360 футов, обозначающую разделение в пространстве, с цифрой 15 минут, обозначающей разделение двух событий во времени, чтобы получить одну-единственную цифру, характеризующую *четырехмерное расстояние* между двумя событиями.

Согласно оригинальной идеи Эйнштейна, такое *четырехмерное расстояние можно на самом деле определить простым обобщением теоремы Пифагора, и в физическом соотношении событий оно играет более фундаментальную роль, чем отдельные разделения в пространстве и времени.*

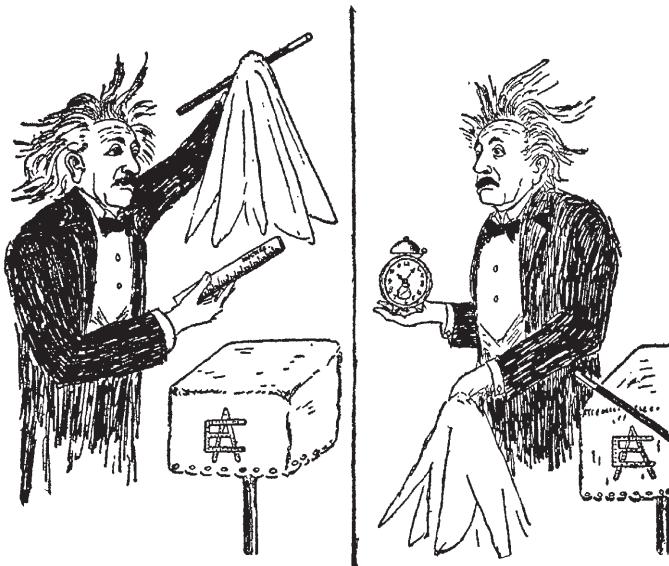


Рис. 33. Подобное профессор Эйнштейн не смог бы сделать никогда. Но то, что он смог сделать — намного лучше.

Если мы объединяем данные пространства и времени, мы, конечно же, должны выразить их в сопоставимых единицах, точно так же, как было необходимо обозначить в футах длину домов и расстояние между этажами. Как мы видели выше, это легко можно сделать, используя скорость света в качестве коэффициента превращения, так что временной интервал в 15 минут становится $800\,000\,000\,000$ «световых футов». Простое обобщение теоремы Пифагора склоняет нас к определению четырехмерного расстояния как квадратного корня из суммы квадратов всех четырех координат, то есть трех разделений в пространстве и одного во времени. Поступая так, однако, мы должны полностью стереть любую разницу между пространством и временем, что, по сути, оказалось бы признанием возможности превратить измерение пространства в измерение времени и наоборот.

Тем не менее никто — даже великий Эйнштейн — не может, накрыв линейку куском ткани, помахав палочкой и произнеся такие волшебные слова, как «*кэркс-пэкс-фэкс-контравариантный-тензор*», превратить ее в сверкающий новенький будильник! (Рис. 33.)

Итак, если мы собираемся отождествить время с пространством в пифагоровой формуле, мы должны сделать это каким-нибудь необычным способом, таким, который сохранил бы их некоторые естественные различия.

Согласно Эйнштейну, физическую разницу между расстояниями в пространстве и длительностью во времени можно выделить в математической формуле обобщенной теоремы Пифагора, используя отрицательный знак перед квадратом временной координаты. Таким образом, мы можем обозначить четырехмерное расстояние между двумя такими событиями, как *квадратный корень из суммы квадратов трех пространственных координат минус квадрат временной координаты*, которую сначала, конечно же, нужно выразить в пространственных единицах.

Четырехмерное расстояние между ограблением банка и крушением самолета рассчитывается, следовательно, так:

$$\sqrt{(3200)^2 + (400)^2 + (936)^2 - (800\,000\,000\,000)^2}.$$

Чрезвычайно большое числовое значение четвертого члена по сравнению с другими тремя является результатом того, что мы взяли пример из «обычной жизни», а по стандартам обычной жизни рациональная единица времени очень мала. Мы получили бы

более сопоставимые цифры, если бы вместо рассмотрения двух событий, произошедших в пределах Нью-Йорка, обратились бы к примеру из космоса. Таким образом, взяв в качестве первого события взрыв атомной бомбы на атолле Бикини ровно в 9 часов утра 1 июля 1946 года, а в качестве второго, скажем, падение метеорита на поверхность Марса в 1 мин. 10-го утра того же дня, мы бы имели временной интервал $540\,000\,000\,000$ световых футов по сравнению с пространственным расстоянием приблизительно в $650\,000\,000\,000$ футов.

В этом случае четырехмерное расстояние между этими двумя событиями было бы $\sqrt{(65 \cdot 10^{10})^2 - (54 \cdot 10^{10})^2} = 36 \cdot 10^{10}$ футов, являясь численно совершенно другим по отношению к чисто-пространственным и чисто-временным интервалам.

Можно, конечно же, резонно возразить против такой, казалось бы, иррациональной геометрии, в которой с одной координатой обращаются иначе, чем с тремя остальными, но не следует забывать, что любая математическая система, разработанная для описания физического мира, должна принимать ту форму, которая будет соответствовать явлениям, и, если пространство и время действительно ведут себя по-разному в своем четырехмерном объединении, законы четырехмерной геометрии должны иметь надлежащую форму. Кроме того, есть простое математическое средство, которое может заставить геометрию пространства и времени Эйнштейна выглядеть так же, как старая добрая евклидова геометрия, которую мы изучали в школе. Это средство, предложенное немецким математиком Минковским, состоит в рассмотрении четвертой координаты как чисто мнимой величины. Вы, возможно, помните из второй главы этой книги, что любое обычное число можно превратить в мнимое, умножив его на $\sqrt{-1}$, и что такие мнимые числа удобно использовать в решении различных геометрических задач. Итак, согласно Минковскому, для того чтобы считаться четвертой, координата времени должна выражаться не только в пространственных единицах, но и быть умноженной на $\sqrt{-1}$. Таким образом, четыре координаты расстояний, относящиеся к нашему примеру, будут:

первая координата — 3200 футов,
 вторая координата — 400 футов,
 третья координата — 936 футов,
 четвертая координата — $8 \cdot 10^{11} \times i$ световых фута.

Теперь мы можем определить четырехмерное расстояние как квадратный корень из суммы квадратов *всех четырех* координат расстояний. Поскольку квадрат мнимого числа всегда отрицателен, обычное пифагорово выражение в координатах Минковского будет, по сути, математически эквивалентно на вид иррациональному пифагорову выражению в координатах Эйнштейна.

Есть такая история — о старице с ревматизмом, который спросил у здорового друга, как тому удалось избежать этого заболевания.

«Всю мою жизнь, каждое утро, я принимал холодный душ», — был ответ.

«О! — воскликнул первый. — Выходит, *вместо* ревматизма вы мучились от холодного душа!»

Итак, если вам не нравится ревматическая на вид теорема Пифагора, вы можете принимать вместо нее холодный душ мнимых временных координат.

Мнимая природа четвертой координаты в мире пространства—времени приводит к необходимости рассмотрения двух физически разных типов четырехмерного разделения.

На самом деле в таких случаях, как обсуждавшиеся выше события в Нью-Йорке, в которых трехмерное расстояние между событиями численно меньше, чем временной интервал (в соответствующих единицах), выражение под радикалом в теореме Пифагора является отрицательным, так что для обобщенного четырехмерного разделения мы получаем *мнимое число*. В некоторых других случаях, однако, длительность времени меньше, чем пространственное расстояние, так что мы получаем положительное число под радикалом. Это, безусловно, означает, что в таких случаях *четырехмерное разделение между двумя событиями является действительным*.

Поскольку, как обсуждалось выше, пространственные расстояния должны рассматриваться как действительные, тогда как длительность времени как чисто мнимая, мы можем сказать, что действительные четырехмерные разделения более тесно связаны с обычными пространственными расстояниями, а мнимые — с временными интервалами. Согласно терминологии Минковского, четырехмерные разделения первого рода называются *пространственными* (raumartig), а второго — *временными* (zeitartig).

Далее мы увидим, что пространственное разделение можно превратить в обычное пространственное расстояние, а временное разделение — в обычный интервал времени. Однако тот факт, что одно из них представлено действительным числом, тогда как другое представлено мнимым, образует непреодолимый барьер для любой попытки превратить одно в другое, делая для нас также невозможным превращение линейки в часы или часов в линейку.

Глава V

Относительность пространства и времени

1. ПРЕВРАЩАЕМ ПРОСТРАНСТВО ВО ВРЕМЯ И НАОБОРОТ

Хотя математические попытки продемонстрировать единство пространства и времени в едином четырехмерном мире не стирают полностью различия между расстоянием и длительностью, они, безусловно, обнаруживают гораздо большее сходство между двумя понятиями, чем это когда-либо наблюдалось в доэйнштейновской физике.

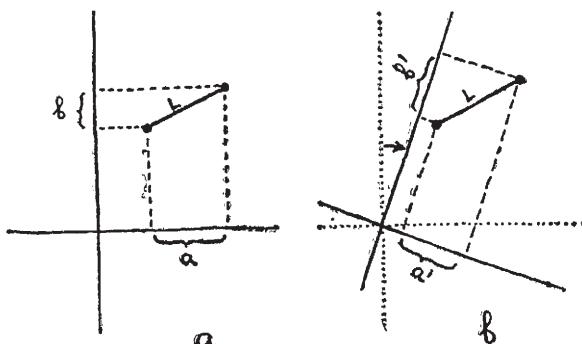


Рис. 34.

Собственно, пространственные расстояния и временные интервалы между различными событиями следует рассматривать теперь всего лишь как две проекции основного четырехмерного разделения на оси пространства и времени, так что поворот четырехмерной системы координат может привести к частичному превращению расстояния в интервал времени и наоборот. Но что мы подразумеваем

под поворотом четырехмерной системы координат пространства—времени?

Давайте сначала рассмотрим показанную на рис. 34а систему координат, образованную двумя пространственными координатами, и предположим, что у нас есть две фиксированные точки, разделенные определенным расстоянием L . Спроектировав расстояние на оси координат, мы находим, что точки разделены на a футов в направлении первой оси и на b футов в направлении второй. Если мы повернем систему координат на определенный угол (рис. 34б), проекции тех же самых расстояний на две новые оси будут отличаться от предыдущих проекций, обретя новые значения a' и b' . Однако, согласно теореме Пифагора, квадратный корень из суммы квадратов двух проекций будет одинаковым в обоих случаях, так как соответствует *фактическому* расстоянию между точками, которое поворот осей не меняет. Таким образом,

$$\sqrt{a^2 + b^2} = \sqrt{a'^2 + b'^2} = L$$

Мы говорим, что квадратный корень из суммы квадратов инвариантен по отношению к повороту координат, а конкретные значения проекций несущественны и зависят от выбора системы координат.

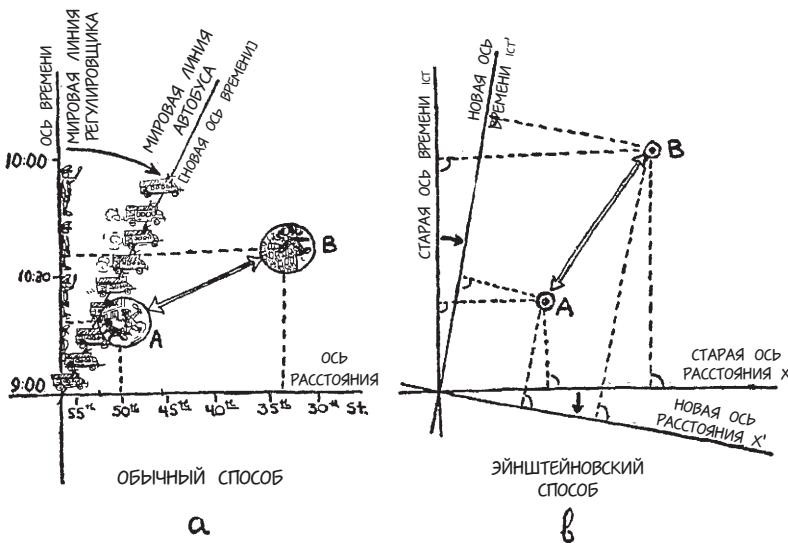


Рис. 35.

Рассмотрим теперь систему координат, одна ось которой соответствует расстоянию, а другая — длительности. В этом случае две фиксированные точки из предыдущего примера становятся двумя фиксированными событиями, и проекции на оси представляют собой, соответственно, их разделения в пространстве и времени. Взяв за два события ограбление банка и крушение самолета, которые обсуждались в предыдущей главе, мы можем получить изображение (рис. 35 a), которое очень похоже на изображение двух пространственных координат (рис. 34 a). Что мы должны теперь сделать, чтобы повернуть систему координат? Ответ на это, будучи неожиданным, может озадачить: если вы хотите повернуть пространственно-временную систему координат — садитесь в автобус.

Итак, предположим, мы на самом деле сидим на верхней палубе автобуса, движущегося по Пятой авеню роковым утром 28 июля.

В этом случае, с чисто эгоистической точки зрения, мы будем наиболее заинтересованы в том, *насколько далеко от нашего автобуса* состоятся ограбление банка и авиакатастрофа, хотя бы потому, что лишь расстояние определяет, сможем ли мы увидеть происходящее.

Если вы посмотрите на рис. 35 a , на котором последовательные положения мировой линии автобуса показаны вместе с событиями ограбления и авиакатастрофы, вы сразу заметите, что эти расстояния отличаются от тех, которые зарегистрировал стоявший на своем углу регулировщик уличного движения. Поскольку автобус двигался по авеню, минуя один квартал, скажем, за три минуты (не так уж необычно для интенсивного нью-йоркского движения!), разделение в пространстве между двумя событиями, при наблюдении из автобуса, становится меньше. Собственно, поскольку в 9:21 утра автобус пересек 52-ю улицу, ограбление банка, которое происходило в этот момент, было в 2 кварталах впереди. Ко времени крушения самолета (9:36 утра) автобус находился уже на 47-й улице, то есть в 14 кварталах от места крушения. Таким образом, измеряя расстояния *относительно автобуса*, мы должны заключить, что пространственное расстояние между ограблением и авиакатастрофой было $14 - 2 = 12$ кварталов по сравнению с расстоянием $50 - 34 = 16$ кварталов, измеренном относительно городских зданий. Взглянув снова на рис. 35 a , мы видим, что расстояния, зарегистрированные из автобуса, нужно отсчитывать не по вертикальной оси (мировая линия неподвиж-

ногого полицейского), как раньше, а скорее по наклонной линии, представляющей мировую линию автобуса, так что именно эта последняя линия играет теперь роль новой оси времени.

«Набор тривиальностей¹», который мы только что обсудили, можно подытожить в таком утверждении: чтобы выстроить пространственно-временную схему событий с точки зрения наблюдателя, находящегося в движущемся транспортном средстве, мы должны повернуть ось времени на определенный угол (зависящий от скорости этого транспортного средства), оставив, однако, без изменений пространственную ось.

Это утверждение, хоть и является истинной правдой с точки зрения классической физики и так называемого здравого смысла, находится тем не менее в прямом противоречии с нашими новыми идеями, касающимися четырехмерного мира пространства—времени. Если и в самом деле время должно рассматриваться в качестве независимой четвертой координаты, ось времени всегда должна быть *перпендикулярна трем осям пространства*, независимо от того, сидим ли мы в автобусе, трамвае или на тротуаре!

На этом этапе мы можем пойти по любому из двух путей мышления. Мы должны либо сохранить наши традиционные представления о пространстве и времени, отказавшись от любого дальнейшего рассмотрения геометрии единого пространства-времени, либо порвать со старыми идеями, продиктованными «здравым смыслом», и предположить, что в схеме пространства—времени *пространственную ось следует поворачивать вместе с временной осью*, чтобы обе всегда оставались взаимно перпендикулярны (рис. 35b).

Но, точно так же как поворот оси времени означает, в физическом плане, что *пространственное разделение двух событий имеет разные значения* (12 и 16 кварталов в предыдущем примере) *при наблюдении из движущегося транспортного средства*, поворот пространственной оси означал бы, что *временное разделение двух событий, наблюдавшихся из движущегося транспортного средства, отличается от временного разделения двух событий при наблюдении из стационарной точки на земле*. Таким образом, если бы ограбление банка и крушение самолета разделяло 15 минут по часам мэрии, интервал времени, зарегистрированный наручными часами пассажира автобуса, отличался бы не потому, что два хронометра идут

¹ В математике термин «тривиальность» употребляется в отношении объектов, которые являются простейшими в своем классе.

с разной скоростью в результате механических дефектов, а потому, что *само время течет с разной скоростью в транспортных средствах, движущихся с разной скоростью, и реальный механизм, который регистрирует его, соответственно замедлен*, хотя при низких скоростях движения автобуса это замедление столь ничтожно, что незаметно. (Позже в этой главе мы обсудим данное явление более подробно.)

В качестве еще одного примера давайте рассмотрим человека, который ест ужин в вагоне-ресторане движущегося поезда. С точки зрения официанта вагона-ресторана, пассажир ест закуску и десерт в одном и том же месте (третий столик у окна). Но с точки зрения двух стрелочников в стационарных точках на железнодорожных путях, которые заглядывают через окно в вагон как раз вовремя, чтобы увидеть: первый — как пассажир ест закуску, второй — как пассажир ест десерт, — два события разделяют многие мили. Следовательно, мы можем сказать, что *два события, происходящие в одном и том же месте, но в два разных момента, с точки зрения одного наблюдателя, будут рассматриваться как происходящие в разных местах, если их будут наблюдать другие наблюдатели в ином состоянии или состояниях движения*.

Опираясь на заданное соответствие пространства—времени, заменим в приведенном выше предложении слово «место» словом «момент» и наоборот. Теперь предложение будет звучать так: *два события, происходящие в один и тот же момент, но в разных местах, с точки зрения одного наблюдателя, будут рассматриваться как происходящие в разные моменты, если их будет наблюдать другой наблюдатель в ином состоянии движения*.

Применяя это к нашему примеру о вагоне-ресторане, мы ожидаем, что официант будет клясться, что два пассажира, сидевшие в противоположных концах вагона, закурили послеобеденные сигареты в точности в один и тот же момент, в то время как стрелочник, который стоял на путях и смотрел в окна движущегося мимо него поезда, будет настаивать на том, что один из джентльменов закурил раньше другого.

Итак, два события, рассматриваемые как одновременные с точки зрения одного наблюдателя, будут разделены определенным интервалом времени с точки зрения другого.

Это неизбежные следствия четырехмерной геометрии, в которой *пространство и время — лишь проекции инвариантного четырехмерного разделения на соответствующие оси*.

2. ЭФИРНЫЙ ВЕТЕР И ПУТЕШЕСТВИЕ К СИРИУСУ

Давайте теперь спросим себя: оправдывает ли простое желание использовать язык четырехмерной геометрии введение таких революционных изменений в наши старые и удобные представления о пространстве и времени?

Если наш ответ «да», мы бросаем вызов всей системе классической физики, в основе которой лежат определения пространства и времени, сформулированные великим Исааком Ньютона два с половиной века назад: «Абсолютное пространство, по своей природе, вне зависимости от любого предмета вовне, остается всегда одинаковым и незыблемым» и «Абсолютное, истинное, математическое время как таковое, по своей природе, течет одинаково, вне зависимости от чего-либо внешнего». Когда писал эти строки, Ньютон не думал, конечно же, что утверждает нечто новое или нечто открытое для дискуссии, он просто формулировал точным языком понятия «пространства» и «время», какими они представлялись любому здравомыслящему человеку. Собственно, вера в правильность этих классических представлений о пространстве и времени была настолько абсолютна, что они часто воспринимались философами *априори*, и ни один ученый (не говоря уже об обычных людях) никогда не рассматривал возможность того, что эти представления могут быть ложными и, следовательно, нуждаются в пересмотре и переформулировании. Почему же тогда нам следует пересмотреть этот вопрос теперь?

Ответ заключается в том, что отказ от классических представлений о пространстве и времени и их объединение в единую четырехмерную картину были продиктованы не каким-то чисто эстетическим желанием Эйнштейна и не его неуемным математическим гением, а упрямыми фактами, которые постоянно всплывали в экспериментальных исследованиях и просто не вписывались в классическую картину независимых пространства и времени.

Первый удар по самым основам прекрасного и вечного замка классической физики, — удар, который сотряс практически каждый камень этого искусно возведенного здания и обрушил стены его, как звуки труб Иисуса Навина обрушили стены Иерихона, — нанес незамысловатый, казалось бы, эксперимент, проведенный в 1887 году американским физиком А. А. Майкельсоном. Идея эксперимента Майкельсона очень проста и основывается на физической картине, согласно которой свет представляет собой не-

кое волновое движение, распространяющееся в так называемом светоносном эфире — гипотетической среде, равномерно заполняющей как межзвездное пространство, так и пространства между атомами во всех материальных телах.

Бросьте камень в пруд, и по воде пойдут круги — волны, распространяющиеся во всех направлениях. Свет, исходящий от любого яркого тела, расходится подобными же волнами, как и звук от вибрирующего камертонов. Но, в то время как поверхностные волны представляют собой движение частиц воды, а звуковые волны, как известно, являются колебаниями воздуха или других материалов, в которых распространяется звук, мы не можем найти никакую материальную среду, которая отвечает за перенос световых волн. В самом деле, пространство, в котором с такой легкостью (в отличие от звука) распространяется свет, кажется совершенно пустым!

Поскольку, однако, представляется довольно нелогичным говорить о чем-то, что колеблется, когда колебаться нечему, физики, пытаясь объяснить распространение света, вынуждены были ввести новое понятие — «светоносный эфир», чтобы обеспечить глагол «колебаться» именем существительным. С чисто грамматической точки зрения, которая требует, чтобы любой глагол непременно имел при себе субъект, существование «светоносного эфира» отрицать невозможно. Но — и это очень большое «но» — грамматика не определяет, да и не может определять, физические свойства имен существительных, которые обязаны присутствовать в правильно построенном предложении!

Если мы говорим, что свет состоит из волн, проходящих в световом эфире, определяя «световой эфир» как *то*, в чем распространяются световые волны, мы говорим истинную правду, хоть и произносим при этом банальную тавтологию. Совершенно другая проблема — узнать, что это за световой эфир такой и каковы его физические свойства. Здесь никакая грамматика (даже греческая!) не может нам помочь, ответ должна дать наука физика.

Как мы увидим в ходе нижеследующего обсуждения, величайшая ошибка физики девятнадцатого века состояла в предположении, что световой эфир обладает свойствами, очень похожими на свойства знакомых нам обычных физических веществ. Раньше говорили о текучести, жесткости, различных упругих свойствах и даже силе внутреннего трения светового эфира. Таким образом, тот факт, например, что при распространении световых волн све-

товой эфир ведет себя, с одной стороны, как колеблющееся твердое тело*, а с другой стороны, демонстрирует идеальную текучесть и полное отсутствие какого-либо сопротивления движению небесных тел, объясняется сравнением его с такими веществами, как сургуч. На самом деле сургуч и другие подобные вещества известны как довольно твердые и ломкие, если на них воздействуют силы, возникающие при быстром механическом ударе, но, если оставить их в покое на достаточно долгое время, они растекутся, как мёд, под действием собственного веса. Следуя этой аналогии, старая физика предполагала, что световой эфир, заполняя все межзвездное пространство, в отношении очень быстрых деформаций, связанных с распространением света, действовал как твердое тело, но вел себя как типичная жидкость, когда в нем прокладывали себе путь планеты и звезды, движущиеся в тысячи раз медленнее, чем свет.

Такая антропоморфная, так сказать, точка зрения, пытавшаяся приписать совершенно неизвестному явлению, у которого до тех пор не было ничего, кроме названия, свойства известного нам обычного вещества, не оправдывала себя с самого начала. И, несмотря на множество попыток, не нашлось ни единого разумного механистического объяснения свойств таинственного носителя световых волн.

В свете наших нынешних знаний мы можем легко увидеть, где допускались ошибки в попытках подобного рода. Собственно, мы знаем, что все механические свойства обычных веществ можно проследить вплоть до взаимодействия между атомами, из которых они построены. Таким образом, например, высокая текучесть воды, эластичность резины и твердость алмаза зависят от того, что молекулы воды могут скользить друг рядом с другом без особого трения, от того, что молекулы каучука можно легко деформировать, и от того, что атомы углерода, образующие кристалл алмаза, крепко связаны друг с другом посредством жесткой решетки. Следовательно, все общие механические свойства различных веществ являются результатом их атомной структуры, но это правило теряет всякий смысл применительно к абсолютно цльному веществу, каким считается световой эфир.

* Что касается колебаний световых волн, то они оказались перпендикулярными направлению, в котором распространяется свет. В обычных материалах такие поперечные колебания возникают только в твердых телах, тогда как в жидких и газообразных веществах колеблющиеся частицы могут двигаться только вдоль направления распространения волны.

Световой эфир — вещество своеобразного типа, не имеющее сходства с атомно-мозаичной структурой, которую мы обычно называем материей. Мы можем назвать световой эфир «веществом» (лишь с одной целью — чтобы это слово служило грамматическим субъектом для глагола «колебаться»), но мы также можем назвать его «пространством», учитывая, что, как мы уже видели ранее и увидим снова, пространство способно обладать определенными морфологическими, или структурными, особенностями, которые делают его гораздо более сложным явлением, чем оно представляется в понятиях евклидовой геометрии. Собственно, в современной физике выражения «световой эфир» (лишенный приписываемых ему механических свойств) и «физическое пространство» считаются синонимами.

Но мы слишком углубились в гносеологический, или философский, анализ «светового эфира», и сейчас нам следует вернуться к теме эксперимента Майкельсона. Как мы уже говорили, идея этого эксперимента довольно проста. Если свет представляет собой волны, проходящие через эфир, на скорость света, регистрируемую приборами, находящимися на Земле, должно влиять движение нашей планеты в пространстве. Пребывая на Земле, которая мчится по своей орбите вокруг Солнца, мы должны были бы ощущать «эфирный ветер», так же, как человек, стоящий на палубе быстро движущегося корабля, чувствует дующий ему в лицо ветер, хотя погода может быть совершенно тихой. Конечно же, мы не ощущаем «эфирный ветер», поскольку для этого он должен был бы проникать без каких-либо трудностей между атомами, образующими наше тело, но мы ожидаем обнаружить его присутствие путем измерения скорости света в разных направлениях по отношению к нашему движению. Все понимают, что скорость звука, распространяющегося по ветру, выше, чем у того же звука, распространяющегося против ветра, и кажется естественным, что то же самое должно быть верно и для распространения света по эфирному ветру и против него.

Рассуждая именно так, профессор Майкельсон намеревался собрать прибор, который смог бы зарегистрировать различия в скорости света, распространяющегося в разных направлениях. Самый простой способ это осуществить — взять установку Физо, описанную выше (рис. 31С), и, поворачивая его в разных направлениях, выполнить ряд измерений. Это, однако, был не такой уж разумный способ исполнить задуманное, потому что в каждом

конкретном случае требовалась бы высокая степень точности измерения. И действительно, поскольку ожидаемая разница (равная скорости Земли) составляет всего около одной сотой процента от скорости света, мы должны выполнить каждое отдельное измерение с исключительной точностью.

Если у вас есть две длинные палки примерно одинаковой длины, и вы хотите точно знать разницу между ними, ее легче всего найти, сложив палки вместе так, чтобы их края на одном конце находились на одном уровне и измерив разницу в длине краев на другом конце. Этот метод известен как метод «нулевой точки».

Прибор Майкельсона, схематично показанный на рис. 36, использует метод нулевой точки для сравнения скоростей света в двух перпендикулярных друг к другу направлениях.

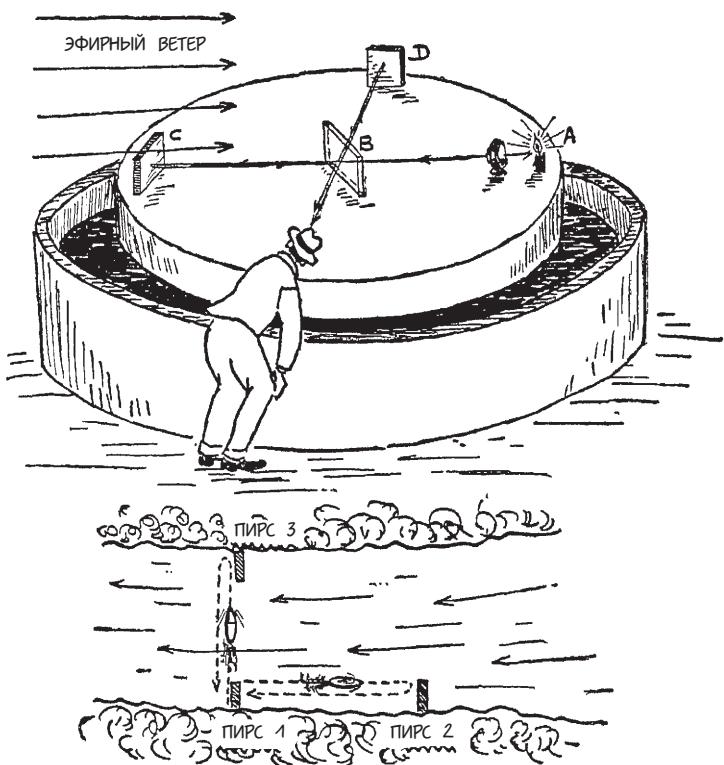


Рис. 36.

Центральный элемент этого прибора — стеклянная пластина *B*, покрытая тонким полупрозрачным слоем серебра, который отражает около 50 процентов падающего света и пропускает другие 50 процентов. Итак, световой луч, исходящий из источника *A*, разделяется на две равные части, которые движутся параллельно друг другу. Эти два луча отражаются от двух зеркал *C* и *D*, расположенных на равных расстояниях от центральной пластины, и отправляются обратно к ней. Луч, который возвращается от *D*, будет частично пропущен тонким серебряным слоем и соединится с частью луча, отразившегося от *C*, который также частично отражается серебряным слоем. Таким образом, два луча, разделенные при входе в прибор, воссоединяются, когда входят в глаз наблюдателя. По известному закону оптики, два луча будут интерферировать друг с другом, образуя систему темных и светлых полос, видимых глазом*. Если расстояния *BD* и *BC* равны и два луча возвращаются к центральной пластине одновременно, в центре интерференционной картины будет яркая полоса. Если расстояния слегка меняются и один луч задерживается относительно другого, полосы будут смешены вправо или влево.

Поскольку прибор расположен на поверхности Земли и поскольку она быстро движется в пространстве, мы должны ожидать, что эфирный ветер дует в нем со скоростью, равной скорости движения Земли. Предположив, например, что этот ветер дует в направлении от *C* к *B* (как показано на рис. 36), давайте спросим себя, какова разница в скорости двух лучей, спешащих к месту встречи.

Следует помнить, что один из этих лучей сначала идет против ветра, но затем возвращается по ветру, тогда как другой луч идет в ту и другую стороны поперек ветра. Который из них вернется первым?

Представьте реку и моторную лодку, которая движется против течения от Пирса 1 к Пирсу 2, а затем возвращается по течению к Пирсу 1. Течение препятствует лодке в первой части путешествия, но помогает ее движению на обратном пути. Вы, возможно, склонны полагать, что два действия компенсируют друг друга, но это не так. Чтобы понять это, представьте, что лодка идет со скоростью равной скорости течения. В этом случае лодка, стартующая от Пирса 1, никогда не сможет добраться до Пирса 2!

* См. также стр. 267–268

Нетрудно видеть, что наличие течения будет во всех случаях удлинять время поездки туда и обратно на коэффициент

$$\frac{1}{1 - \left(\frac{V}{v}\right)^2},$$

где v — скорость лодки, а V — скорость течения*. Таким образом, если лодка движется, например, в десять раз быстрее, чем течение, обратная поездка будет длиться дольше в

$$\frac{1}{1 - \left(\frac{1}{10}\right)^2} = \frac{1}{1 - 0,01} = \frac{1}{0,99} = 1,01 \text{ раза,}$$

то есть на 1 процент больше, чем в спокойной воде.

Аналогичным образом мы можем рассчитать также ожидаемую задержку в поездке по реке туда и обратно. Здесь задержка возникает из-за того, что, добираясь от Пирса 1 до Пирса 3, лодка должна плыть немного боком, чтобы компенсировать дрейф в движущейся воде. В этом случае задержка несколько меньше, о чем свидетельствует коэффициент:

$$\sqrt{\frac{1}{1 - \left(\frac{V}{v}\right)^2}},$$

то есть только на $\frac{1}{2}$ процента от значения из примера выше. Доказательство этой формулы очень простое, и мы оставляем его пытливому читателю. Теперь замените реку на текущий эфир, лодку на световую волну, распространяющуюся в нем, а пирсы на зеркала в двух концах, и вы получите схему эксперимента Майкельсона. Коэффициент задержки луча света, идущего от B к C и возвращающегося к B , теперь будет:

$$\frac{1}{1 - \left(\frac{V}{c}\right)^2},$$

* На деле, взяв 1 для расстояния между двумя пирсами и памятую, что суммарная скорость по течению равна $v + V$, а против течения $v - V$, мы получаем общее время поездки туда и обратно:

$$t = \frac{l}{v+V} + \frac{l}{v-V} = \frac{2vl}{(v+V)(v-V)} = \frac{2vl}{v^2 - V^2} = \frac{2l}{v} \cdot \frac{1}{1 - \frac{V^2}{v^2}}$$

где c — скорость света в эфире, тогда как свет, идущий от B к D и обратно, должен задерживаться на коэффициент

$$\sqrt{\frac{1}{1 - \left(\frac{V}{c}\right)^2}}.$$

Поскольку скорость эфирного ветра, которая равна скорости Земли, составляет 30 км в секунду, а скорость света составляет 3×10^5 км/с, оба луча должны задерживаться соответственно на 0,01 и 0,005 процента.

Следовательно, с помощью аппарата Майкельсона нетрудно было бы увидеть разницу в скоростях лучей света, распространявшихся по эфирному ветру и против него.

Можете себе представить удивление Майкельсона, когда в ходе эксперимента он не смог заметить даже малейшего смещения интерференционных полос.

Очевидно, эфирный ветер не влиял на скорость света независимо от того, распространялся ли свет по ветру или против него.

Реальность оказалась настолько ошеломляющей, что Майкельсон и сам сначала не поверил, но кропотливые повторения эксперимента не оставили сомнений: результат, который он получил в первый раз, каким бы ошеломляющим ни был, оказался верен.

Единственное возможное объяснение этого неожиданного результата заключалось, вероятно, в смелом предположении, что массивный каменный стол, на котором были установлены зеркала Майкельсона, слегка уменьшился (так называемое сокращение Фицджеральда*) в направлении движения Земли в пространстве. На самом же деле, если расстояние BC сокращается на коэффициент

$$\sqrt{1 - \frac{V^2}{c^2}},$$

тогда как расстояние BD остается неизменным, задержки обоих световых лучей становятся равными и никакого смещения интерференционных полос не ожидается.

* Названо так по имени физика, который впервые ввел это понятие, рассматривая его как чисто механический эффект движения.

Однако легче было предположить возможность того, что стол Майкельсона уменьшился, чем постичь подобное. Это правда, мы действительно ожидаем некоторого сокращения материальных тел, движущихся в сопротивляющейся среде. Например, моторная лодка, мчащаяся по озеру, немного сжата между движущей силой гребного винта на корме и сопротивлением воды в носовой части. Но степень такого механического сокращения зависит от прочности материала, из которого изготовлена лодка. Металлическая лодка будет сжата в меньшей степени, чем деревянная. Но вариации сокращения, которое было ответственно за отрицательные результаты в эксперименте Майкельсона, зависят только от скорости движения, а никак не от прочности материалов. Будь стол, к которому крепились зеркала, сделан не из камня, а из чугуна, дерева или любого другого материала, величина сокращения была бы точно такой же. Таким образом, становится ясно, что здесь мы имеем дело с *универсальным эффектом*, который заставляет все движущиеся тела сокращаться в одинаковой степени. Профессор Эйнштейн описал данный феномен в 1904 году, и сделал он это так: здесь мы имеем дело с сокращением самого пространства, и все материальные тела, движущиеся с одинаковой скоростью, сокращаются одинаково просто потому, что включены в одно и то же сокращенное пространство.

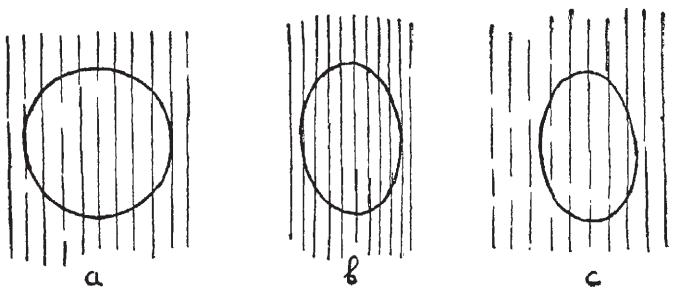


Рис. 37.

В последних двух главах о свойствах пространства было сказано достаточно, чтобы вышеприведенное утверждение звучало разумно. Чтобы прояснить ситуацию, мы можем представить, что пространство имеет некоторые свойства упругого желе, сквозь которое просматриваются очертания различных тел. Когда пространство деформируется сжатием, растягиванием или скручиванием, формы всех тел, включенных в него, автоматически меня-

ются подобным же образом. Деформации материальных тел, вызванные деформацией пространства, следует отличать от индивидуальных деформаций, вызванных различными внешними силами, которые создают в тела внутренние напряжение и давление, что тела и деформирует. Изучение рис. 37, который представляет пример из двух измерений, поможет, вероятно, объяснить эту важную разницу.

Тем не менее эффект сокращения пространства, хоть он и имеет фундаментальное значение в понимании основных принципов физики, совершенно незаметен в обычной жизни, поскольку самые высокие скорости, которые влияют на нас в повседневном опыте, по-прежнему ничтожно малы по сравнению со скоростью света. Так, например, автомобиль, перемещающийся со скоростью 50 миль в час, сокращается в длине на коэффициент $\sqrt{1 - (10^{-7})^2} = 0,999999999999999$, что соответствует сокращению длины от бампера до бампера лишь на *диаметр одного атомного ядра!* Реактивный самолет, летящий на скорости свыше 600 миль в час, сокращается всего лишь на диаметр одного атома, а межзвездный космический корабль длиной 100 м, мчащийся со скоростью более 25 000 миль в час, — на одну сотую миллиметра.

Однако, если мы сможем представить объекты, движущиеся со скоростью в 50, 90 и 99 процентов от скорости света, их длина уменьшится, соответственно, до 86, 45 и 14 процентов от их размера в состоянии покоя на Земле.

Лимерик ниже, написанный неизвестным автором, отдает дань эффекту релятивистского сокращения быстро движущихся объектов:

«Парень по фамилии Фиск
Прославился как бойкий рапирист.
Быстрые его движения,
Вызвав фицджеральдово сокращение,
Рапири Фиска превратили в диск».

Должно быть, этот мистер Фиск и в самом деле фехтовал со световой скоростью!

С точки зрения четырехмерной геометрии наблюдаемое универсальное уменьшение всех движущихся объектов объясняется простым изменением пространственной проекции инвариантной четырехмерной длины, вызванным поворотом пространственно-временной системы координат. Собственно, вы должны помнить

из предыдущего параграфа, что наблюдения, сделанные в движущихся системах, следует описывать с помощью координат, в которых оси пространства и времени поворачиваются на определенный угол в зависимости от скорости. Таким образом, если в состоянии покоя у нас было определенное четырехмерное разделение, спроектированное на пространственную ось на сто процентов (рис. 38 a), его пространственная проекция на новую временную ось (рис. 38 b) всегда будет короче.

Важно помнить: в двух системах, движущихся друг относительно друга, ожидаемое уменьшение длины полностью относительно. Если мы рассматриваем объект, который находится в состоянии покоя по отношению ко второй системе, тем самым являясь инвариантной линией, параллельной новой пространственной оси, то его проекция на старую ось уменьшится на тот же коэффициент.

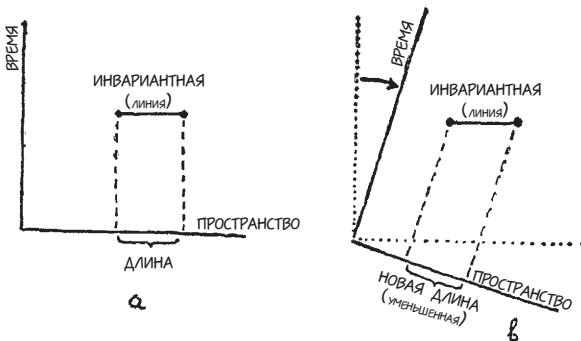


Рис. 38.

Следовательно, нет никакой необходимости и, собственно, никакого физического смысла в точном указании, какая из двух систем находится в движении «на самом деле». Единственно, что важно, — они находятся в движении друг относительно друга. Таким образом, если бы два пассажирских космических корабля из какого-нибудь будущего ООО «Межпланетные сообщения», двигаясь с огромной скоростью, встретились где-нибудь в космосе между Землей и Сатурном, пассажиры каждого из кораблей могли бы увидеть через иллюминаторы, что другой корабль значительно сжался, в то время как сжатия своего собственного не заметили бы. И было бы совершенно бесполезно спорить, какой из кораблей сжался «на самом деле», так как с точки зрения пас-

сажиров обоих кораблей, если смотреть на чужой корабль — то сжались оба, если же смотреть на свой — то ни один*.

Мышление в терминах четырех измерений также позволяет нам понять, почему релятивистское сокращение движущихся объектов становится заметным только тогда, когда их скорость приближается к скорости света. Собственно, угол поворота пространственно-временной системы координат обусловлен соотношением расстояния, пройденного движущейся системой, и времени, необходимого для преодоления этого расстояния. Если мы измеряем расстояние в футах, а время в секундах, это соотношение будет не чем иным, как обычной скоростью, выраженной в футах в секунду. Поскольку, однако, временные интервалы в четырехмерном мире представлены обычным интервалом времени, умноженным на скорость света, соотношение, определяющее угол поворота, на самом деле скорость движения в футах в секунду, деленная на скорость света в тех же единицах.

Поэтому угол поворота и его влияние на измерение расстояний становится заметным, только когда относительная скорость двух движущихся систем приближается к скорости света.

Поворот пространственно-временной системы координат влияет на измерение временных интервалов так же, как и на измерение длин. Однако можно показать, что, когда пространственные расстояния сокращаются, временные интервалы — из-за своеобразной мнимой природы четвертой координаты — растягиваются**. Часы, установленные на быстро движущейся машине, будут идти несколько медленнее, чем аналогичные часы, пребывающие в неподвижности, так что временной интервал между «тик» и «так» удлинится. Точно так же, как и в случае уменьшения длины, замедление часов, находящихся в движении, — универсальный эффект, зависящий только от скорости движения. Современные наручные часы, старомодные дедушкины часы с маятником или песочные часы замедлятся совершенно одинаково, если будут двигаться с одинаковой скоростью. Этот эффект не огранич

* Это все в теории конечно. На самом деле, если бы два космических корабля пролетели друг мимо друга, перемещаясь на таких скоростях, какие мы здесь рассматриваем, пассажиры на любом из кораблей вообще были бы не в состоянии увидеть другой, как вы не можете увидеть пулю, выпущенную из винтовки, а ведь ее скорость составляет лишь мизерную долю от скорости этих кораблей.

** Или, если угодно, потому что формула Пифагора в четырехмерном пространстве меняется из-за времени.

чивается, конечно же, специальными механическими приборами, которые мы называем «часами»; на самом деле в той же степени замедляются все физические, химические или биологические процессы. Поэтому нет нужды опасаться, что, готовя яйца на завтрак в быстроходном космическом корабле, вы их переварите из-за того, что ваши часы идут слишком медленно; процессы внутри яйца замедляются соответственно, поэтому, если держать их в кипящей воде в течение пяти минут по вашим часам, вы получите то же самое, что всегда знали как «пятиминутные яйца». Мы используем в качестве примера вместо вагона-ресторана космический корабль, потому что, как и в случае с сокращением длины, растяжение времени становится заметным только при скоростях, приближающихся к скорости света. Это растяжение времени определяется тем же коэффициентом

$$\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}},$$

как и сокращение пространства, с той разницей, что здесь вы используете его не как множитель, а как делитель; если вы станете двигаться настолько быстро, что длина сократится наполовину, то временные интервалы увеличатся вдвое.

Когда речь идет о межзвездных путешествиях, замедление времени в движущихся системах имеет интересное следствие. Предположим, вы решили посетить один из спутников Сириуса, который находится от Солнечной системы на расстоянии в девять световых лет, и использовать для вашей поездки космический корабль, способный двигаться практически со скоростью света. Естественно, вы бы намеревались взять с собой большой запас еды, так как путешествие к Сириусу и обратно займет у вас как минимум восемнадцать лет. Такая предусмотрительность, однако, оказалась бы абсолютно ненужной, если бы механизм корабля позволил вам путешествовать со скоростью, приближающейся к световой. Собственно, если вы двигаетесь, например, со скоростью 99,9999999 процента от скорости света, ваши наручные часы, ваше сердце, ваши легкие, ваше пищеварение и ваши мыслительные процессы будут замедлены в 70 000 раз, а 18 световых лет (с точки зрения людей оставшихся на Земле) необходимых, чтобы покрыть расстояние от Земли до Сириуса и обратно, покажутся вам всего лишь несколькими часами. Итак, оставив Землю сразу после

завтрака, ваш корабль приземлится на одной из планет Сириуса уже ко времени ланча. Если вы поспешите и отправитесь домой сразу после обеда, то, по всей вероятности, вернетесь на Землю как раз к ужину. Но по прибытии домой — и здесь вас поджидает большой сюрприз, если вы забыли законы относительности — вы обнаружите, что ваши друзья и родственники смирились с вашей потерей в межзвездных пространствах и съели 6570 обедов без вас! 18 земных лет оказались для вас всего лишь 1 днем благодаря тому, что вы перемещались со скоростью, близкой к скорости света.

А как насчет того, чтобы попытаться двигаться быстрее света? Частично ответ на этот вопрос можно найти в другом релятивистском лимерике:

«Девица прекрасная Грэта
Летала стрелой быстрой света.
Умчавшись раз к морю,
По Эйнштейна теории,
Вернулась днем раньше до рассвета».

Бессспорно, если скорости, приближающиеся к скорости света, заставляют время в движущейся системе течь медленнее, сверхсветовая скорость должна повернуть время вспять! Кроме того, вследствие изменения алгебраического знака под пифагоровым радикалом, координата времени стала бы действительной и тем самым указывала бы на расстояние в пространстве, подобным же образом все длины в системе сверхсветовой скорости, пройдя через ноль и став мнимыми, превратились таким образом во времененные интервалы.

Будь все это возможно, изображение на рис. 33, показывающее Эйнштейна, который превращает линейку в будильник, соответствовало бы действительности, при условии, что во время этого представления он развил бы сверхсветовую скорость!

Но физический мир, каким бы безумным он ни был, безумен не *настолько*, и очевидную невозможность такой черной магии можно подытожить в утверждении, что *ни один материальный объект не может двигаться со скоростью, равной или превышающей скорость света**.

* Точнее — скорость света в вакууме. Скорость распространения света в среде (газе, жидкости, стекле и пр.) ниже указанного значения. Поэтому становятся возможными явления типа излучения Вавилова-Черенкова, вызванного движением частицы со скоростью, превышающей скорость света в данной среде.

Физическое обоснование этого основного закона природы заключается в факте, который доказали многочисленные прямые эксперименты: *так называемая инерционная масса движущихся объектов, которая измеряет их механическое сопротивление дальнейшему ускорению, беспрепятственно увеличивается, когда скорость движения приближается к скорости света.* Таким образом, если револьверная пуля движется со скоростью 99,9999999 процента от скорости света, ее сопротивление дальнейшему ускорению эквивалентно сопротивлению 12-дюймового артиллерийского снаряда. А на скорости 99,999999999999 процента от скорости света, маленькая пуля будет оказывать то же инерционное сопротивление, что и тяжело груженный товарный вагон. Какие бы большие усилия ни были бы приложены к пуле, мы никогда не сможем одолеть последний десятичный знак и сделать ее скорость в точности равной верхнему пределу скорости всякого движения во Вселенной!

3. ИСКРИВЛЕННОЕ ПРОСТРАНСТВО И ТАЙНА ГРАВИТАЦИИ

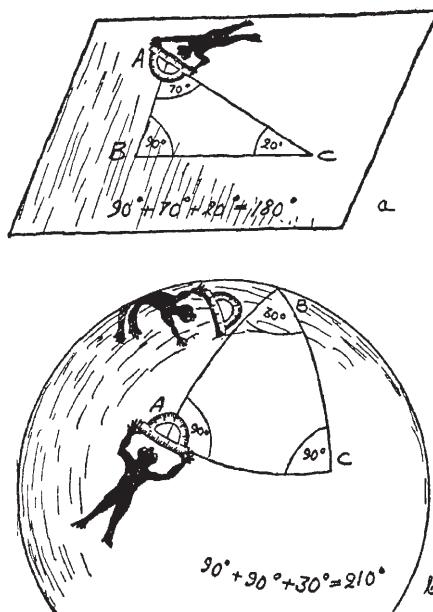


Рис. 39. Двумерные учёные из плоских и искривленных «миров-поверхностей» проверяют теорему Евклида о сумме углов треугольника.

С должным покаянием и соответствующими извинениями перед бедным читателем, который, читая последние двадцать страниц, вероятно, чувствовал себя так, как если бы он спотыкался обо все четыре оси координат, — мы приглашаем его теперь прогуляться в искривленном пространстве. Все знают, что такое кривая линия и кривая поверхность, но что имеется в виду под выражением «кривое пространство»? Трудность, с которой сталкиваешься, пытаясь представить себе такое явление, заключается не столько в необычности концепции, сколько в том, что, в то время как на кривые линии и искривленные поверхности мы можем смотреть снаружи, кривизну трехмерного пространства приходится наблюдать *изнутри*, так как мы сами находимся внутри. В попытке понять, как трехмерный человек может постичь кривизну пространства, в котором он живет, давайте сначала рассмотрим гипотетическую ситуацию с двумерными теневыми существами, живущими на поверхности. На рис. 39a и 39b мы видим теневых ученых плоского и искривленного (сферического) «миров-поверхностей», изучающих геометрию своих двумерных пространств. Самая простая геометрическая фигура для изучения — это, конечно же, треугольник, то есть фигура, образованная тремя прямыми, соединяющими геометрические точки. Как все, должно быть, помнят из геометрии средней школы, сумма трех углов любого треугольника на плоскости всегда равна 180° . Легко видеть, однако, что вышеприведенная теорема не распространяется на треугольники, лежащие на поверхности сферы. И действительно, сферический треугольник, образованный двумя географическими меридианами (отходящими от полюса) и параллелью (тоже в географическом смысле), пересекающей их, имеет два прямых угла в основании и может иметь любой угол между нулем и 360° у вершины. В конкретном примере на рис. 39b, который изучают два теневых ученых, сумма трех углов равна 210° . Таким образом, мы видим, что, измеряя геометрические фигуры в своем двумерном мире, теневые ученые могут обнаружить его кривизну, даже не взглянув на него снаружи.

Применяя приведенные выше наблюдения к миру, который имеет еще одно измерение, мы вполне естественно приходим к выводу, что *человеческие ученые, живущие в трехмерном пространстве, могут определить кривизну этого пространства, не выпрыгивая в четвертое измерение, а просто измерив в своем про-*

пространстве углы между прямыми линиями, соединяющими три точки. Если сумма трех углов равна 180° , пространство плоское, в ином случае пространство должно быть искривленным.

Но, прежде чем мы расширим дискуссию, нам необходимо обсудить некоторые детали того, что именно подразумевается под выражением *прямая линия*. Глядя на два треугольника, показанных на рис. 39a и 39b, читатель, вероятно, скажет, что стороны треугольника на плоскости (рис. 39a) по-настоящему прямые линии, стороны же на сфере (рис. 39b) на самом деле кривые линии, так как представляют собой дуги больших кругов*, присущие сферической поверхности.

Подобное утверждение, основанное на геометрических идеях, продиктованных здравым смыслом, отрицало бы для теневых ученых любую возможность развивать геометрию своего двумерного пространства. Понятие прямой линии нуждается в общем математическом определении, которое не только не затронет евклидову геометрию, но которое также можно расширить, включив в него линии на поверхностях и в пространствах более сложной природы. Такое обобщение можно получить путем *определения «прямой линии» как линии, представляющей кратчайшее расстояние между двумя точками на соответствующей поверхности или пространстве, в котором она проведена*. В геометрии на плоскости приведенное выше определение совпадает, конечно же, с общим понятием прямой линии, в то время как в более сложных случаях искривленных поверхностей оно приводит к определенному семейству линий, которые играют ту же роль, что и обычные «прямые линии» геометрии Евклида. Чтобы избежать недоразумений, линии, представляющие кратчайшие расстояния на искривленных поверхностях, часто называют *геодезические линии*, потому что это понятие впервые ввела *геодезия* — наука об изменениях на поверхности Земли. Собственно, когда мы говорим о прямом расстоянии между Нью-Йорком и Сан-Франциско, мы имеем в виду «прямое, как полет вороны» — следуя изгибу земной поверхности, а не так, как продвигался бы сквозь толщу земли гипотетический гигантский шахтерский бур — просверливая себе путь строго по прямой.

* Большие круги — это круги, образующиеся сечением сферы плоскостью, проходящей через центр сферы. Большиими кругами являются, например, экватор и меридианы.

Вышеприведенное определение «обобщенной прямой линии», или «геодезической», как кратчайшего расстояния между двумя точками предполагает простой физический метод построения таких линий *натяжением струны между рассматриваемыми точками*. Если вы сделаете это на плоской поверхности, вы проведете обычную прямую линию, сделав это на сфере, вы обнаружите, что струна тянется по дуге большого круга, которая соответствует геодезической линии сферической поверхности.

Надо полагать, аналогичным образом можно выяснить, является ли трехмерное пространство, в котором мы живем, плоским или искривленным. Все, что нужно сделать, — это натянуть струны между тремя точками в пространстве и посмотреть, равна или не равна сумма образованных таким образом углов 180° . Планируя такого рода эксперимент, мы должны помнить, однако, два важных момента. Эксперимент необходимо проводить в довольно большом масштабе, так как очень малая часть искривленной поверхности или пространства может показаться нам довольно плоской; очевидно, что мы не сможем установить кривизну земной поверхности по измерениям, сделанным на наших задних дворах! Далее, поверхность или пространство может быть плоским в одних местах и искривленным в других, так что может понадобиться разведка местности.

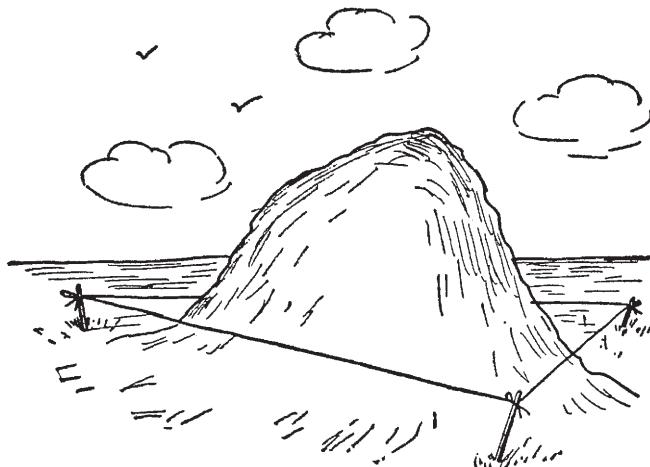


Рис. 40а.

Эйнштейн заложил в основание своей общей теории искривленного пространства отличную идею, и заключается она в предположении, что *физическое пространство искривляется вблизи от больших масс*; чем больше масса, тем больше кривизна. В попытке проверить такую гипотезу экспериментально мы можем натянуть струну между тремя колышками, вбитыми в землю вокруг какого-нибудь красивого большого холма (рис. 40a), и измерить углы, образованные струнами. Выберите самый большой холм, который только сможете отыскать, еще лучше — одну из Гималайских гор, и вы найдете, что, учитывая возможные ошибки в ваших измерениях, сумма трех углов, образованных струнами, будет точно 180° . Однако этот результат не означает, что Эйнштейн не прав и присутствие больших масс не искривляет пространство вокруг них. Возможно, даже Гималаи не делают окружающее пространство искривленным достаточно, чтобы наши измерительные приборы, какими бы точными они ни были на сегодняшний день, зарегистрировали отклонение. Помните о фиаско, которое потерпел Галилей, когда попытался измерить скорость света посредством фонаря с заслонкой! (Рис. 31.)

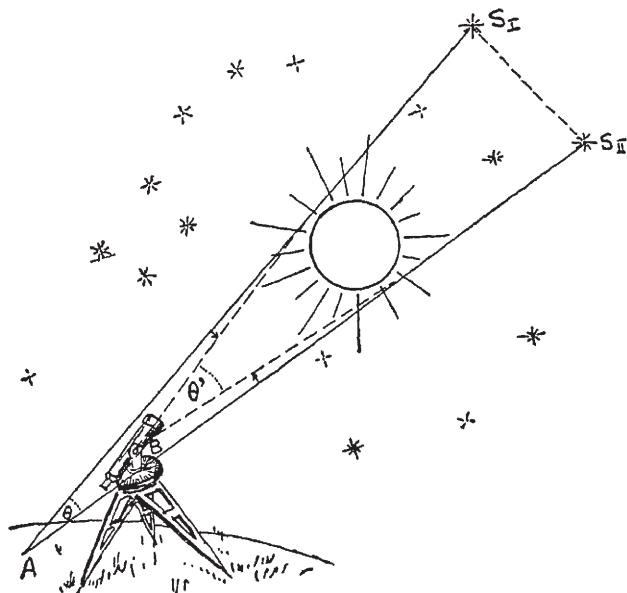


Рис. 40b.

Словом, это не должно вас обескуражить, вам просто следует попробовать еще раз, с гораздо большей массой, например с Солнцем.

И вот он, успех! Если вы протяните струну от некой точки на Земле к какой-нибудь звезде, затем к другой звезде и назад к исходной точке на Земле, выбирая звезды так, чтобы Солнце оказалось заключенным в треугольник, образованный струнами, — вы найдете, что сумма трех углов будет *значительно отличаться* от 180° . Если у вас нет достаточно длинной для такого эксперимента струны, замените ее лучом света, который ничуть не хуже струны, так как оптика учит нас, что свет всегда выбирает *кратчайший из возможных путей*.

Такой эксперимент — по измерению углов, образованных лучами света — схематически представлен на рис. 40б. Лучи света от двух звезд S_1 и S_{II} , расположенных (в момент наблюдения) по обеим сторонам от солнечного диска, сходятся в теодолите, который измеряет угол между ними.

Эксперимент повторяется, когда Солнце уйдет из того положения, в котором производилось измерение, после чего два угла сравниваются. Если они разные, у нас есть доказательства того, что масса Солнца меняет кривизну окружающего его пространства, тем самым вызывая отклонение лучей света от первоначальных путей. Эйнштейн первым предложил идею такого эксперимента: он хотел проверить свою теорию. Читатель может лучше понять ситуацию, сравнивая ее с двумерной аналогией, показанной на рис. 41.

Очевидно, что при обычных условиях на практике существовало препятствие для проверки предположения Эйнштейна: звезды нельзя увидеть из-за света Солнца, — но во время полного солнечного затмения звезды хорошо видны и в дневное время. Воспользовавшись этим обстоятельством, в 1919 году британская астрономическая экспедиция и в самом деле провела такую проверку на островах Принсипи (Западная Африка), на которых полное солнечное затмение того года наблюдалось лучше всего. Разница угловых расстояний между двумя звездами с Солнцем и без него оказалась равна $1,61'' \pm 0,30''$ по сравнению с $1,75''$, которая предполагалась теорией Эйнштейна. Аналогичные результаты получили впоследствии и другие экспедиции.

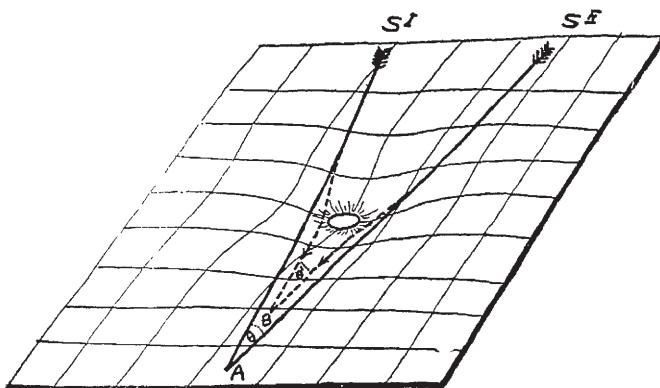


Рис. 41.

Конечно, полторы угловые секунды — так себе угол, но и его достаточно, чтобы доказать, что масса Солнца все-таки заставляет пространство вокруг себя искривляться.

Если бы вместо Солнца мы могли использовать какую-то другую, гораздо большую звезду, теорема Евклида о сумме трех углов треугольника ошибалась бы на угловые минуты, а то и на градусы.

Требуется некоторое время и богатое воображение, чтобы освоить понятие искривленного трехмерного пространства, рассматривая его в качестве наблюдателя изнутри, но как только это произойдет, оно станет таким же четким и определенным, как и любое другое уже знакомое понятие из классической геометрии.

Теперь нам осталось сделать лишь еще один важный шаг для того, чтобы полностью понять теорию Эйнштейна об искривленном пространстве и ее связь с фундаментальной проблемой всемирного тяготения. Для этого нужно помнить, что трехмерное пространство представляет собой только часть четырехмерного мира пространства-времени, который служит фоном для всех физических явлений. Таким образом, собственно искривление пространства, должно быть, лишь отражение более общего искривления четырехмерного мира пространства-времени, а *четырехмерные мировые линии, представляющие движение световых лучей и материальных объектов в этом мире, в сверхпространстве должны рассматриваться как кривые линии.*

Рассматривая вопрос с этой точки зрения, Эйнштейн пришел к замечательному заключению, что *явление гравитации — лишь*

эффект искривления четырехмерного мира пространства-времени. Собственно, мы можем теперь отбросить как не отвечающее требованиям старое утверждение, что Солнце непосредственно воздействует определенной силой на планеты, заставляя их описывать круговые орбиты вокруг себя. Точнее говоря, *масса Солнца искривляет мир пространства-времени вокруг себя, а мировые линии планет выглядят так, как изображено на рис. 30, только потому, что являются геодезическими линиями, проходящими в искривленном пространстве.*

Таким образом, понятие гравитации как самостоятельной силы полностью исчезает из наших рассуждений и заменяется понятиями чистой геометрии пространства, в котором все материальные объекты двигаются по «прямым линиям», или геодезическим, следуя искривлению, вызванному присутствием больших масс.

4. ЗАМКНУТЫЕ И ОТКРЫТЫЕ ПРОСТРАНСТВА

Мы не можем завершить эту главу, не затронув, хотя бы кратко, другую важную проблему эйнштейновской геометрии пространства-времени — дилемму о конечной и бесконечной Вселенной.

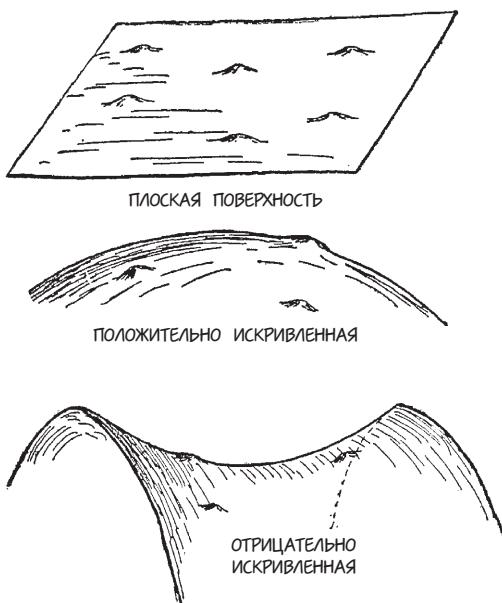


Рис. 42.

До сих пор мы обсуждали локальное искривление пространства по соседству с большими массами — множество «пространственных прыщиков», разбросанных по гигантскому лицу Вселенной. Но, если оставить в стороне эти локальные отклонения, является ли лицо Вселенной плоским или искривленным, и если да, то каким образом? На рис. 42 мы даем двумерную иллюстрацию плоского пространства с «прышками» и двумя возможными типами искривленного пространства. Так называемое положительно искривленное пространство соответствует поверхности сферы или любого другой замкнутой геометрической фигуры и изгибаются одним и тем же образом независимо от направления изгиба. Противоположный тип пространства — «отрицательно искривленное»: оно изгибаются вверх в одном направлении и вниз — в другом, сильно напоминая поверхность ковбойского седла. Отличие между двумя типами искривлений легко понять, если вырезать два куска кожи — один из футбольного мяча, другой из седла — и попытаться расправить их на столе. Вы увидите, что ни один нельзя выпрямить, не растягивая либо не уменьшая его, но, в то время как часть футбольного мяча нужно растянуть по краям, часть седла необходимо уменьшить. У части футбольного мяча недостаточно материала на периферии от центра, и это мешает расправить ее полностью; у седла же — слишком много, и всякий раз, как мы пытаемся эту часть разгладить, она собирается складками.

Мы можем сформулировать ту же самую точку зрения другим способом. Предположим, мы подсчитаем количество «прыщиков», расположенных от определенной точки в пределах одного, двух, трех и так далее дюймов (считываются по поверхности). На плоской, неискривленной поверхности количество прыщиков будет увеличиваться как квадрат расстояний, то есть как 1, 4, 9 и так далее. На сферической поверхности количество прыщиков будет увеличиваться медленнее, чем на плоской, а на «седельной» — быстрее. Таким образом, двумерные теневые ученые, живущие *на* поверхности (и по этой причине не имеющие никакой возможности посмотреть на нее со стороны) будут тем не менее в состоянии определить кривизну и узнать ее форму путем подсчета количества «прыщиков», которые попадают в круги с разными радиусами. Следует также отметить, что разница между положительным и отрицательным искривлениями обнаруживается и в измерениях углов в соответствующих треугольниках. Как мы видели ранее, сумма углов треугольника, нарисованного на по-

258 ГЕОРГИЙ ГАМОВ. ОДИН, ДВА, ТРИ... БЕСКОНЕЧНОСТЬ

верхности сферы, всегда *больше* 180° . Если вы попытаетесь нарисовать треугольник на поверхности седла, вы обнаружите, что сумма его углов всегда *меньше* 180° .

Вышеуказанные результаты, полученные для искривленных поверхностей, можно обобщить для искривленных трехмерных пространств в таблице, показанной ниже.

Тип пространства	Поведение на больших расстояниях	Сумма углов треугольника	Увеличение объема сферы
Положительно искривленное (аналог сферы)	Замыкается само на себя	$> 180^\circ$	Медленнее, чем куб радиуса
Плоское (аналог плоскости)	Простирается до бесконечности	$= 180^\circ$	Как куб радиуса
Отрицательно искривленное (аналог седла)	Простирается до бесконечности	$< 180^\circ$	Быстрее, чем куб радиуса

Таблицу можно также использовать для поиска практического ответа на вопрос, является ли пространство, где мы живем, конечным или бесконечным; вопрос этот мы обсудим в главе X, в которой рассматриваются размеры Вселенной.

Часть III

Микрокосмос



Глава VI

Лестница, ведущая вниз

1. ГРЕЧЕСКАЯ ИДЕЯ

Анализ свойств материальных тел стоит, пожалуй, начать с какого-нибудь хорошо знакомого нам объекта «нормального размера», а затем шаг за шагом углубляясь в его внутреннее строение — туда, где скрывается от людских глаз первоисточник всех материальных свойств. Итак, давайте начнем наше обсуждение с тарелки супа с моллюсками, поданной вам на обед. Мы выбрали суп с моллюсками не только из-за того, что он вкусен и полезен, сколько потому, что он является прекрасным примером *гетерогенного* вещества. Даже без помощи микроскопа видно, что он представляет собой смесь большого количества различных ингредиентов: маленькие ломтики моллюсков, кусочки лука, помидоров и сельдерея, мелкие картофельные гранулы, крупинки перца, шарики жира, и все это перемешано в водно-солевом растворе.

Большинство веществ, особенно органических, с которыми мы встречаемся в жизни, являются гетерогенными, хотя во многих случаях мы нуждаемся в помощи микроскопа, чтобы это осознать. Даже небольшое увеличение покажет, что молоко, например, —

это жидккая эмульсия, образованная маленькими капельками масла, взвешенными в однородной беловатой жидкости.

Обычная садовая почва представляет собой мелкозернистую смесь частиц известняка, каолина, кварца, оксида железа и других минералов и солей, а также различных органических веществ, возникших в результате разложения растительной и животной материи. И если мы очистим поверхность обычного гранитного камня, мы увидим, что его образуют маленькие кристаллы трех разных веществ (кварца, полевого шпата и слюды), слитых воедино в твердое тело.

В нашем исследовании внутреннего строения материи состав гетерогенных веществ является лишь первым шагом, или, скорее, верхней площадкой лестницы, ведущей вниз. И в случае каждого такого вещества мы можем перейти к непосредственному изучению отдельных *гомогенных* ингредиентов, образующих смесь. Из действительно гомогенных веществ, таких как кусок медной проволоки, стакан воды либо воздух*, заполняющий комнату (рассматривается, конечно же, отдельно от взвешенной в нем пыли), никакое микроскопическое изучение не покажет ни единого следа составных частей, и вещество будет выглядеть от и до полностью одинаковым. Правда, в случае медной проволоки, как и в случае практически любого твердого тела (кроме тел из стекловидных материалов, которые не кристаллизуются), сильное увеличение всегда выявляет так называемую микрокристаллическую структуру. Но отдельные кристаллы, которые мы видим в гомогенных веществах, все одной природы: кристаллы меди в медной проволоке, кристаллы алюминия в алюминиевых кастрюлях и так далее, точно так же, как в горсти плотно спрессованной поваренной соли мы найдем только кристаллы хлорида натрия. Используя специальную технику (медленной кристаллизации), мы можем увеличить размер кристаллов соли, меди, алюминия или любого другого гомогенного вещества до любой желаемой степени, и фрагмент такого «монокристаллического» вещества будет столь же гомогенным от и до, как вода или стекло.

Подтвердится ли наблюдение (невооруженным глазом или с помощью лучших из доступных нам микроскопов), предположение, что вещества, которые мы называем гомогенными, будут выглядеть одинаково независимо от того, какая степень увеличе-

* Воздух представляет собой смесь разных газов.

ния используется? Иными словами, можем ли мы полагать, что, каким бы малым ни было количество меди, соли или воды, у них всегда будут такие же свойства, как и у больших образцов, и их всегда можно будет разделить на еще меньшие фрагменты?

Греческий философ Демокрит, живший в Афинах примерно двадцать три столетия назад, был первым человеком, который сформулировал этот вопрос и попытался дать на него ответ. И ответ оказался отрицательным: он склонялся к тому, что, каким бы гомогенным данное вещество ни выглядело, его следует считать образованным большим количеством (насколько большим, он не знал) отдельных очень малых частиц (насколько малых, он тоже не знал), которые он называл «атомами», или «неделимыми». Эти атомы, или неделимые, отличались в различных веществах количеством, но их качественные различия были лишь кажущимися, а не существующими на самом деле. Атомы огня и атомы воды были на самом деле одинаковыми, различаясь только внешним видом. Без всяких сомнений — все вещества состояли из одних и тех же вечных атомов.

Современник Демокрита, Эмпедокл, имел несколько иную точку зрения, полагая, что существует несколько различных видов атомов, которые, будучи смешанными в разных пропорциях, образуют все известное многообразие веществ.

Основываясь в своих рассуждениях на элементарных фактах из химии, известных в то время, Эмпедокл признавал четыре разных типа атомов — каменные, водные, воздушные и огненные, которые соответствовали четырем предположительно элементарным веществам.

Согласно этим взглядам, почва, например, представляет собой соединение тщательно перемешанных каменного и водного веществ — и чем лучше эта смесь, тем лучше почва. Растущее дерево, для образования составных молекул деревянного вещества, соединяет атомы камня и воды с атомами огня, происходящими от лучей Солнца. Горение сухой древесины, из которой исчез элемент воды, рассматривалось как разложение или распад молекул древесины на исходные атомы огня, которые высвобождаются в пламени, и атомы камня, которые остаются в виде пепла.

Теперь мы знаем, что объяснение роста растений и горения древесины, которое выглядело вполне логичным в эпоху младенчества науки, на самом деле ошибочно. Мы знаем, что растения берут большую часть веществ, используемых для роста их тел, не

из почвы, как полагали древние и как вы тоже можете полагать, если никто еще не просветил вас на этот счет, а из воздуха. Сама почва, кроме поддержания растения и исполнения роли резервуара для хранения нужной ему воды, дает лишь крайне малую часть необходимых для роста растения солей, поэтому очень большое растение кукурузы можно вырастить в почве, которая уместилась бы в маленьком наперстке.

Правда состоит в том, что атмосферный воздух, представляющий собой смесь азота и кислорода (а не простейший элемент, как думали древние), содержит также определенное количество углекислого газа, молекулы которого образованы атомами кислорода и атомами углерода. Под действием солнечного света зеленые листья растения поглощают атмосферный углекислый газ, который вступает в реакцию с водой, поступающей через корни, и образует различные органические вещества, из которых строится тело растения. Затем кислород частично возвращается в атмосферу — процесс, благодаря которому «растения в комнате освежают воздух».

Когда дерево горит, молекулы древесины соединяются с кислородом из воздуха, вновь превращаясь в углекислый газ и водяной пар, которые высвобождаются в горячем пламени.

Что касается «атомов огня», входивших, как полагали древние, в материальную структуру растений, то их не существует. Солнечный свет поставляет только ту *энергию*, которая необходима, чтобы разложить молекулы углекислого газа, тем самым делая такую атмосферную еду легко усваиваемой для растения. И поскольку атомов огня не существует, очевидно, что их «высвобождение» не является объяснением огня, пламя — это просто концентрированный поток раскаленных газов, который становится видимым благодаря энергии, выделяющейся в процессе горения.

Давайте теперь возьмем другой пример, иллюстрирующий подобные различия между древним и современным взглядами на химические превращения. Вы, конечно же, знаете, что различные металлы получают из руд, подвергая их воздействию очень высокой температуры в плавильных печах. На первый взгляд кажется, что большинство руд не сильно отличаются от обычных камней, поэтому неудивительно, что древние ученые считали, что руды состоят из того же каменного вещества, что и любой бульдожник. Тем не менее, когда они положили кусок железной руды в огонь, то обнаружили, что из нее получилось нечто иное, нежели из

обычного камня, — некое прочное светящееся вещество, из которого можно было сделать добротные ножи и наконечники для копий. Простейший способ объяснить это явление — сказать, что металл образован соединением камня и огня или, иными словами, что молекулы металла соединяют в своем веществе атомы камня и огня.

Дав таким образом объяснение металлам в общем, они толковали различные качества различных металлов, таких как железо, медь и золото, утверждая, что атомы камня и огня входят в их состав в разных пропорциях.

Разве не было очевидно, что сияющее золото содержит больше огня, чем более темное и тусклое железо?

Но если бы это было так, почему бы не добавить больше огня железу или, что лучше, меди и тем самым превратить их в драгоценное золото? Рассуждая так, практично мыслящие алхимики Средневековья проводили большую часть своей жизни над дымными очагами, пытаясь создать «синтетическое золото» из более дешевых металлов.

С их точки зрения, подобная работа была столь же разумной, как и труд современного химика, который разрабатывает метод для производства синтетической резины; заблуждение их теории и практики заключалось в вере, что золото и другие металлы были составными, а не элементарными веществами. Но как еще можно было узнать, какое вещество является элементарным, а какое составным, если не из практики? Если бы не безуспешные попытки ранних химиков превратить железо либо медь в золото или серебро, мы могли бы никогда не узнать, что металлы — элементарные химические вещества, а металлоконтактирующие руды — составные вещества, образованные соединениями атомов металлов и кислорода (оксидов металлов, как сказал бы современный химик).

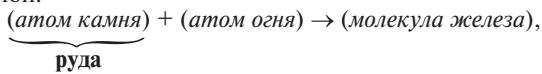
Превращение под воздействием жгучего жара доменной печи железной руды в железо происходит не вследствие соединения атомов (камня и огня), как думали древние алхимики, а совсем напротив, в результате разделения атомов, то есть удаления атомов кислорода из составных молекул оксида железа. Ржавчина, которая появляется на поверхности железных предметов, подверженных воздействию сырости, состоит не из оставшегося, после вы свобождения атомов огня, атомов камня (во время распада железного материала) а из образовавшихся, в результате соединения

атомов железа и кислорода из воздуха или воды, сложных молекул оксида железа*.

Из обсуждения выше становится ясно, что воззрения древних ученых о внутреннем строении материи и природе химических превращений были в основном правильными; их ошибка заключалась в неверном представлении о том, что являлось основными элементами. В действительности ни один из четырех видов материи, которые Эмпедокл перечислил как элементарные, элементарными не являются. Воздух представляет собой смесь нескольких разных газов, молекулы воды образуются из атомов водорода и кислорода, горные породы имеют очень сложный состав, включающий в себя большое количество различных элементов, и, наконец, атомов огня не существует вообще**.

На самом деле в природе существует не четыре, а девяносто два различных химических элемента, то есть девяносто два различных вида атомов. Одни из этих 92*** химических элементов, такие как кислород, углерод, железо и кремний (основные ингредиенты большинства горных пород), находятся на Земле в изобилии, и знакомы всем, другие — очень редки. Вы, вероятно, никогда даже не слышали о таких элементах, как празеодим, диспрозий или лантан. Кроме естественных элементов, существует несколько полностью искусственных химических элементов, которые были успешно созданы современной наукой и которые мы рассмотрим в этой книге немного позже; одному из них, известному

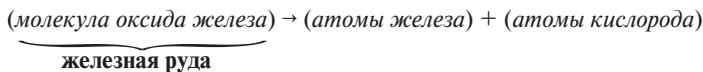
* Таким образом, алхимик выразил бы переработку железной руды формулой:



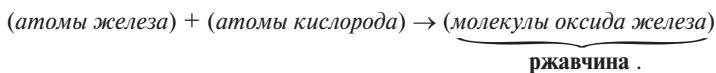
а ржавление железа формулой:



ну а мы запишем для тех же самых процессов:



а также



** Как мы увидим позже в этой главе, идея об атомах огня частично возродилась в теории светового кванта.

*** Сейчас уже открыты 105.

как *плутоний*, суждено сыграть важную роль в освобождении ядерной энергии, которую в дальнейшем можно использовать как в военных, так в мирных целях. Соединяясь друг с другом в различных пропорциях, атомы девяноста двух основных элементов образуют безграничное количество разнообразных сложных химических веществ, таких как вода и масло, нефть и почва, камни и кости, чай и тротил, и многих других, как, например, трифенилпирилийхлорид и метилизопропилцилогексан — термины, которые хороший химик должен знать наизусть, а большинство людей не стало бы и пытаться произнести на одном дыхании. И пишутся тома за томами химических справочников, в которых суммируются свойства, излагаются технологии изготовления и тому подобное, тем самым наглядно демонстрируя безграничность атомных соединений.

2. НАСКОЛЬКО ВЕЛИКИ АТОМЫ?

Когда Демокрит и Эмпедокл говорили об атомах, они, по сути, основывали свои аргументы на смутных философских идеях о невозможности представить процесс, в котором материя могла бы делиться на все более и более мелкие части, никогда не достигая неделимой единицы.

Когда современный химик говорит об атомах, он имеет в виду нечто гораздо более определенное, так как точное знание элементарных атомов и того, как они соединяются в сложные молекулы, абсолютно необходимо для понимания фундаментального закона химии, согласно которому различные химические элементы соединяются только в правильно определенных весовых пропорциях, которые должны, очевидно, отражать относительные массы отдельных атомов этих веществ. Таким образом химик, например, заключает, что атомы кислорода, алюминия и железа должны быть, соответственно, в шестнадцать, двадцать семь и пятьдесят шесть раз тяжелее атомов водорода. Но, в то время как *относительные атомные массы* различных элементов представляют собой наиболее важную часть основной химической информации, фактические массы атомов, выраженные в граммах, абсолютно несущественны в химической работе, и знание этих точных масс никак не влияет на другие химические факты или применение законов и методов химии.

Однако, когда атомы рассматривает физик, первыми у него возникают такие вопросы: «Каков фактический размер атомов в сантиметрах, сколько они весят в граммах и сколько отдельных атомов или молекул содержится в данном количестве вещества? Есть ли какие-нибудь способы наблюдать за индивидуальными атомами или молекулами, пересчитать их по одному и манипулировать ими по отдельности?»

Существует много различных способов оценки размера атомов и молекул, и самый легкий из них *настолько* прост, что Демокрит и Эмпедокл, даже не имея современного лабораторного оборудования, могли бы его использовать, случись им до него додуматься. Если наименьшей единицей в строении какого-либо материального объекта, скажем, фрагмента медной проволоки, является один атом, то должно быть очевидно, что из этого материала невозможно сделать проволоку или пластину более тонкую, чем диаметр одного его атома. Таким образом, мы можем либо попытаться растягивать медную проволоку, пока она в итоге не станет представлять собой цепочку из отдельных атомов, либо расплющить ее молотком до тонкого медного листа толщиной в один атомный диаметр. С медной проволокой или любым другим твердым материалом подобная задача практически неосуществима, потому что материал неизбежно сломается до того, как будет достигнута желаемая минимальная толщина. Но жидкое вещества, такие как тонкий слой масла на поверхности воды, могут легко растечься до, так сказать, одинарного одеяла из молекул — до пленки, в которой «отдельные» молекулы соединяются одна с другой по горизонтали, но ни одна не громоздится на другую по вертикали. Проявляя осторожность и терпение, читатель может пройти этот эксперимент сам и таким образом измерить, с помощью простых средств, размер молекулы масла.

Возьмите неглубокий длинный сосуд (рис. 43) и, чтобы он стоял абсолютно ровно, поместите на стол или на пол, заполните его водой до краев и положите поперек него проволоку, которая будет касаться поверхности воды. Далее, если вы капнете маленькую каплю чистого масла по одну сторону от проволоки, то масло растечется по всей поверхности воды, находящейся по ту сторону от проволоки, куда вы капнули масло. Если затем вы станете передвигать проволоку по краю сосуда в противоположную сторону, слой масла, следуя за проволокой, будет растекаться, становясь все тоньше и тоньше, и в конечном итоге его тол-

щина сделается равной диаметру одной молекулы масла. После достижения этой толщины любое дальнейшее продвижение проволоки приведет к разрыву сплошной поверхности масла и образованию водяных дыр. Зная количество масла, которое вы капнули в воду, и максимальную площадь, на которую оно может растечься, не разрываясь, вы легко рассчитаете диаметр одной молекулы.

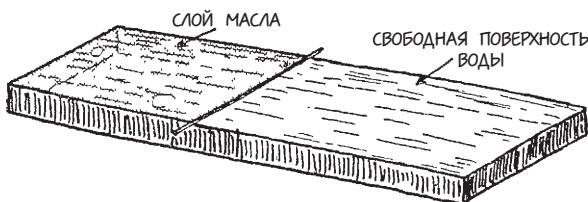


Рис. 43. Тонкий слой масла на поверхности воды разорвется, если растечется по слишком большой площади.

Проводя этот эксперимент, вы можете наблюдать еще одно интересное явление. Когда вы капнете немного масла на свободную поверхность воды, то первым делом заметите знакомую радужную окраску поверхности масла, какую видели, наверное, много раз на воде в гаванях, часто посещаемых судами. Эту окраску вызывает хорошо известное нам явление интерференции световых лучей, отраженных от верхней и нижней границы масляного слоя, а разница в цвете обусловлена тем, что слой масла, рас текшийся от места, где капля упала, имеет разную толщину. Если вы подождете немного, слой станет равномерным и вся поверхность масла обретет однородную окраску. По мере того как слой масла становится тоньше, окраска постепенно меняется — с красной на желтую, с желтой на зеленую, с зеленою на синюю и с синей на фиолетовую — сообразно уменьшению длины волны света. Если площадь поверхности масла продолжит расширяться, окраска полностью исчезнет. Это не означает, что масляного слоя больше нет, просто его толщина стала меньше самой короткой видимой длины волны, и окраска вышла за пределы нашего восприятия. Но вы все равно сможете отличить маслянистую поверхность от чистой поверхности воды, так как два луча света, отражаясь от верхней и нижней поверхностей очень тонкого слоя, будут интер-

ферировать таким образом, который приведет к снижению общей интенсивности. В итоге, когда окраска исчезает, маслянистую поверхность можно отличить от чистой поверхности по виду: в отраженном свете она выглядит несколько более «матовой».

Если вы проведете этот эксперимент на самом деле, то обнаружите, что 1 куб. мм (мм^3) масла может покрыть около 1 кв. м (м^2) поверхности воды, но любая дальнейшая попытка растянуть масляную пленку приведет к образованию отверстий с чистой водой на поверхности*.

3. МОЛЕКУЛЯРНЫЕ ПУЧКИ

Другой интересный метод демонстрации молекулярного строения материи обнаруживается, когда мы изучаем проникновение газов и паров через небольшие отверстия в окружающий вакуум.

Предположим, у нас есть большая стеклянная колба (рис. 44), из которой полностью выкачали воздух, внутри нее помещена небольшая электрическая печь, состоящая из керамического цилиндра с небольшим отверстием в стенке, на него, для обеспечения высокой температуры, намотан провод с большим электрическим сопротивлением. Если мы поместим в печь кусочек какого-нибудь легкоплавкого металла, такого как натрий или калий, внутренняя часть цилиндра заполнится металлическим паром, который будет просачиваться в окружающее пространство через маленькую дырочку в стенке цилиндра. Вступая в контакт с холодной стенкой стеклянной колбы, пары будут конденсироваться, а образовавшийся на ее участках налет, похожий на зеркальный, ясно покажет путь, по которому вещество двигалось, покинув печь.

* Насколько тонок масляный слой непосредственно перед разрывом? Чтобы понимать ход вычислений, представьте каплю, содержащую 1 куб. мм масла, в виде реального куба, каждая грань которого составляет 1 кв. мм. Чтобы растянуть исходный 1 куб. мм масла по площади в 1 кв. м., поверхность масляного куба площадью 1 кв. мм, которая контактирует с поверхностью воды, нужно увеличить на коэффициент одна тысяча (с 1 кв. мм до 1 кв. м). Следовательно, чтобы сохранить общий объем постоянным, вертикальный размер исходного куба нужно уменьшить на коэффициент $1000 \times 1000 = 10^6$. Это дает нам значение предельной толщины слоя, и, следовательно, фактический размер молекулы масла — примерно $0,1 \text{ см} \times 10^{-6} = 10^{-7} \text{ см}$. Поскольку молекула масла состоит из нескольких атомов, размер атомов должен быть меньше.

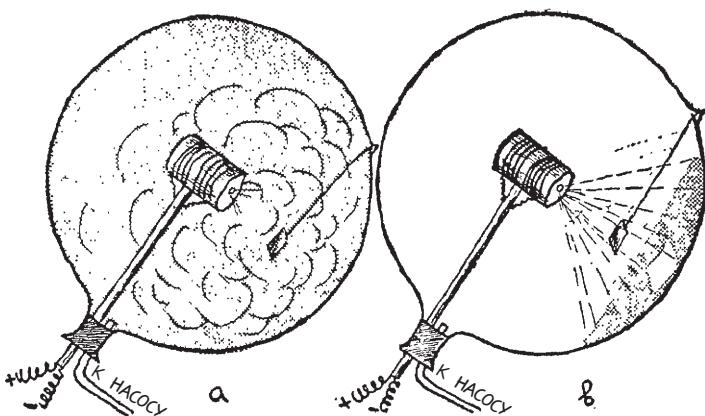


Рис. 44.

Далее мы увидим, что при разных температурах печи распределение налета на стеклянной стенке будет разным. Когда печь очень горячая и плотность металлического пара внутри нее довольно высокая, явление будет выглядеть хорошо знакомым для любого, кто наблюдал, как пар выходит из чайника или из парового двигателя. Выходя через отверстие, пар будет распространяться во всех направлениях (рис. 44a) и, заполнив весь объем колбы, образует более или менее равномерный осадок на всей стеклянной поверхности.

Однако при более низких температурах, когда плотность пара внутри печи низкая, явление протекает совершенно по-другому. Вместо того чтобы распространяться во всех направлениях, вещество, выходящее из отверстия, движется, похоже, по прямой линии, и большая часть его оседает на стеклянной стенке напротив отверстия печи. Этот участок можно особо выделить, поместив перед отверстием небольшой предмет (рис. 44b). На стенке прямо позади предмета никакого налета не образуется, и этот участок без налета представляет собой геометрическую тень, которая точно повторяет форму предмета.

Разницу в поведении газа, выходящего при высокой и низкой плотности, легко понять, если вспомнить, что пар образуется очень большим количеством отдельных молекул, которые стремительно движутся в пространстве, распространяясь во всех направлениях и постоянно сталкиваются друг с другом. Когда плотность пара высока, поток газа, выходящий через отверстие, можно

сравнить с обезумевшей толпой, мчащейся к выходу из театра, в котором разгорелся пожар. Миновав двери, люди, разбегаясь во всех направлениях, продолжают натыкаться друг на друга и на улице. С другой стороны, когда плотность низкая — это как если бы через дверь проходил лишь один человек за раз, продвигаясь тем самым вперед без помех.

Поток вещества с низкой плотностью пара, выходящий через отверстие в печи, известен как «молекулярный пучок», его образует большое количество отдельных молекул, летящих вместе через пространство. Подобные молекулярные пучки очень полезны для изучения индивидуальных свойств молекул. Например, их можно использовать для измерения скорости теплового движения.

Прибор для изучения скорости таких молекулярных пучков впервые собрал Отто Штерн; устройство практически идентично тому, которое использовал Физо для измерения скорости света (см. рис. 31). Прибор состоит из двух зубчатых колес, установленных на общей оси, и устроен он так, чтобы позволить молекулярному пучку проходить через просвет между зубцами, лишь когда угловая скорость вращения — подходящая (рис. 45). Останавливая экраном тонкий молекулярный пучок, проходящий через прибор, Штерн смог продемонстрировать, что скорость молекулярного движения, как правило, очень велика (1,5 км в секунду для атомов натрия при 200 °C) и что она увеличивается по мере того, как поднимается температура газа. Это обеспечивает прямым доказательством кинетическую теорию тепла, согласно которой увеличение температуры тела — это всего лишь увеличение хаотического теплового движения его молекул.

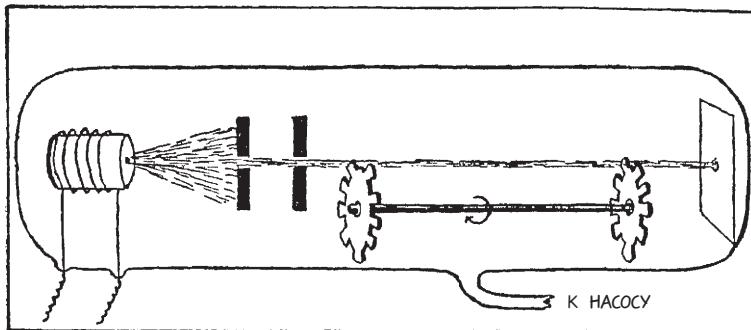


Рис. 45.

4. ФОТОПОРТРЕТ АТОМА

Хотя приведенные выше примеры вряд ли могут оставить какие-либо сомнения в верности атомной гипотезы, но по-прежнему верно и то, что «увидеть — значит поверить», поэтому самое убедительное доказательство существования атомов и молекул — увидеть эти крошечные единицы собственными глазами. Такую наглядную демонстрацию осуществил сравнительно недавно британский физик У. Л. Брэгг, который разработал метод получения фотографий отдельных атомов и молекул в различных кристаллических телах.

Однако не следует думать, что фотографирование атомов — такое уж легкое занятие, так как при съемке столь малых объектов нужно принять во внимание, что картина будет безнадежно размыта, если только длина волны света не меньше, чем размер объекта съемки. Персидскую миниатюру малярной кистью не нарисуешь! Биологи, имеющие дело с крошечными микроорганизмами, очень хорошо знакомы с такими сложностями, так как размер бактерий (около 0,0001 см) сравним с длиной волны видимого света. Для большей резкости изображения они делают микрофотографии бактерий в ультрафиолетовом свете, получая таким образом несколько лучшие результаты, чем они были бы в ином случае. Но когда для портreta просят позировать молекулы, их собственный размер и расстояния между ними в кристаллической решетке настолько малы (0,0000001 см), что и видимый, и ультрафиолетовый свет бесполезны. Для того чтобы увидеть отдельные молекулы, нам необходимо излучение с длиной волны в тысячи раз короче, чем у видимого света, — или, иными словами, мы должны использовать излучение, известное как рентгеновское.

Но здесь мы сталкиваемся, казалось бы, с непреодолимой трудностью: рентгеновские лучи будут проходить через любое вещество практически без преломления, поэтому ни объектив, ни микроскоп не сработают, если их использовать вместе с рентгеновским излучением. Это свойство, вместе с великой проникающей способностью рентгеновских лучей, очень полезно, безусловно, в медицинской науке, так как преломление лучей при прохождении через человеческое тело полностью размыло бы все рентгеновские снимки. Но то же самое свойство, похоже, исключает и всякую возможность получения с помощью рентгеновских лучей изображения, сколько-нибудь увеличенного!

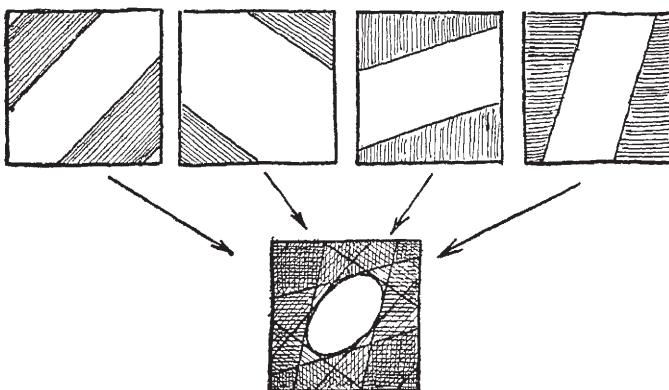


Рис. 46.

На первый взгляд ситуация кажется безнадежной, но У.Л. Брэгг нашел весьма остроумный выход из этого затруднения. Его размышления основывались на математической теории микроскопа, разработанной Аббе, согласно которой любое микроскопическое изображение может рассматриваться как наложение большого количества отдельных паттернов, где каждый паттерн представлен параллельными темными полосами, проходящими под определенным углом через поле. Рис. 46 представляет пример, иллюстрирующий это утверждение; на этом рисунке показано, как путем наложения четырех отдельных систем полос получается изображение светлой эллиптической области в центре темного поля.

Согласно теории Аббе, принцип действия микроскопа заключается в том, чтобы (1) разбить исходное изображение на большое число отдельных паттернов полос, (2) увеличить каждый отдельный паттерн и (3) снова наложить паттерны друг на друга для получения цельного увеличенного изображения.

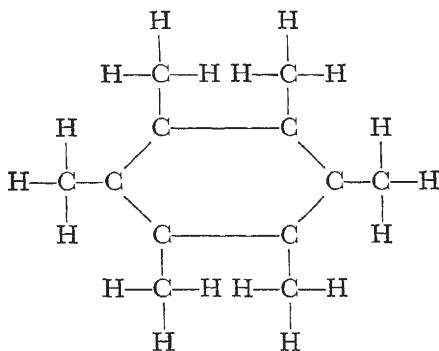
Эту процедуру можно сравнить с методом печати цветной картинки с использованием нескольких одноцветных пластин. Глядя на каждый цветной оттиск по отдельности, вы не сможете сказать, что на самом деле изображено на картинке, но как только все они должным образом наложатся друг на друга, цельная картина пропустит четко и ясно.

Невозможность создания рентгеновского объектива, который бы выполнял все эти операции автоматически, заставляет нас действовать поэтапно: сначала сделать большое количество рент-

геновских снимков отдельных паттернов полос кристалла под всевозможными углами, а затем наложить их в необходимом порядке друг на друга на одном листе фотобумаги. Таким образом мы можем достигнуть того же самого, что и рентгеновский объектив, но объектив делал бы это почти мгновенно, а экспериментатору, даже умелому, потребуются многие часы. Поэтому, используя метод Брэгга, мы можем получить изображение кристаллов, в которых молекулы остаются на своих местах, но сфотографировать их в жидкостях или газах, где они носятся в дикой пляске, мы не в состоянии.

Хотя фотографии, сделанные по методу Брэгга, сделаны на самом деле отнюдь не одним щелчком камеры, они хороши и верны настолько, насколько только может быть верным любое комбинированное изображение. Никто ведь не станет возражать против фотографии кафедрального собора, состоящей из нескольких отдельных снимков, если по техническим причинам не удалось снять здание в одном кадре!

На иллюстрации I «Клейки» мы видим подобное рентгеновское изображение молекулы гексаметилбензола, для которой химики пишут формулу:



Кольцо образовано шестью атомами углерода, на изображении также четко выделяются еще шесть атомов углерода, которые крепятся к кольцу, тогда как образы более легких атомов водорода едва различимы.

Даже Фома неверующий, увидев своими глазами подобные фотографии, согласился бы с тем, что существование молекул и атомов — доказано.

5. ПРЕПАРИРУЯ АТОМ

Демокрит, давая атому название, которое по-гречески означает «неделимый», имел в виду, что эти частицы представляют собой максимально возможный предел, до которого материю можно разложить на составные части; иными словами, атомы — самые маленькие и самые простые структурные части, из которых состоят все материальные тела. Когда тысячи лет спустя изначально философская идея «атома» была включена в точную науку о материи и на основе обширных эмпирических данных обросла плотью и кровью, вера в неделимость атома шла вместе с этим бок о бок, а различные свойства атомов разнообразных элементов гипотетически приписывали разности их геометрических форм. Так, например, атомы водорода считались почти сферическими, тогда как атомы натрия и калия, как полагали, имели форму вытянутого эллипсоида.

Считалось, что атомы кислорода имеют форму пончика с маленьким центральным отверстием, и молекулу воды (H_2O) можно образовать, поместив два сферических атома водорода в отверстие по обеим сторонам от кислородного пончика (рис. 47). Замена водорода в молекуле воды на натрий или калий объяснялась тогда утверждением, что вытянутые атомы натрия и калия лучше вписываются в отверстие кислородного пончика, чем сферические атомы водорода.

Опираясь на эти представления, отличия в оптических спектрах излучения различных элементов отнесли за счет отличий в частоте колебаний атомов разной формы. Рассуждая так, физики безуспешно пытались сделать выводы о форме различных атомов, которые образуют испускающие свет элементы, основываясь на наблюдаемых частотах света, который они испускают, точно так же, как в акустике мы объясняем различия в звуках, издаваемых скрипкой, церковным колоколом и саксофоном.

Однако ни одна из попыток объяснить химические и физические свойства различных атомов исключительно на основе их геометрических форм ни привела к существенному прогрессу, и первый реальный шаг вперед в понимании атомных свойств был сделан, когда признали, что атомы — не простые элементарные тела различной геометрической формы, а, напротив, довольно сложные механизмы с большим количеством независимых подвижных частей.

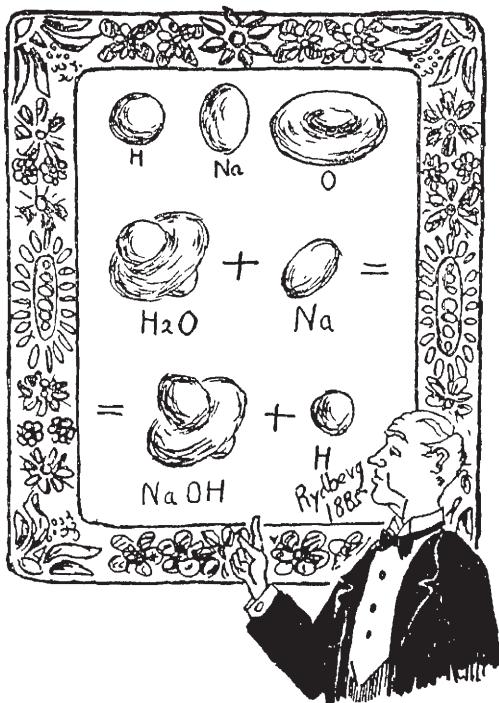


Рис. 47.

Честь сделать первый разрез в сложной операции препарирования деликатного тела атома принадлежит знаменитому британскому физику Д. Д. Томсону, который смог показать, что атомы различных химических элементов состоят из положительно и отрицательно заряженных частей, удерживаемых вместе силами электрического притяжения. Томсон рассматривал атом как более или менее однородно распределенный положительный электрический заряд с большим числом отрицательно заряженных частиц, плавающих внутри него (рис. 48). Суммарный электрический заряд отрицательных частиц, или электронов, как он их называл, равняется общему положительному заряду, так что атом в целом электрически нейтрален. Поскольку, однако, предполагалось, что электроны сравнительно слабо связаны с телом атома, один или несколько из них могут оторваться и удалиться, оставив после себя положительно заряженные атомные радикалы, известные как *положительные ионы*. С другой стороны, атомы, которым

удается заполучить извне в свою структуру несколько дополнительных электронов, имеют избыток отрицательного заряда и известны как *отрицательные ионы*. Процесс сообщения атому положительного или отрицательного избытка электричества известен как процесс *ионизации*. Точка зрения Томсона основывается на классической работе Майкла Фарадея, который доказал, что всякий раз, когда атом несет электрический заряд, он всегда кратен определенному элементарному количеству электричества, численно равному $5,77 \times 10^{-10}$ электростатических единиц. Но Томсон пошел намного дальше, чем Фарадей, — приписав этим электрическим зарядам природу отдельных частиц, усовершенствовав методы их извлечения из атомных тел, а также изучив пучки свободных электронов, летящих с высокой скоростью через пространство.

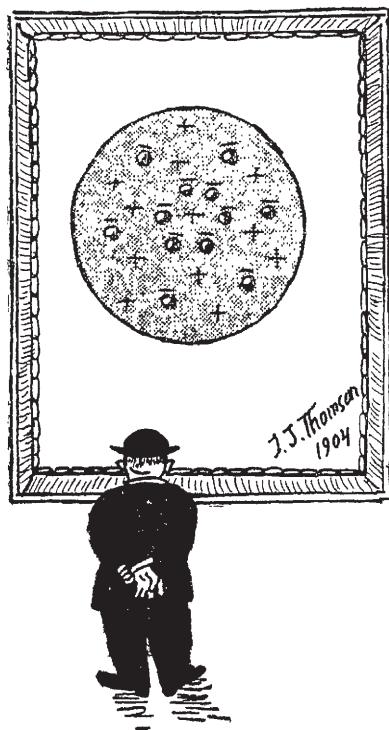


Рис. 48.

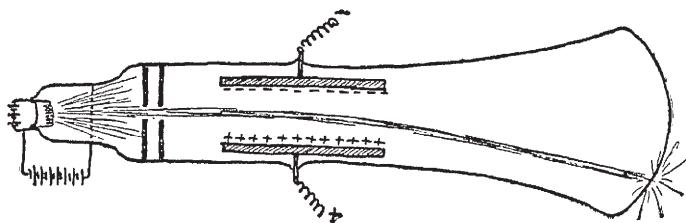


Рис. 49.

Особенно важным результатом изучения Томсоном пучков свободных электронов была оценка их массы. В пространство между двумя пластинами заряженного конденсатора (рис. 49) он направлял пучок электронов, извлеченных сильным электрическим полем из таких материалов, как горячие электрические провода. Будучи заряженными отрицательным электричеством, или, если выражаться точнее, являясь свободными отрицательными зарядами, электроны пучка притягивались к положительному электроду и отталкивались от отрицательного.

Результаты отклонения пучка можно легко наблюдать, позволив ему упасть на флуоресцентный экран, расположенный за конденсатором. Зная заряд электрона и его отклонение в данном электрическом поле, можно было оценить его массу, которая на самом деле оказалась очень маленькой. Собственно, Томсон установил, что масса одного электрона в 1840 раз меньше массы атома водорода, и это свидетельствует о том, что основная доля атомной массы приходится на ее положительно заряженные части.

Будучи совершенно правым в своих взглядах насчет роя отрицательных электронов, движущихся внутри атома, Томсон был, однако, очень далек от истины касательно равномерного распределения положительного заряда по всему телу атома. В 1911 году Резерфорд показал, что положительный заряд атома, а также наибольшая часть его массы сосредоточены в чрезвычайно маленьком *ядре*, расположенном в самом центре атома. Он пришел к этому выводу в результате своих знаменитых экспериментов по рассеянию так называемых «альфа (α) частиц» при их прохождении через вещество. Эти α -частицы являются крошечными высокоскоростными снарядами, выпускаемыми в результате спонтанного распа-

да атомов определенных тяжелых нестабильных элементов (таких как уран или радий), и, так как было доказано, что их масса сравнима с массой атомов, а заряд — положителен, α -частицы следует рассматривать как фрагменты изначально положительно-го тела атома. Когда α -частица проходит через атомы вещества мишени, на нее влияют силы притяжения, которые притягивают ее к атомным электронам, и силы отталкивания, которые отталкивают ее от положительных частей атома. Поскольку, однако, электроны чрезвычайно легки, они способны влиять на движение падающей α -частицы не больше, чем рой комаров на бег испуганного слона. С другой стороны, отталкивание между массивными положительными частями атома и положительным зарядом падающих α -частиц должно быть в состоянии отклонить последние от их обычной траектории и рассеять во всех направлениях — но это при условии, что они находятся достаточно близко друг от друга.

Изучая рассеяние пучка α -частиц, проходящих через тонкую нить из алюминия, Резерфорд пришел к удивительному выводу, что для объяснения наблюдаемых результатов следует предположить, что расстояние между падающими α -частицами и положительным зарядом атома меньше, чем одна тысячная атомного диаметра. Подобное, конечно же, возможно, только если *и падающие альфа-частицы, и положительно заряженная часть атома в тысячи раз меньше, чем сам атом*. Таким образом, открытие Резерфорда сократило широко раскинувшийся положительный заряд из атомной модели Томсона до крошечного *атомного ядра* в самом центре атома, оставив рой отрицательных электронов снаружи, то есть вместо того чтобы быть похожим на арбуз, где электроны играли роль семян, образ атома стал больше напоминать миниатюрную Солнечную систему с атомным ядром в качестве Солнца и электронами в качестве планет (рис. 50).

Аналогию с планетной системой можно еще более усилить следующими фактами: атомное ядро составляет 99,97% от общей атомной массы, в то время как 99,87% от массы всей Солнечной системы сосредоточено в Солнце, а расстояния между электронами-«планетами» превышают их диаметры примерно на такой же коэффициент (в несколько тысяч раз), который мы находим, когда сравниваем межпланетные расстояния с диаметрами планет.

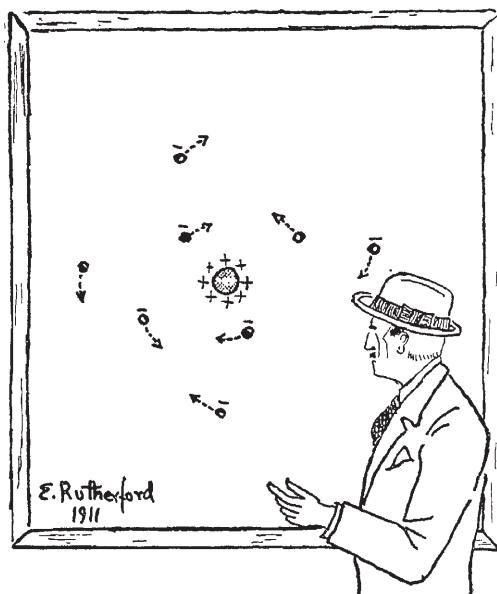


Рис. 50.

Однако более важная аналогия заключается в том, что электрические силы притяжения между атомным ядром и электронами подчиняются тому же самому математическому закону обратных квадратов*, что и силы гравитации, действующие между Солнцем и планетами. Это заставляет электроны описывать вокруг ядра круговые и эллиптические траектории, подобные тем, по которым движутся планеты и кометы в Солнечной системе.

В соответствии с вышеизложенными взглядами относительно внутреннего строения атома, разницу между атомами разнообразных химических элементов следует отнести за счет различного количества электронов, вращающихся вокруг ядра. Поскольку атом как целое электрически нейтрален, число вращающихся вокруг его ядра электронов должно определяться числом элементарных положительных зарядов, которые несет само ядро, их количество, в свою очередь, можно оценить по непосредственно наблюдаемому рассеянию α -частиц, отклоненных от своих треков электрическим взаимодействием ядер. Резерфорд обнаружил, что

¹ На рисунке изображен Э. Резерфорд.

* То есть эти силы обратно пропорциональны квадрату расстояния между двумя телами.

в естественной последовательности химических элементов, расположенных в порядке увеличения их масс, у каждого следующего элемента данной последовательности количество атомных электронов на один больше, чем у предыдущего. Таким образом, атом водорода имеет 1 электрон, атом гелия — 2, лития — 3, бериллия — 4 и так далее до самого тяжелого природного элемента, урана, у которого в общей сложности 92 электрона*.

Это числовое обозначение атома известно как *атомное число* элемента и совпадает с номером его позиции, указывающим на его положение в классификации, в которой химики расположили элементы в соответствии с их химическими свойствами.

Итак, все физические и химические свойства любого данного элемента можно охарактеризовать всего лишь одной цифрой, которая обозначает число электронов, вращающихся вокруг центрального ядра.

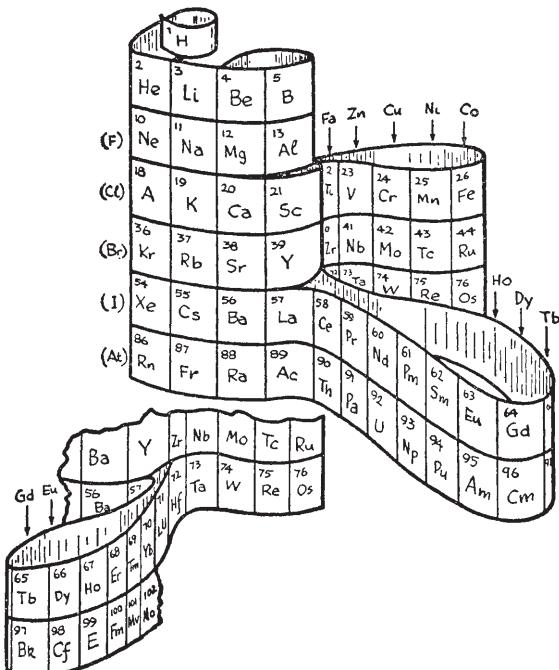


Рис. 51. Вид спереди

* Теперь, когда мы изучили искусство алхимии (см. далее), мы можем искусственно создать еще более сложные атомы. Так, искусственный элемент плутоний, используемый в атомных бомбах, имеет 94 электрона.

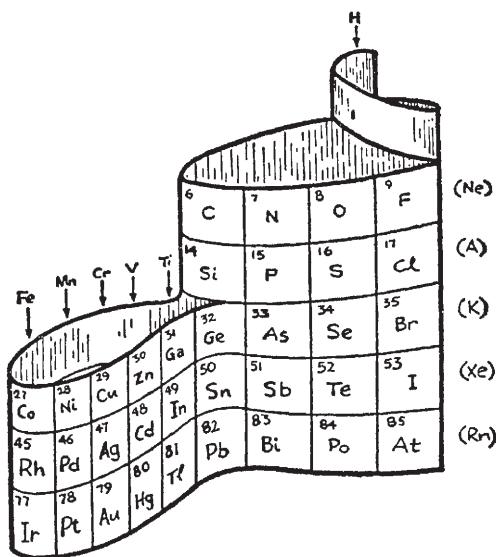


Рис. 51. Вид сзади.

Периодическая система элементов, расположенных на спиральной ленте, демонстрирует периоды 2, 8 и 18. Схема на следующей странице представляет обратную сторону выдающейся из «цилиндра» петли, на которой изображены элементы (редкоземельные и актиноиды), выпадающие из обычной периодичности.

В конце XIX века русский химик Д. Менделеев заметил замечательную периодичность в химических свойствах элементов, расположенных в естественной последовательности. Он обнаружил, что свойства элементов, после определенного количества шагов, начинают повторяться. Эта периодичность изображена на рис. 51, на котором символы всех известных в настоящее время элементов представлены на ленте, идущей по спирали и повторяющей форму цилиндра таким образом, что элементы со сходными свойствами располагаются в столбцах. Мы видим, что первая группа содержит только 2 элемента — водород и гелий, затем идут две группы по 8 элементов каждая, а далее свойства повторяются после каждого 18 элементов. Памятая, что каждый шаг вперед в последовательности элементов соответствует одному дополнительному электрону в атоме, мы неизбежно должны заключить, что наблюдаемая периодичность химических свойств обусловлена, вероятно, периодически повторяющимся образованием опре-

деленных устойчивых конфигураций атомных электронов, или «электронных оболочек». Первая завершенная оболочка должна состоять из 2 электронов, следующие две оболочки — из 8 электронов каждая, а все последующие — из 18. Глядя на рис. 51, мы также замечаем, что в шестом и седьмом периоде строгая периодичность свойств становится немного запутанной, и две группы элементов (так называемые редкоземельные и актиниды) размещаются на ленте, выдающейся из «цилиндра», нарушая его форму. Эта аномалия связана с тем, что мы сталкиваемся здесь с определенной внутренней перестройкой структуры электронных оболочек, которая приводит в беспорядок химические свойства рассматриваемых атомов.

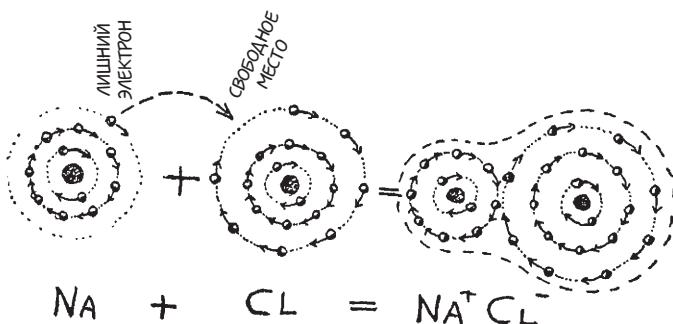


Рис. 52. Схематическое изображение, представляющее соединение атомов натрия и хлора в молекулу хлорида натрия.

Далее, имея изображение атома, мы можем попытаться ответить на вопрос о силах, которые связывают вместе атомы отдельных элементов в сложные молекулы бесчисленных химических соединений. Почему, например, атомы натрия и хлора сцепляются, образуя молекулу поваренной соли? Мы видим из рис. 52, представляющего структуры оболочек этих двух атомов, что атому хлора, для завершения третьей оболочки, не хватает одного электрона, в то время как атом натрия имеет один лишний электрон, который остался после завершения его второй оболочки. Следовательно, дополнительный электрон натрия будет стремиться перейти к хлору, чтобы завершить незаконченную оболочку. В результате перехода электрона атом натрия становится положительно заряженным (из-за потери отрицательного электрона), тогда как атом хлора приобретает отрицательный заряд. Под действием

сил электрического притяжения, существующего между ними, два заряженных атома (или *иона* — так их называют) «сцепляются» и образуют молекулу хлорида натрия, или, говоря простым языком, поваренной соли. Таким же образом атом кислорода, которому не хватает двух электронов во внешней оболочке, «похищает» одиночные электроны у двух атомов водорода, образуя тем самым молекулу воды (H_2O). С другой стороны, у атомов кислорода и хлора, как и у атомов водорода и натрия, нет стремления соединяться, так как в первом случае у обоих есть стремление взять, а не отдать, тогда как во втором — ни один не хочет брать.

Атомы с завершенными электронными оболочками, такие как атомы гелия, аргона, неона и ксенона, полностью довольны собой и не нуждаются в том, чтобы отдавать или брать лишние электроны, они предпочитают оставаться в гордом одиночестве, что делает соответствующие элементы (так называемые редкие газы¹) химически инертными.

Завершая этот параграф об атомах и их электронных оболочках, мы хотим обратить внимание читателя на важную роль, которую атомные электроны играют в веществах, известных под собирательным названием «металлы». Металлические вещества отличаются от всех других тем, что внешние оболочки их атомов связаны довольно слабо и они часто позволяет одному из своих электронов освободиться. Поэтому внутри металла заполнен большим количеством свободных электронов, которые бесцельно блуждают вокруг, как люди в толпе перемещенных лиц. Когда металлическая проволока подвергается воздействию электрической силы, приложенной к обеим ее концам, свободные электроны устремляются в направлении силы, образуя таким образом то, что мы называем электрическим током.

Наличие свободных электронов является также причиной высокотемпературной проводимости — но к этому мы вернемся в одной из следующих глав.

6. МИКРОМЕХАНИКА И ПРИНЦИП НЕОПРЕДЕЛЕННОСТИ

Поскольку, как мы видели в предыдущем параграфе, атом с его системой электронов, вращающихся вокруг центрального ядра, сильно напоминает планетную систему, было бы естественно

¹ Инертные газы.

ожидать, что он подчиняется тем же надежным астрономическим законам, которые регулируют движение планет вокруг Солнца. В частности, сходство между законами электрического и гравитационного притяжения — в обоих случаях сила притяжения обратно пропорциональна квадрату расстояния — заставляло бы предположить, что атомные электроны должны двигаться вокруг ядра как центра по эллиптическим орбитам (рис. 53а).



Рис. 53.

Однако все попытки выстроить последовательную картину движения атомных электронов по той же модели, которая использовалась для описания движения небесных тел нашей планетной системы, неожиданно привели к бедствию такого масштаба, что какое-то время все выглядело так, словно либо физики, либо сама физика совершенно сошли с ума. Проблема, по сути, порождалась тем, что, в отличие от планет Солнечной системы, атомные электроны заряжены электрически — это верно для любых колеблющихся или вращающихся электрических зарядов, — и ожидается, что их круговое движение вокруг ядра должно порождать интенсивное электромагнитное излучение. Логично предположить, что в результате потери энергии, которая уносится излучением, атомные электроны, двигаясь по спиральной траектории, приближаются к ядру (рис. 53б) и в конечном итоге, когда кинетическая энергия их орбитального движения полностью исчерпывается, падают на него. Что касается времени, которое затрачивается на этот процесс, то, зная электрический заряд и частоту вращения атомных электронов, было довольно просто вычислить, что потеря всей энергии и последующее падение на ядро не должно занимать у электронов более одной сотой микросекунды.

Таким образом, согласно всем имевшимся до недавнего времени у физиков знаниям и убеждениям, планетоподобные атом-

ные структуры не смогли бы просуществовать более ничтожной доли секунды и были бы обречены на падение почти в тот же миг, когда образовались.

Тем не менее, несмотря на мрачные предсказания физической теории, эксперименты показывали, что атомные системы на самом деле очень стабильны и атомные электроны продолжают радостно кружить вокруг центральных ядер без какой-либо потери энергии и не проявляя ни малейшей склонности упасть на ядро!

Как подобное возможно! Почему применение старых и надежных законов механики к атомным электронам привело к выводам, настолько противоречащим наблюдаемым фактам?

Чтобы ответить на этот вопрос, мы должны обратиться к самой фундаментальной проблеме науки — проблеме сущности самой науки. Что такое «наука» и что мы подразумеваем под «научным объяснением» фактов природы?

В качестве простого примера давайте вспомним: древние греки верили, что Земля плоская. Трудно винить их за такое убеждение, потому что, если вы выходите в открытое поле или плывете в лодке по воде, вы *видите* сами, что это правда: за исключением холмов и гор, встречающихся то здесь, то там, поверхность Земли *действительно выглядит плоской*.

Ошибка древних была не в утверждении, что «Земля плоская, насколько можно видеть из заданной точки наблюдения», а в *экстраполяции* этого утверждения за пределы фактического наблюдения. И, собственно, наблюдения, которые выходили далеко за рамки обычных, такие как изучение формы земной тени на Луне во время затмения или знаменитое путешествие Магеллана вокруг света, сразу же доказали ошибочность такой экстраполяции. Сейчас мы говорим, что Земля *выглядит* плоской потому, что поверхность, которую мы можем видеть, представляет собой очень малую часть общей поверхности земного шара. Это аналогично тому, что обсуждалось в главе V: пространство Вселенной может быть искривленным и конечным по размеру, несмотря на то что с точки зрения ограниченных наблюдений выглядит плоским и визуально бесконечным.

Но какое это имеет отношение к противоречию, к которому мы пришли, изучая механическое поведение электронов, образующих тело атома? Ответ будет таким: занимаясь изучением атома, мы неявно предположили, что он в своем движении следует тем же законам, что регулируют движение больших небесных

тел, или, если уж на то пошло, движение тел «нормального размера», с которыми мы привыкли иметь дело в повседневной жизни, и, таким образом, движение атома можно описать в тех же терминах. На самом деле для материальных тел, сравнимых по размеру с человеческими существами, хорошо знакомые нам законы и понятия механики были установлены эмпирически. Позже те же законы использовались для объяснения движения гораздо больших тел, таких как планеты и звезды, и успех небесной механики, которая позволяет нам с максимальной точностью рассчитать различные астрономические явления на миллионы лет вперед и миллионы лет назад, кажется, не оставляет сомнений в обоснованности экстраполяции обычных механических законов при объяснении движения больших небесных масс.

Но какова гарантия того, что те же законы механики, которые объясняют движения гигантских небесных тел, так же как и артиллерийских снарядов, часовых маятников и игрушечных волчков, применимы к движению электронов, которые в миллиарды и миллиарды раз меньше и легче самых маленьких механических устройств, когда-либо побывавших у нас в руках?

Конечно же, нет оснований предполагать заранее, что законы обычной механики бессильны объяснить движение крохотных составных частей атома, но, с другой стороны, также не следует и слишком сильно удивляться, если такое бессилие имеет место на самом деле.

Таким образом, парадоксальные выводы, которые стали результатом попытки объяснить движение атомных электронов так же, как астроном объясняет движение планет в Солнечной системе, должны прежде всего рассматриваться в свете возможных изменений основных понятий и законов классической механики, когда они применяются к частицам столь малого размера.

Основные понятия классической механики — это *траектория*, описываемая движущейся частицей, и *скорость*, с которой частица движется по своей траектории. Утверждение, что *любая движущаяся материальная частица занимает в любой данный момент определенное положение в пространстве и что последовательные положения этой частицы образуют непрерывную линию, известную как траектория*, всегда считалось самоочевидным и сформировало фундаментальную основу для описания движения любого материального тела. Расстояние между двумя местоположениями данного объекта в разные моменты времени, разделенное на соот-

ветствующий временной интервал, привело к определению *скорости*, и на этих двух понятиях — местоположения и скорости — была выстроена вся классическая механика. До совсем недавнего времени ни одному ученому никогда и в голову, вероятно, не приходило, что самые фундаментальные понятия, используемые в описании феноменов движения, могут быть в какой-либо степени неверными, а среди философов их вообще было принято считать «априорными».

Однако попытки применить законы классической механики к описанию движения в крошечных атомных системах потерпели полное фиаско, которое намекало: в этом случае что-то неправильно в самой своей основе — и в результате стала крепнуть вера, что эта «неправильность» распространялась на самые фундаментальные идеи, на которых основывалась классическая механика. Основные кинематические представления о непрерывной траектории движущегося объекта и его вполне определенной скорости в любой данный момент времени кажутся *слишком грубыми* при применении к крошечным частям внутреннего механизма атома. Короче говоря, попытка экстраполяции идей знакомой классической механики на область чрезвычайно малых масс окончательно доказала, что, поступая так, мы должны изменить эти идеи довольно кардинальным образом. Но если старые понятия классической механики неприменимы в атомном мире, они также не могут быть *абсолютно верными* в отношении движения больших материальных тел. Таким образом, мы приходим к выводу, что *принципы, лежащие в основе классической механики, должны рассматриваться только в качестве очень хороших приближений к «реальному положению дел»*, приближений, не оправдывающихся совершенно, как только мы пытаемся применить их к системам более тонким, чем те, для которых они первоначально предназначались.

Принционально новый элемент, который был привнесен в науку о материи после изучения механического поведения атомных систем и, по формулировкам так называемой квантовой физики, заключался в открытии, что *существует определенный нижний предел для любого возможного взаимодействия между двумя различными материальными телами*, — открытии, которое вносит сумятицу в классическое определение траектории движущегося объекта. Собственно, утверждение, что существует такая штука, как математически точная траектория движущегося объекта, предпо-

лагает возможность записи этой траектории с помощью какого-то специально приспособленного для этого физического прибора. Не следует, однако, забывать, что при записи траектории любого движущегося объекта мы неизбежно нарушаем исходное движение. На самом деле если движущийся объект оказывает какое-то воздействие на измерительный прибор, который записывает его последовательные положения в пространстве, то и прибор также воздействует на движущийся объект — в соответствии с ньютоновским законом равенства действия и противодействия. Если, как предполагалось в классической физике, взаимодействие двух материальных тел (движущимся объектом и прибором, записывающим его положения) можно было бы уменьшить до желаемой степени, мы, вероятно, могли бы представить себе идеальный прибор, настолько чувствительный, что записывал бы последовательные положения движущегося объекта, практически не возмущая его движение.

Существование *нижнего предела физических взаимодействий* меняет ситуацию довольно радикально, так как мы больше не можем уменьшить возмущение движения, вызванное его записью, до сколь угодно малой величины. Таким образом, *возмущение движения, вызванное его наблюдением, становится неотъемлемой частью самого движения*, и, вместо того чтобы говорить о бесконечно тонкой математической линии, представляющей траекторию, мы вынуждены заменить ее расплывчатой полосой конечной толщины. *Математически точные траектории классической физики в глазах новой механики становятся широкими расплывчатыми полосами*.

Минимальное количество физического взаимодействия, известное как *квант действия*, обладает, однако, очень маленьким числовым значением и обретает важность, только когда мы изучаем движение очень малых объектов. Так, например, хотя и верно то, что траектория револьверной пули не математически точная линия, «толщина» этой траектории во много раз меньше, чем размер одного атома вещества, из которого сделана пуля, и, таким образом, может считаться практически нулевой. Однако, обращаясь к более легким объектам, на которые с легкостью воздействуют возмущения, возникающие при измерении их движения, мы находим, что значение «толщины» их траекторий становится все более и более существенным. *В случае вращения атомных электронов вокруг центрального ядра толщина орбиты сравнима с диаме-*

тром, поэтому, вместо того чтобы представлять их движение в виде линии, как изображено на рис. 53, мы вынуждены воображать его себе так, как показано на рис. 54. В таком случае движение частиц нельзя описать в знакомых терминах классической механики, поскольку как их положение, так и их скорость подчиняются некоторой неопределенности (соотношение неопределенностей Гейзенберга и принцип дополнительности Бора)*.



Рис. 54. Изображения микромеханического движения электронов в атоме.

Это потрясающее развитие новой физики, которое выбрасывает в мусорную корзину такие знакомые понятия, как траектория движения, точное положение и скорость движущейся частицы, и, кажется, оставляет нас в разреженном воздухе. Если в изучении атомных электронов нельзя использовать эти ранее принятые основные принципы, на чем тогда основывать наше понимание их движения? Каким математическим формализмом следует заменить методы классической механики, чтобы описать неопределенности положения, скорости, энергии и так далее, которых требуют факты квантовой физики?

Ответ на эти вопросы можно найти, рассмотрев аналогичную ситуацию, которая существовала в области классической теории света. Мы знаем, что большинство световых явлений, наблюдавшихся в обычной жизни, можно объяснить, распространением света распространяется по прямым линиям, известным как *световые лучи*. Формы теней, отбрасываемых непрозрачными объектами, образование изображений в плоских и кривых зеркалах, принцип действия линзы и различных более сложных оптических систем

* Более подробное обсуждение соотношения неопределенностей можно найти в книге автора «Мистер Томпкинс в Стране чудес» (The Macmillan Co., New York, 1940). [Рус. изд.: Георгий Гамов. Мистер Томпкинс в Стране чудес. Эдиториал УРСС, 2003. — 2-е изд. испр. — 128 с.]

можно с легкостью объяснить на основе элементарных законов, регулирующих отражение и преломление световых лучей (рис. 55a, b, c).

Но мы также знаем, что методы геометрической оптики, которые пытаются доказать классическую теорию распространения света с помощью световых лучей, терпят крах в тех случаях, когда геометрические размеры отверстий, используемых в оптических системах, сравнимы с длиной волны света. Явления, которые имеют место в этих случаях и известны как *явления дифракции*, полностью выходят за пределы геометрической оптики. Так, световой пучок, проходящий через очень маленькое отверстие (порядка 0,0001 см), распространяется отнюдь не по прямой линии, а рассеивается веерообразно (рис. 55d). Когда пучок света падает на зеркало, покрытое большим количеством параллельных узких линий, процарапанных на его поверхности («дифракционная решетка»), он не следует известному закону отражения, а разбрасывается в различных направлениях, обусловленных расстояниями между царапинами и длиной волны падающего света (рис. 55e). Также известно, что, когда свет отражается от тонких слоев масла, растекшегося по поверхности воды, образуется своеобразная система светлых и темных интерференционных полос (рис. 55f).

Во всех этих случаях привычное для нас понятие «световой луч» совершенно не в состоянии описать наблюдаемые явления, и вместо него мы должны признать распределение энергии света сплошь по всему пространству, занятому оптической системой.

Легко видеть, что крах понятия светового луча в применении к оптическим дифракционным явлениям очень напоминает крах понятия *механической траектории* в применении к явлениям квантовой физики. Так же как мы не можем создать в оптике бесконечно тонкий луч света, квантовые принципы механики не позволяют нам говорить о бесконечно тонких траекториях движущихся частиц. В обоих случаях мы должны отказаться от всех попыток описывать эти явления, говоря, что нечто (свет или частицы) распространяется вдоль определенных математических линий (оптических лучей или механических траекторий), и вынуждены перейти к представлению наблюдаемых явлений с помощью выражения «“нечто”, распространяющееся сплошь по всему пространству». Применительно к свету «нечто» — это интенсивность колебаний света в разных точках; применительно к механике «нечто» — это недавно введенное понятие неопределенности

местоположения, которое означает, что движущуюся частицу можно найти в любой данный момент не в заранее определенной точке, а в любом из нескольких возможных местоположений. Сказать *точно*, где движущаяся частица находится в данный момент времени, — невозможно, хотя указать пределы, в которых находится частица, вполне возможно, рассчитав их по формулам «соотношения неопределенностей». Родство, которое существует между законами волновой оптики, связанной с дифракцией света, и законами новой «микромеханики», или «волновой механики» (разработанной Л. де Бройлем и Э. Шредингером), связанной с движением механических частиц, становится очевидным, если провести эксперименты, демонстрирующие сходство этих двух классов явлений.

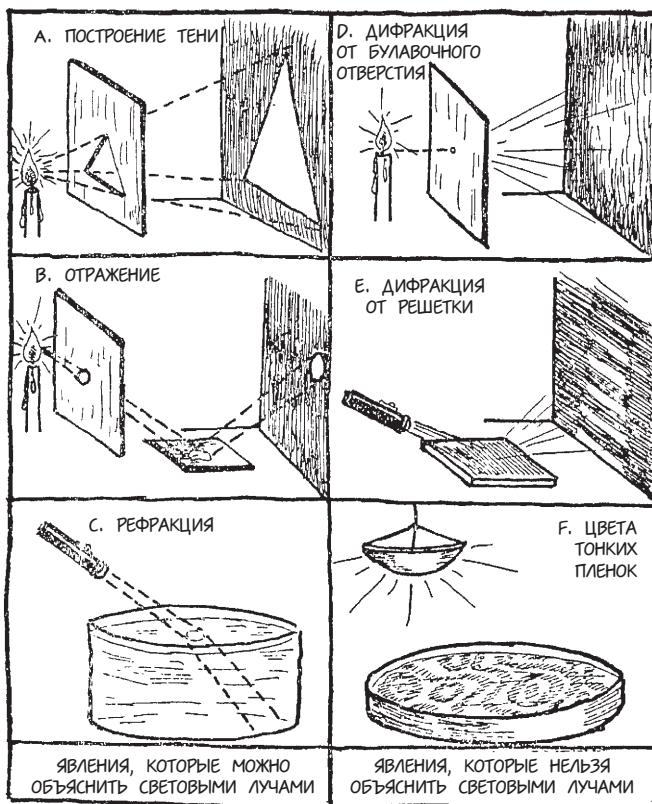


Рис. 55.

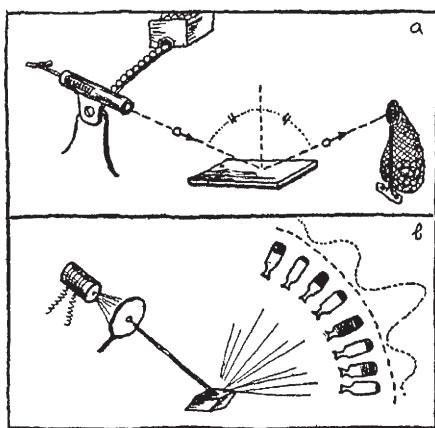


Рис. 56.

- (a) Явление, которое понятие траектории объясняет (отскок шариков от металлической пластины).
 (b) Явление, которое понятие траектории не объясняет (отскок атомов натрия от кристалла).

На рис. 56 мы показываем конструкции, которые использовал О. Штерн, изучая атомную дифракцию. Пучок атомов натрия, созданный методом, описанным ранее в этой главе, отражается от поверхности кристалла. Обычные атомные слои, образующие кристаллическую решетку, действуют по отношению к падающему пучку частиц как дифракционная решетка. Падающие атомы натрия, отскочив от поверхности кристалла, направляются в ряд маленьких бутылочек, установленных под разными углами, и в конце тщательно подсчитывается количество атомов, собранных каждой бутылочкой. Пунктирная линия на рис. 56 представляет результат этого подсчета. Мы видим, что, вместо того чтобы отражаться в одном определенном направлении (как шарики, снятые с подшипника и выстреленные из игрушечного пистолета в металлическую пластину), атомы натрия распределяются под определенными углами, по образцу, очень похожему на тот, который наблюдается при дифракции рентгеновских лучей.

Подобные эксперименты невозможно объяснить, основываясь на классической механике, которая описывает движение отдельных атомов по определенным траекториям, но совершенно понятно с точки зрения новой микромеханики, которая рассматривает движение частиц так же, как рассматривает распространение световых волн современная оптика.

Глава VII

Современная алхимия

1. ЭЛЕМЕНТАРНЫЕ ЧАСТИЦЫ

Узнав, что атомы различных химических элементов представляют собой довольно сложные механические системы с большим количеством электронов, вращающихся вокруг центрального ядра, мы неизбежно приходим к вопросу, являются ли эти атомные ядра конечными и неделимыми структурными единицами материи, или и они, в свою очередь, могут делиться дальше на еще более малые и еще более простые части. Можно ли свести все 92 различных типа атома к паре действительно простых частиц?

Еще в середине XIX века это стремление к упрощению привело английского химика Уильяма Праута к гипотезе, согласно которой *атомы всех химических элементов имеют общую природу, представляя собой лишь разную степень «концентрации» атомов водорода.* Праут основал свою гипотезу на том, что относительно водорода химически определенные атомные массы разнообразных элементов представлены в большинстве случаев очень близкими к целым числами. Таким образом, согласно Прауту, атомы кислорода, которые в 16 раз тяжелее, чем атомы водорода, должны рассматриваться как образованные из 16 атомов водорода, сцепленных вместе. Атомы же йода с атомной массой 127 образованы, надо полагать, совокупностью 127 атомов водорода — и так далее.

Однако химия, с имеющимися у нее в то время знаниями, не была благосклонна к принятию столь смелой гипотезы. Было показано, посредством точного измерения атомных масс, что их нельзя представить в точности целыми числами, но в большинстве случаев лишь числами, очень близкими к целым, а в некоторых случаях числами, которые даже не были близкими к целым. (Хи-

мическая атомная масса хлора, например, составляет 35,5.) Эти факты, которые, как казалось, находились в прямом противоречии с гипотезой Праута, дискредитировали ее, и Праут умер, так и не узнав, насколько он был прав на самом деле.

Его гипотеза вновь заявила о себе только в 1919 году — благодаря открытию британского физика Ф. У. Астона, который показал, что обычный хлор представляет собой смесь двух различных видов хлора, обладающих одинаковыми химическими свойствами, но имеющих разные целочисленные атомные массы: 35 и 37. Нечелое число 35,5, полученное химиками, представляет собой лишь среднее значение для этой смеси*.

Дальнейшее изучение разнообразных химических элементов выявило поразительный факт, что большинство из них представляют собой смесь нескольких компонентов, одинаковых по химическим свойствам, но разных по атомной массе. Они получили название *изотопов*, то есть веществ, занимающих одно и то же место в периодической системе элементов**. Тот факт, что массы различных изотопов всегда кратны массе атома водорода, и дал новую жизнь забытой гипотезе Праута. Поскольку, как мы видели в предыдущем параграфе, основная масса атома сосредоточена в его ядре, гипотезу Праута можно переформулировать современным языком так: *ядра различных видов атомов состоят из разного количества элементарных ядер водорода, которым, в силу их роли в строении материи, было дано особое название — «протоны»*.

Однако есть одно важное исправление, которое необходимо внести в приведенное выше утверждение. Рассмотрим, например, ядро атома кислорода. Поскольку кислород является восьмым элементом в естественной последовательности, его атом должен содержать 8 электронов, а его ядро должно нести 8 положительных элементарных зарядов. Но атомы кислорода в 16 раз тяжелее, чем атомы водорода. Следовательно, если мы предположим, что ядро кислорода образовано 8 протонами, мы получим правильный заряд, но неправильную массу (оба равны 8); предположив 16 протонов, мы получим правильную массу, но неправильный заряд (оба равны 16).

* Поскольку более тяжелый хлор присутствует в количестве около 25 процентов, а более легкий — в количестве 75 процентов, средняя атомная масса должна быть $0,25 \times 37 + 0,75 \times 35 = 35,5$, что химики и обнаружили ранее.

** От греческого *ἴσος*, что означает «равный», и *τόπος*, что означает «место».

Ясно, что единственный выход из этого затруднения заключается в допущении, что *некоторые протоны, образующие сложные атомные ядра, утратили свои изначальные положительные заряды и являются электрически нейтральными*.

Существование таких незаряженных протонов, или «нейтронов», как их сейчас называют, Резерфорд предположил еще в 1920 году, но прошло двенадцать лет, прежде чем их нашли экспериментально. Здесь нужно отметить, что протоны и нейтроны не следует рассматривать как два совершенно разных вида частиц, а скорее, как два разных электрических состояния одной и той же основной частицы, ныне известной под названием «нуклон». Собственно, установлено, что протоны могут превращаться в нейтроны, потеряв свой положительный заряд, а нейтроны могут превращаться в протоны, приобретя его.

Введение нейронов как структурных единиц атомных ядер устраниет затруднение, обсуждавшееся на предыдущих страницах. Для того чтобы понять, что ядро атома кислорода имеет 16 единиц массы, но лишь 8 единиц заряда, мы должны принять тот факт, что состоит оно из 8 протонов и 8 нейtronов. Ядро йода с атомной массой 127 и атомным номером 53, состоит из 53 протонов и 74 нейtronов, тогда как тяжелое ядро урана (атомный вес — 238, атомный номер — 92) состоит из 92 протонов и 146 нейtronов*.

Итак, спустя почти столетие после своего возникновения дерзкая гипотеза Праута получила наконец достойное и столь заслуженное признание, и теперь мы можем сказать, что бесконечное разнообразие известных веществ является результатом различных соединений всего лишь двух видов фундаментальных частиц: (1) нуклонов, основных частиц материи, которые могут либо быть нейтральными, либо нести положительный электрический заряд, и (2) электронов, свободных зарядов отрицательного электричества (рис. 57).

Вот несколько рецептов из самой полной кулинарной книги «Все блюда из материи», которые показывают, как из нуклонов и электронов, взятых из изобилующей ими кладовой, было приготовлено каждое блюдо во Вселенской кухне.

* Просматривая таблицу атомных масс, вы заметите, что в начале периодической системы атомные массы равны атомному номеру, умноженному на два, это означает, что данные ядра содержат равное количество протонов и нейtronов. У более тяжелых элементов атомная масса увеличивается быстрее, указывая на то, что нейtronов больше, чем протонов.

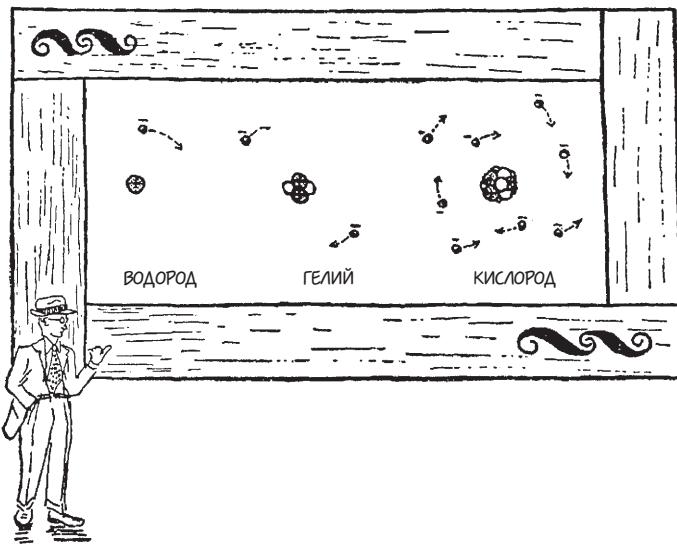


Рис. 57.

ВОДА. Приготовьте большое количество атомов кислорода, создав каждый соединением 8 нейтральных и 8 заряженных нуклонов и окружив полученное таким образом ядро оболочкой из 8 электронов. Приготовьте вдвое больше атомов водорода, присоединив в каждом случае один электрон к одному заряженному нуклону. Добавьте 2 атома водорода к каждому атому кислорода; полученные таким образом молекулы воды перемешайте и подайте холодными в большом стакане.

ПОВАРЕННАЯ СОЛЬ. Приготовьте атомы натрия, соединив для каждого 12 нейтральных и 11 заряженных нуклонов и прикрепив к каждому ядру 11 электронов. Приготовьте такое же количество атомов хлора, соединив 18 или 20 нейтральных и 17 заряженных нуклонов (изотопы) и прикрепив к каждому ядру 17 электронов. Для образования обычных кристаллов соли расположите атомы натрия и атомы хлора в трехмерном шахматном порядке.

ТРОТИЛ. Приготовьте атомы углерода, соединив 6 нейтральных и 6 заряженных нуклонов и прикрепив 6 электронов к ядру. Приготовьте атомы азота из 7 нейтральных и 7 заряженных нуклонов каждый и окружите 7 электронами ядро. Приготовьте атомы кислорода и атомы водорода по рецепту, приведенному выше (см. «ВОДА»). Расположите 6 атомов углерода в виде кольца и по-

местите 7-й вне его. Присоедините 3 пары атомов кислорода к 3 атомам углерода из кольца, поместив в каждом случае 1 атом азота между кислородом и углеродом. Присоедините 3 атома водорода к атому углерода, который находится вне кольца, и 1 атому водорода к каждому из 2 атомов углерода в кольце, оставшихся свободными. Для образования большого количества мелких кристаллов расположите молекулы, полученные таким образом, по повторяющемуся шаблону и спрессуйте все кристаллы вместе.

Обращайтесь с этим веществом с осторожностью, так как оно нестабильно и взрывоопасно.

Хотя, как мы только что видели, *нейтроны, протоны и отрицательные электроны* являются единственными необходимыми строительными единицами для создания любого желаемого материального вещества, список основных частиц кажется все еще несколько неполным. Собственно, если обычные электроны представляют собой свободные заряды отрицательного электричества, почему не может быть свободных зарядов положительного электричества, то есть *положительных электронов*?

Кроме того, если нейтрон, который, по-видимому, представляет собой основную единицу материи, может приобрести положительный электрический заряд и стать таким образом протоном, почему он не может сделаться также и отрицательно заряженным и превратиться тем самым в *отрицательный протон*?

Ответ будет таким: положительные электроны, которые очень похожи на обычные отрицательные электроны, отличаясь лишь знаком заряда, действительно существуют в природе. И есть также определенная вероятность, что и отрицательные протоны существуют, хотя экспериментальная физика все еще не сумела их обнаружить.

Причина того, что положительных электронов и отрицательных протонов (если таковые существуют) не так много в нашем физическом мире, как отрицательных электронов и положительных протонов, заключается в том, что эти две группы частиц, так сказать, антагонистичны друг другу. Все знают, что два электрических заряда, один из которых является положительным, а другой отрицательным, когда соединяются вместе, гасят друг друга. Следовательно, поскольку два вида электронов представляют собой не что иное, как свободные заряды положительного и отрицательного электричества, не следует ожидать, что они смогут сосуществовать в одной и той же области пространства. Собственно, как только

положительный электрон столкнется с отрицательным, их электрические заряды немедленно погасят друг друга и два электрона перестанут существовать как отдельные частицы. Такой процесс взаимного уничтожения двух электронов порождает, однако, интенсивное электромагнитное излучение (гамма $[\gamma]$ -лучи), исходящее из места столкновения и несущее изначальную энергию обеих исчезнувших частиц. Согласно фундаментальному закону физики, энергия не может быть ни создана, ни уничтожена, и здесь мы наблюдаем только трансформацию электростатической энергии свободных электрических зарядов в электродинамическую энергию излученной волны. Феномен, который является результатом встречи положительного и отрицательного электронов, профессор Борн* описывает как «неистовую свадьбу», а более мрачный профессор Браун** как «взаимное самоубийство» двух электронов. Рис. 58 a является графическим изображением такой встречи.

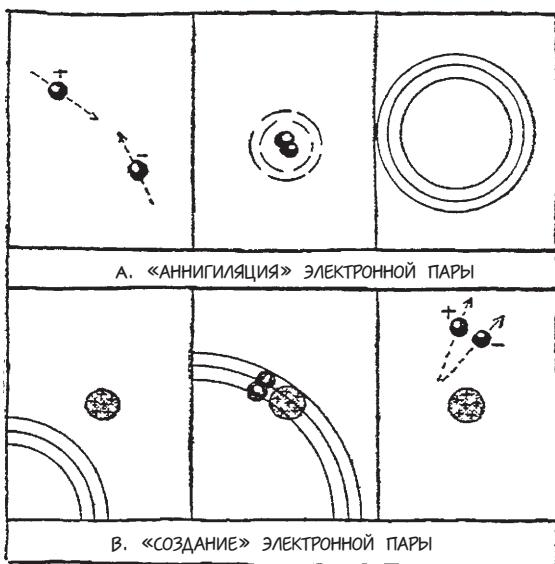


Рис. 58. Схематическое изображение процесса «аннигиляции» двух электронов, который порождает электромагнитную волну, а также процесса «создания» электронной пары волной, которая проходит вблизи от атомного ядра.

* М. Борн. Атомная физика (G. E. Stechert & Co., New York, 1935). [Рус. изд.: Макс Борн. Атомная физика. — 3-е изд. — М.: Мир, 1970—484 с.].

** Т. Б. Браун. Современная физика (John Wiley & Sons, New York, 1940).

Процесс «аннигиляции» двух электронов с противоположными зарядами имеет свой аналог в процессе «образования пары», в котором в результате сильного гамма-излучения словно из ничего образуются положительный и отрицательный электроны. Мы говорим «словно из ничего», потому что в действительности каждая такая новорожденная пара электронов образуется за счет энергии, обеспечиваемой γ -лучами. На самом деле, чтобы образовалась электронная пара, количество энергии, которое отдается излучением, должно быть точно таким же, какое освобождается в процессе аннигиляции. Процесс *образования пары*, который преимущественно происходит, когда падающее излучение проходит вблизи от какого-нибудь атомного ядра*, схематично представлен на рис. 58b. Это пример образования двух противоположных зарядов электричества, когда изначально не было никакого заряда вообще, — процесс, которому не следует, однако, удивляться больше, чем хорошо знакомому нам эксперименту с эbonитовой палочкой и куском шерстяной ткани, в котором при трении друг о друга они заряжаются электричеством с противоположными зарядами. Имея достаточное количество энергий, мы можем создать столько пар положительных и отрицательных электронов, сколько хотим, однако нам следует ясно осознавать, что процесс взаимной аннигиляции вскоре вновь выведет их из обращения и отдаст «в полном объеме» то количество энергии, которое изначально было потрачено на их создание.

Очень интересный пример «массового производства» пар электронов представляет явление «космических ливней», которые порождаются в земной атмосфере потоками частиц высокой энергии, поступающих к нам из межзвездного пространства. Хотя происхождение этих потоков, которые пересекают вдоль и попечерек безбрежную пустоту Вселенной, по-прежнему является одной из нерешенных загадок науки**, у нас имеется довольно ясное

* Хотя, в принципе, образование электронной пары может иметь место в полном вакууме, процессу образования пар значительно способствует наличие электрического поля, окружающего атомные ядра.

** Самое тривиальное, но, вероятно, и наиболее правдоподобное объяснение происхождения этих частиц высокой энергии, движущихся со скоростью до 99,99999999999 процента от скорости света, заключается в предположении, что их ускоряют очень высокие электрические потенциалы, предположительно существующие между гигантскими газопылевыми облаками (туманностями), плывущими в космическом пространстве. Собственно, можно ожидать, что такие межзвездные облака накапливают электрические заряды

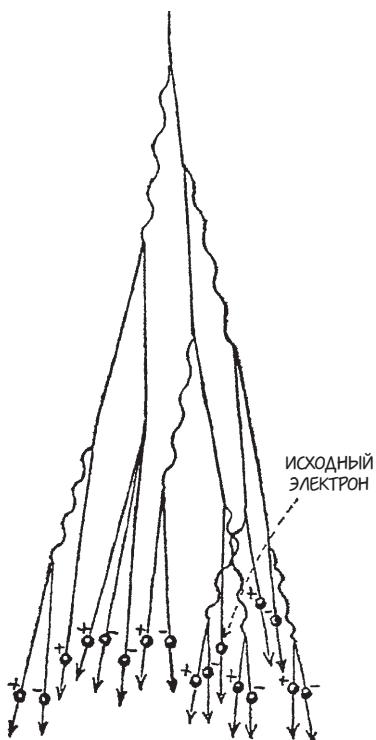


Рис. 59. Происхождение космического ливня.

представление о том, что происходит, когда электроны, движущиеся с колоссальными скоростями, врезаются в верхние слои атмосферы. Проходя вблизи от ядер атомов, которые образуют атмосферу, исходный высокоскоростной электрон постепенно теряет собственную первоначальную энергию, испуская ее в виде гамма-излучения по всей длине своего трека (рис. 59). Это излучение вызывает многочисленные процессы создания пар, и новообразованные положительные и отрицательные электроны устремляются по траектории исходной частицы. По-прежнему сохраняя очень высокую энергию, эти вторичные электроны порождают больше гамма-излучения, которое, в свою очередь, производит еще

таким же образом, как и обычные грозовые тучи в нашей атмосфере, и что создаваемая таким образом разность электрических потенциалов намного выше той, которая ответственна за феномен молнии, ударяющей между облаками во время грозы.

больше новых электронных пар. Процесс последовательного увеличения количества электронных пар повторяется много раз во время прохождения через атмосферу, так что в конечном итоге исходный электрон достигает уровня моря в сопровождении роя вторичных электронов, половина из которых положительная, а половина — отрицательная. Само собой разумеется, что такие космические ливни также можно получить, когда быстрые электроны проходят через массивные материальные тела, где, из-за более высокой плотности, ветвящиеся процессы происходят с гораздо более высокой частотой (см. иллюстрацию «В克莱ки» II).

Возвращаясь снова к мысли о возможном существовании отрицательного протона, мы должны предположить, что этот вид частиц может быть образован нейтроном, который либо приобрел отрицательный заряд, либо, что то же самое, потерял положительный. Легко понять, однако, что такие отрицательные протоны, как и положительные электроны, не просуществуют очень долго в любом привычном для нас веществе. Собственно, их немедленно притянут и поглотят ближайшие положительно заряженные атомные ядра, а после попадания в ядерную структуру они, скорее всего, превратятся в нейтроны. Поэтому, если такие протоны, которые стали бы несомненным вкладом в симметрию имеющейся в настоящее время таблицы элементарных частиц, действительно существуют в материи, их было бы нелегко обнаружить. Не забывайте, что положительные электроны были найдены почти через полвека после того, как в науку ввели понятие отрицательного электрона. Предполагая возможное существование отрицательных протонов, мы говорим об атомах и молекулах, которые находятся — скажем так — в перевернутом виде. Их ядра, построенные из обычных нейтронов и *отрицательных* протонов, должны быть окружены оболочками из *положительных* электронов. Эти «перевернутые» атомы будут иметь свойства, в точности идентичные свойствам обычных атомов, и никоим образом нельзя будет отличить перевернутую воду, перевернутое масло и так далее от обычных веществ под теми же названиями. Никоим образом нельзя будет отличить — если только мы не соединим обычное и «перевернутое» вещество. Стоит, однако, двум таким противоположным веществам соединиться, тут же начнутся процессы взаимной аннигиляции противоположно заряженных электронов, а также процессы взаимной нейтрализации противоположно заряженных нуклонов, и смесь взорвется с силой, превышающей силу взрыва

атомной бомбы. Насколько нам известно, вполне возможно, что существуют отличные от нашей звездные системы, которые построены из таких перевернутых веществ; в таком случае любой обычный булыжник, брошенный из нашей системы в ту, которая построена иным образом, или, наоборот, из другой системы в нашу, стоит ему приземлиться — превратится в атомную бомбу.

На данный момент мы должны оставить эти несколько фантастические предположения о перевернутых атомах* и рассмотреть еще один вид элементарных частиц, которые, будучи, вероятно, не менее своеобразными, имеют к тому же реальные заслуги, на самом деле принимая участие в различных наблюдаемых физических процессах, — это так называемые нейтрино, которые вошли в физику «через заднюю дверь» и, несмотря на раздающиеся со всех сторон крики беотийцев¹, протестующих против них, сейчас занимают непоколебимое положение в семействе элементарных частиц. То, как их нашли, а затем признали, составляет одну из самых увлекательных детективных историй современной науки.

Существование *нейтрино* было открыто методом, который математик называл бы *reductio ad absurdum*². Волнующее открытие началось не с того, что нечто существовало, а с того, что чего-то не хватало. Пропавшее что-то была энергия, а так как энергию, согласно одному из старейших и наиболее надежных законов физики, нельзя ни создать ни уничтожить, открытие, что энергия, которой полагалось бы присутствовать, отсутствовала, указывало на то, что, вероятно, был вор или банда воров, которые ее утаскивали. И вот детективы от науки, имеющие организованный ум, который любит давать вещам наименования, даже когда их не видит, назвали воришек энергии «нейтрино».

Но это — забегая немного вперед. Сейчас же вернемся к фактам великого «дела о краже энергии»: как мы видели ранее, ядро каждого атома состоит из нуклонов, около половины из них нейтральны (нейтроны), остальные заряжены положительным электричеством. Если баланс между относительным числом нейронов и протонов в ядре нарушен добавлением одного или нескольких дополнительных нейтронов либо дополнительных протонов**,

¹ «Крики беотийцев» — суждения невежественных людей.

² Доведение до абсурда (*лат.*).

* У нас принято употреблять термин «антивещество».

** Подобное можно сделать методом ядерной бомбардировки, описанным позже в этой главе.

всегда происходит электрическая коррекция. Если имеется слишком много нейтронов, иные из них, выбросив отрицательный электрон, который покидает ядро, превратятся в протоны. Если наличествует слишком много протонов, некоторые из них, выбросив положительный электрон, превратятся в нейтроны. Рис. 60 иллюстрирует оба процесса данного вида. Такие электрические коррекции атомного ядра известны как процесс «бета-распада», а электроны, испускаемые из ядра, — как «бета (β)-частицы». Поскольку внутреннее преобразование ядра — процесс точно выверенный, он всегда связан с освобождением определенного количества энергии, которая сообщается выброшенному электрону. Таким образом, следовало ожидать, что β -электроны, испускаемые данным веществом, должны были двигаться с одной и той же скоростью. Наблюдаемые факты, касающиеся процессов бета-распада, находились, однако, в прямом противоречии с этими ожиданиями.

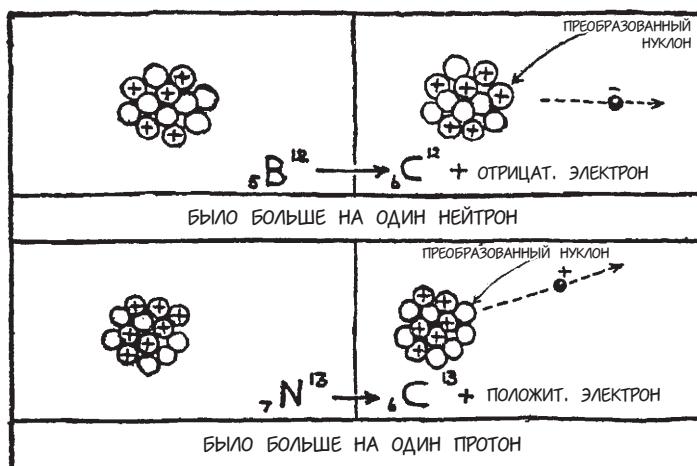


Рис. 60. Схема отрицательного и положительного процессов бета-распада (для удобства представления все нуклоны нарисованы на одной плоскости).

Фактически же оказалось, что электроны, испускаемые данным веществом, имеют разные величины кинетической энергии — от нуля до определенного верхнего предела значения. Поскольку не нашлось никаких других частиц и никакого излучения, которые уравновесили бы это расхождение, «дело о пропавшей

энергии» в процессах бета-распада стало довольно серьезным. Одно время полагали, что мы сталкиваемся здесь с первым экспериментальным доказательством краха знаменитого закона сохранения энергии, что явилось бы настоящей катастрофой для всего сложного здания физической теории. Но имелась еще одна вероятность: возможно, недостающую энергию уносили какие-то частицы нового вида, которые сбегали, оставшись незамеченными любым из наших методов наблюдения. Паули предположил, что роль таких багдадских воров ядерной энергии могли играть гипотетические частицы, названные *нейтрино*, которые не несут никакого электрического заряда и чья масса не превышает массу обычного электрона. Собственно, из известных фактов взаимодействия быстро движущихся частиц и материи можно сделать вывод, что такие легкие незаряженные частицы остались бы незамеченными любым существующим физическим аппаратом и прошли бы без каких-либо трудностей через экран любой, даже чрезвычайно большой толщины. Таким образом, в то время как видимый свет полностью остановила бы тонкая металлическая фольга, а интенсивность высоко проникающих рентгеновского и гамма-излучения существенно уменьшили бы лишь несколько дюймов свинца, пучок нейтрино прошел бы без особого труда сквозь толщу свинца в несколько световых лет! Неудивительно, что они сбегают от всевозможных наблюдений и заметить их можно только по нехватке энергии, вызванной их побегом.

Хотя стоит этим нейтрино оставить ядро, и мы не можем поймать их, существует, однако, способ изучения вторичного эффекта, вызванного их уходом. Когда вы стреляете из винтовки, приклад бьет вас в плечо, когда вы стреляете тяжелым снарядом из пушки, ее ствол откатывается назад. Тот же самый эффект механической отдачи следует ожидать и у атомных ядер, выстреливающих быстрые частицы, и, собственно, было замечено, что ядра в процессе бета-распада всегда приобретают определенную скорость, направленную прочь от выброшенного электрона. Специфическая особенность этой ядерной отдачи заключается, однако, в следующем наблюдаемом факте: независимо от того, выбрасывается ли быстрый или медленный электрон, скорость отдачи ядра всегда примерно одинакова (рис. 61). Это кажется очень странным, так как мы, естественно, ожидаем, что быстрый снаряд вызовет более сильную отдачу пушки, чем медленный. Объясня-

ется эта загадка так: наряду с электроном ядро всегда испускает и нейтрино, что и обеспечивает баланс энергии. Если электрон движется быстро, забирая большую часть доступной энергии, нейтрино движется медленно — и наоборот, поэтому из-за совместного воздействия *обеих* частиц наблюдаемая отдача ядра сильна всегда. Если этот эффект не доказывает существование нейтрино, то ничто другое никогда не докажет!

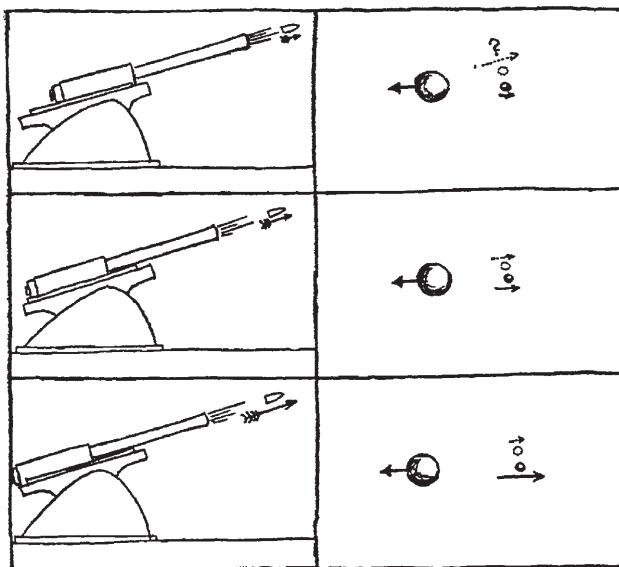


Рис. 61. Проблема отдачи в артиллерии и в ядерной физике.

Теперь мы готовы подвести итоги вышеизложенного обсуждения и представить полный список элементарных частиц, участвующих в строении Вселенной, и взаимоотношений, которые существуют между ними.

Прежде всего есть нуклоны, которые представляют собой основные материальные частицы. Насколько нынешнее состояние знаний позволяет утверждать, они либо нейтральны, либо положительно заряжены, но вполне возможно, что некоторые заряжены отрицательно.

Затем есть электроны, представляющие собой свободные заряды положительного и отрицательного электричества.

306 ГЕОРГИЙ ГАМОВ. ОДИН, ДВА, ТРИ... БЕСКОНЕЧНОСТЬ

Есть также таинственные нейтрино, которые не несут никакого электрического заряда и, предположительно, значительно легче, чем электроны*.

Наконец, есть электромагнитные волны, которые отвечают за распространение электрических и магнитных сил в пустом пространстве.

Все эти фундаментальные составляющие физического мира взаимозависимы и могут соединяться различными способами. Так, нейтрон может перейти в протон, испустив отрицательный электрон и нейтрино,

(нейтрон → протон + отрицат. электрон + нейтрино),

а протон может обратиться в нейтрон, испустив положительный электрон и нейтрино

(протон → нейтрон + положит. электрон + нейтрино).

Два электрона с противоположными электрическими зарядами могут трансформироваться в электромагнитное излучение

(положит. электрон + отрицат. электрон → излучение),

или, напротив, могут образоваться из излучения

(излучение → положит. электрон + отрицат. электрон).

Наконец, нейтрино могут соединяться с электронами, образуя нестабильные единицы, наблюдаемые в космическом излучении и известные как мезоны, или, что довольно неправильно, как «тяжелые электроны»

(нейтрино + положит. электрон → положит. мезон; нейтрино + отрицат. электрон → отрицат. мезон; нейтрино + положит. электрон + отрицат. электрон → нейтральный мезон).

Соединения нейтрино и электронов перегружены внутренней энергией, которая делает их примерно в сто раз тяжелее, чем общая масса составляющих их частиц.

* Последние экспериментальные данные, касающиеся этой темы, указывают на то, что нейтрино весит не более одной десятой массы электрона.

На рис. 62 показана схематическая таблица элементарных частиц, участвующих в строении Вселенной.

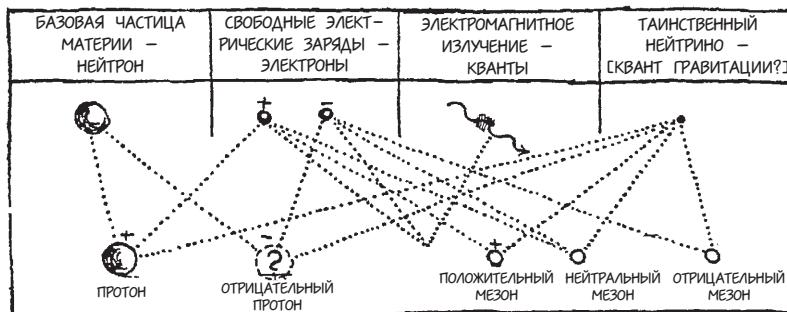


Рис. 62. Схема элементарных частиц современной физики и их различные интеркомбинации.

«Но разве это конец? — можете вы спросить. — Какое мы имеем право предполагать, что нуклоны, электроны и нейтрино — действительно элементарные частицы и их нельзя разделить на еще более малые составные части? Разве не полагали лишь полвека назад, что атомы неделимы? Однако же какую сложную картину они представляют собой сегодня!» Ответ таков: хотя, конечно же, нет никакой возможности предсказать будущее развитие науки о строении материи, сейчас есть гораздо более веские причины считать, что имеющиеся элементарные частицы на самом деле являются базовыми единицами и не могут делиться дальше. В то время как якобы неделимые атомы отличались разнообразием довольно сложных химических, оптических и других свойств, свойства элементарных частиц современной физики чрезвычайно просты; собственно, по простоте их можно сравнить со свойствами геометрических точек. Кроме того, вместо довольно большого количества «неделимых атомов» классической физики, теперь у нас осталось лишь три принципиально разных объекта: нуклоны, электроны и нейтрино. И, несмотря на огромное желание и великие усилия свести все к простейшей форме, нельзя свести нечто до ничто. Таким образом, похоже, что мы и в самом деле достигли предела в нашем поиске основных элементов, из которых строится материя.

2. СЕРДЦЕ АТОМА

Теперь, когда мы внимательно ознакомились с природой и свойствами элементарных частиц, участвующих в строительстве материи, мы можем перейти к более детальному изучению ядра — сердцу каждого атома. В то время как строение внешнего тела атома можно, в некоторой степени, сравнить с миниатюрной планетной системой, строение самого ядра как такового представляет совершенно иную картину. Прежде всего ясно, что силы, удерживающие ядро вместе, не являются чисто электрической природы, так как одна половина ядерных частиц, нейтроны, не несут никакого электрического заряда, а другая половина, протоны, заряжена положительно, и они отталкиваются друг от друга. Но группа частиц не может быть стабильной, если между ними нет ничего, кроме отталкивания!

Таким образом, чтобы понять, почему составные части ядра остаются вместе, никак не обойтись без предположения, что между ними существуют силы другого рода, притягивающие, по своей природе, которые действуют как на незаряженные нуклоны, так и на заряженные. Силы, которые независимо от природы частиц-участниц заставляют их держаться вместе, известны как «силы сцепления» и встречаются, например, в обычных жидкостях, где они не дают отдельным молекулам разлететься во все стороны.

Подобные силы сцепления, действующие между отдельными нуклонами и предотвращающие распад ядра под действием электрического отталкивания между протонами, имеются и в атомном ядре. Таким образом, в отличие от внешнего тела атома, где электроны, образующие различные атомные оболочки, обладают простором для перемещения, ядро представляет собой большое количество нуклонов, упакованных плотно, как сельди в бочке. Автор этой книги был первым, кто предположил, что вещество атомного ядра строится по типу любой обычной жидкости. И так же как в случае с обычными жидкостями, мы имеем здесь дело с явлением поверхности натяжения. Нужно помнить, что явление поверхности натяжения в жидкостях возникает из-за того, что частицу, находящуюся внутри, каждый из окружающих ее соседей тянет с одинаковой силой в свою сторону, частицы же, находящиеся на поверхности, подвержены силам, которые пытаются втянуть их внутрь (рис. 63).

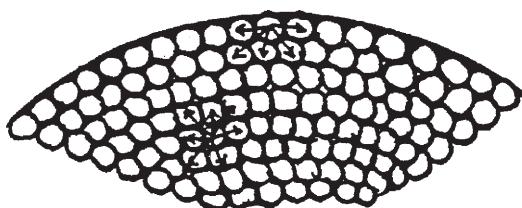


Рис. 63. Объяснение сил поверхностного натяжения в жидкости.

Это приводит к тому, что капельке любой жидкости не требуется воздействия никаких внешних сил, чтобы принять сферическую форму, так как сфера — геометрическая фигура, которая обладает наименьшей поверхностью для любого данного объема.

Следовательно, мы приходим к выводу, что *атомные ядра различных элементов можно рассматривать как просто капельки «ядерной жидкости» разных размеров*. Мы не должны забывать, однако, что, хотя по своим качествам ядерная жидкость очень похожа на обычные жидкости, количественно — она изрядно отличается. Собственно, ее плотность превышает плотность воды на коэффициент 240 000 000 000 000, а силы ее поверхностного натяжения примерно в 1 000 000 000 000 000 раз больше, чем у воды. Чтобы сделать эти ужасающие большие числа более понятными, рассмотрим следующий пример. Предположим, у нас есть проволочная рамка площадью около 2 квадратных дюймов, форма которой напоминает перевернутую заглавную букву *U*, поперек рамку пересекает перекладина из проволоки, прямоугольник, образованный рамкой и перекладиной, заполнен мыльной пленкой; на рис. 64 эта рамка показана в натуральную величину. Силы поверхностного натяжения пленки будут тянуть проволочную перекладину снизу вверх. Мы можем уравновесить силы поверхностного натяжения, подвесив небольшой груз к перекладине. Если пленка толщиной, скажем, 0,01 мм состоит из обычной воды с небольшим количеством мыла, растворенным в ней, то она будет весить около $\frac{1}{4}$ г и удержит общий вес примерно в $\frac{3}{4}$ г.

Далее, если бы можно было сделать похожую пленку из ядерной жидкости, общий вес пленки составил бы пятьдесят миллионов тонн (вес примерно одной тысячи океанских лайнеров), а к проволочной перекладине мы могли бы подвесить груз приблизительно в тысячу миллиардов тонн, что ориентировочно составляет массу Деймоса, второго спутника Марса!



Рис. 64.

Какие же мощные легкие нужно иметь, чтобы выдуть мыльный пузырь из ядерной жидкости!

Рассматривая атомные ядра в качестве крошечных капель ядерной жидкости, мы не должны упустить из виду, что эти капли электрически заряжены, поскольку около половины частиц, образующих ядро, — протоны. Силам электрического отталкивания между частицами, составляющими ядро, которые пытаются разо-

рвать его на две или более частей, противодействуют силы поверхностного натяжения, которые стремятся сохранить его целостность. В этом и кроется основная причина нестабильности атомных ядер. Если силы поверхностного натяжения преобладают, ядро никогда не распадается само по себе, и два ядра, соприкоснувшись друг с другом, будут иметь тенденцию *слиться* — подобно тому, как это происходит с двумя обычными каплями.

Если же, напротив, верх возьмут электрические силы отталкивания, ядро будет проявлять тенденцию спонтанно развалиться на две или более частей, которые разлетятся на большой скорости; такой процесс распада обозначается обычно термином «деление».

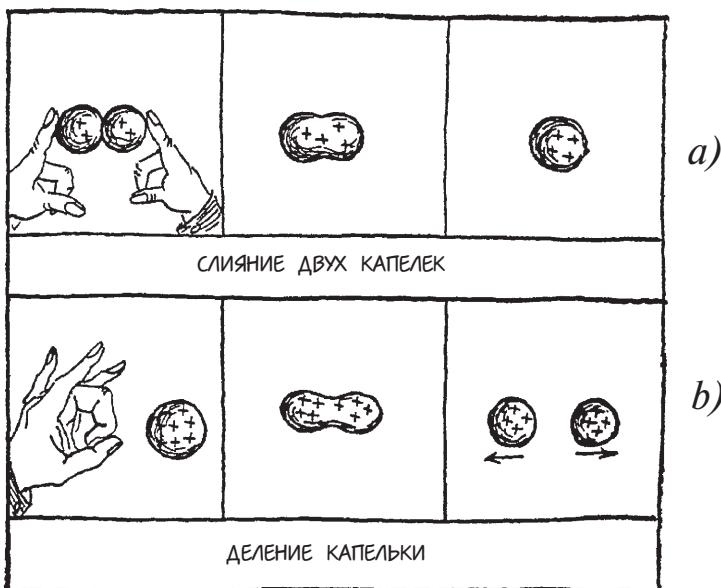


Рис. 65.

Точные расчеты, касающиеся баланса между силами поверхностного натяжения и электрическими силами в ядрах различных элементов, были сделаны Бором и Уилером (в 1939 году) и привели к чрезвычайно важному выводу, что, в то время как силы поверхностного натяжения одерживают верх в ядрах всех элементов из первой половины периодической системы (приблизительно до серебра), в более тяжелых ядрах преобладают силы электрического отталкивания. Таким образом, ядра всех элементов тяжелее

серебра в основном неустойчивы и под действием достаточно сильного толчка извне распадутся на две или более частей с выделением значительного количества внутренней ядерной энергии (рис. 65б). И наоборот, когда два легких ядра с атомным весом меньше, чем у серебра, сближаются, нужно ожидать процесс спонтанного слияния (рис. 65а).

Однако следует помнить, что ни слияние двух легких ядер, ни деление тяжелого ядра обычно не случается, если этому не помочь. Собственно, чтобы вызвать слияние двух легких ядер, мы должны подвести их друг к другу настолько близко, чтобы их действие друг на друга противостояло силам отталкивания, действующим между их зарядами, а чтобы принудить тяжелое ядро пройти через процесс деления, мы должны заставить его колебаться с довольно большой амплитудой, сообщив ему сильный толчок.

Положение дел, при котором определенный процесс не запускается без начального возбуждения, известно в науке как *метастабильное состояние*, и его можно проиллюстрировать на примере камня, нависающего над пропастью, спички в кармане или заряда тротила в бомбе. В каждом случае имеется большое количество энергии, готовое высвободиться, но камень не скатится, если его не толкнуть, спичка не загорится, пока не нагреется от трения о подошву вашей обуви или о другой предмет, а тротил не взорвется, если не сдетонирует от взрывателя. Мы живем в мире, в котором практически каждый предмет, кроме серебряного доллара*, — потенциальная ядерная взрывчатка, и за то, что он не взрывается и не разлетается на мелкие кусочки, мы обязаны великим трудностям, которые сопровождают запуск ядерной реакции, или, если говорить научным языком, чрезвычайно высоким энергиям активации ядерных превращений.

Что касается ядерной энергии, мы существуем (или, скорее, существовали до совсем недавнего времени) в мире, похожем на мир эскимоса, который живет при температуре ниже точки замерзания и для которого единственное твердое вещество — лед, а единственная жидкость — алкоголь. Этот эскимос никогда бы не узнал об огне, так как нельзя получить огонь, потерев друг о друга два куска льда, а алкоголь он считал бы всего лишь приятным напитком, так как не смог бы поднять его температуру до точки горения.

* Следует помнить, что ядра серебра не будут ни сливаться, ни делиться.

И великое смятение человечества, вызванное открытием процесса освобождения энергии в больших количествах, скрытой внутри атома, можно сравнить с изумлением воображаемого эскимоса, который впервые увидел спиртовую горелку.

Тем не менее, как только удастся преодолеть трудности с запуском ядерной реакции, результаты оправдают все связанные с этим неприятности. Возьмем, например, смесь равных количеств атомов кислорода и углерода. Химическое соединение этих веществ в соответствии с уравнением



дало бы нам 920 калорий* на грамм смеси.

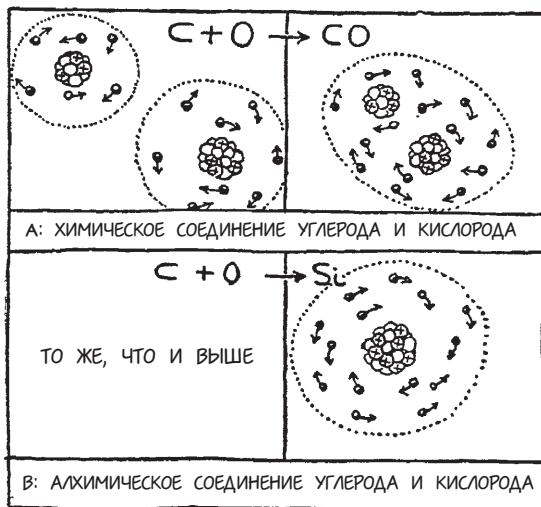


Рис. 66.

Если же вместо обычного химического соединения (молекулярный синтез) (рис. 66а) этих двух видов атомов мы имеем алхимическое соединение (термоядерный синтез) их ядер (рис. 66б):



то энергия, выделяющаяся на грамм смеси, составит 14 000 000 000 калорий, то есть в 15 000 000 раз больше.

* Калория — это единица тепла, которая определяется как энергия, необходимая для подогревания 1 грамма воды на 1 градус Цельсия.

Аналогично при распаде сложной молекулы тротила на молекулы воды, оксида углерода, углекислого газа и азота (молекулярное разделение) выделяется около 1000 калорий на грамм, тогда как, скажем, равная по весу ртуть, если ее подвергнуть процессу ядерного деления, дала бы нам в общей сложности 10 000 000 000 калорий.

Однако не следует забывать, что, в то время как большинство химических реакций с легкостью пройдут при температуре в несколько сотен градусов, соответствующие ядерные превращения даже не начнутся, пока температура не достигнет многих миллионов градусов! Трудность запуска ядерной реакции и служит гарантией того, что непосредственной опасности превращения Вселенной в чистое серебро в одном чудовищном взрыве не существует.

3. РАСПЩЕПЛЕНИЕ АТОМА

Хотя целостность атомных масс представляет собой очень сильный аргумент в пользу сложности атомных ядер, окончательное доказательство этой сложности можно получить только непосредственно из эмпирических данных, касающихся возможности расщепления ядра на две или более отдельных частей.

Первый признак того, что процесс такого распада может действительно иметь место, появился пятьдесят лет назад (в 1896 году), когда Беккерель совершил открытие радиоактивности. Собственно, было показано, что высокопроникающее излучение (подобное обычному рентгеновскому излучению), которое спонтанно испускается атомами таких элементов, как уран и торий, расположенных вблизи нижнего края периодической системы, происходит вследствие медленного самопроизвольного распада этих атомов. Внимательное экспериментальное изучение этого недавно открытого явления привело вскоре к выводу, что распад тяжелого ядра состоит в его спонтанном расщеплении на две в значительной степени неравные части: (1) небольшой осколок, известный как *альфа-частица*, представляющий собой атомное ядро гелия, и (2) остаток исходного ядра, который представляет собой ядро дочернего элемента. Когда исходное ядро урана распадается, выбросив *альфа-частицы*, возникшее ядро дочернего элемента, известное как *уран X*, подвергается внутренней электрической коррекции и из-

лучает два свободных заряда отрицательного электричества (обычные электроны), превращаясь в ядро изотопа урана, которое на четыре единицы легче исходного уранового ядра. За этой электрической коррекцией снова следует серия испусканий α -частиц, затем опять электрические коррекции — и так далее, пока дело наконец не доходит до ядра атома свинца, которое является стабильным и больше не распадается.

Аналогичная серия последовательных радиоактивных превращений с попаременным излучением α -частиц и электронов наблюдается в двух других радиоактивных семействах — семействе тория, начинающегося с тяжелого элемента тория, и семействе актиния, начинающегося с элемента известного как актиноуран¹. В этих двух семействах процессы самопроизвольного распада продолжаются до тех пор, пока не остается лишь три разных изотопа свинца.

Дотошный читатель, вероятно, будет удивлен, сравнив приведенное выше описание спонтанного радиоактивного распада с более общим обсуждением предмета в предыдущем параграфе, в котором утверждалось, что *нестабильность атомного ядра следует ожидать у всех элементов второй половины периодической системы*, где разрушительные электрические силы берут верх над силами поверхностного натяжения, стремящимися сохранить целостность ядра. Если все ядра тяжелее серебра нестабильны, почему тогда самопроизвольный распад наблюдается только у нескольких самых тяжелых элементов, таких как уран, радий и торий? Ответ на это теоретически такой: *все* элементы тяжелее серебра должны рассматриваться в качестве радиоактивных элементов; на самом деле путем распада они медленно превращаются в более легкие элементы. Но в большинстве случаев спонтанный распад происходит настолько медленно, что нет никакой возможности его заметить. Поэтому в таких хорошо знакомых нам элементах, как йод, золото, ртуть и свинец, атомы могут распадаться со скоростью один или два за многие столетия, что слишком медленно, и этого не зарегистрируют даже самые чувствительные физические приборы. Только у тяжелых элементов есть настолько сильная тенденция самопроизвольно распадаться, что результатом становится заметная радиоактивность*. Относительные скорости превращения так-

¹ Уран-235 (U235), естественный изотоп урана.

* В уране, например, происходит несколько тысяч распадов атомов в секунду на каждый грамм вещества.

же определяют способ, которым данное нестабильное ядро распадается. Так, ядро атома урана распадается, например, самыми разными способами: оно может спонтанно разделиться на две равные части, или на три равные части, или на несколько частей, размеры которых широко варьируются. Однако самый простой способ деления для него — на α -частицу и оставшуюся тяжелую часть, и поэтому именно так обычно и происходит.

Наблюдения показали, что самопроизвольный распад ядра урана на две половины примерно в миллион раз менее вероятен, чем отщепление α -частицы. Таким образом, ежесекундно в одном грамме урана около десяти тысяч ядер делятся и каждый испускает α -частицу, но нам придется ждать несколько минут, чтобы увидеть процесс спонтанного деления, в котором ядро урана распадается на две равные половины!

Открытие радиоактивных явлений доказало сложность ядерной структуры и положило конец всяким сомнениям на этот счет, оно также проложило путь для экспериментов по организации искусственных ядерных превращений. Далее возник следующий вопрос: если ядра тяжелых, особенно нестабильных элементов распадаются по собственной инициативе, разве мы не можем разбить ядра других, обычно устойчивых элементов, ударяя их достаточно сильно некой быстро движущейся налетающей ядерной частицей?

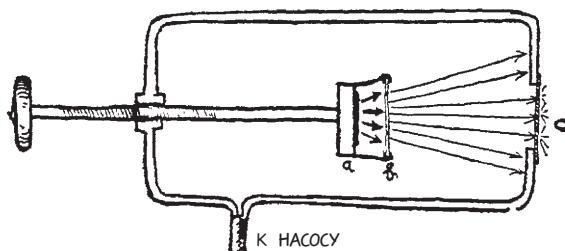


Рис. 67. Как в первый раз расщепили атом.

С этой мыслью на уме Резерфорд решил подвергнуть атомы различных, обычно стабильных элементов интенсивной бомбардировке ядерными осколками (α -частицами), возникшими в результате самопроизвольного распада нестабильных радиоактив-

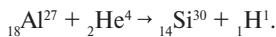
ных ядер. Аппарат, использованный Резерфордом в 1919 году в его первых экспериментах по ядерным превращениям (рис. 67), — верх простоты по сравнению с гигантскими атомными «дробилками», которые применяются в наши дни в нескольких физических лабораториях. Он состоял из цилиндрического вакуумного сосуда, в котором имелось тонкое оконце (*c*), сделанное из флуоресцентного материала и действовавшее как экран. Источником налетающих α -частиц был тонкий слой радиоактивного вещества, нанесенного на металлическую пластину (*a*), а элемент, подвергавшийся бомбардировке (алюминий в данном случае), был в виде тонкой фольги (*b*), помещенной на некотором расстоянии от источника. Фольга-мишень устанавливалась так, чтобы все падающие α -частицы, столкнувшись с ней, в ней бы и застревали, — иначе они бы ударялись об экран, вызывая на нем вспышки. Таким образом, экран оставался полностью темным до тех пор, пока на него не воздействовали вторичные ядерные осколки, испускаемые в результате бомбардировки веществом-мишенью.

Устроив все должным образом и посмотрев на экран через микроскоп, Резерфорд увидел зрелище, которое едва ли возможно было спутать с тьмой. Экран оживляли мириады крошащихся искр, вспыхивающих то тут, то там на всей его поверхности! Каждую вспышку вызывал удар протона о материал экрана, и каждый протон был «осколком», который бомбардирующая α -частица выбила из атома алюминиевой мишени. Теоретическая возможность искусственного превращения элементов стала, таким образом, научно установленным фактом*.

В течение первых десятилетий, последовавших за классическим экспериментом Резерфорда, наука об искусственном превращении элементов стала одной из самых больших и самых важных ветвей физики, был достигнут огромный прогресс в методах как производства быстрых частиц для ядерной бомбардировки, так и наблюдения за полученными результатами.

Прибор, который наиболее удовлетворительно позволяет нам видеть собственными глазами, что происходит, когда бомбардирующая частица ударяет ядро, известен как туманная камера (или

* Процесс, описанный выше, можно представить формулой:



камера Вильсона, названная так по имени ее изобретателя). Она схематически представлена на рис. 68. Принцип ее действия основан на том, что быстро движущиеся заряженные частицы, такие как α -частицы, перемещаясь в воздухе или в любом другом газе, вызывают определенные изменения в атомах, оказавшихся у них на пути. Эти налетающие частицы своими сильными электрическими полями отрывают один или более электронов от атомов газа, попавшихся им на пути, оставляя после себя большое количество ионизированных атомов. Такое положение дел долго не длится, так как вскоре после прохождения бомбардирующей частицы ионизированные атомы вновь отлавливают свои электроны и возвращаются в нормальное состояние. Но если газ, в котором происходит такая ионизация, насыщен водяным паром, на каждом из ионов образуются крошечные капли, так как водяной пар имеет свойство собираться на ионах, частичках пыли и тому подобном, — и это создает тонкую полосу тумана вдоль трека налетающей частицы. Иными словами, трек любой заряженной частицы, движущейся через газ, становится видимым также, как виден след самолета, который выводит в небе буквы дыром.

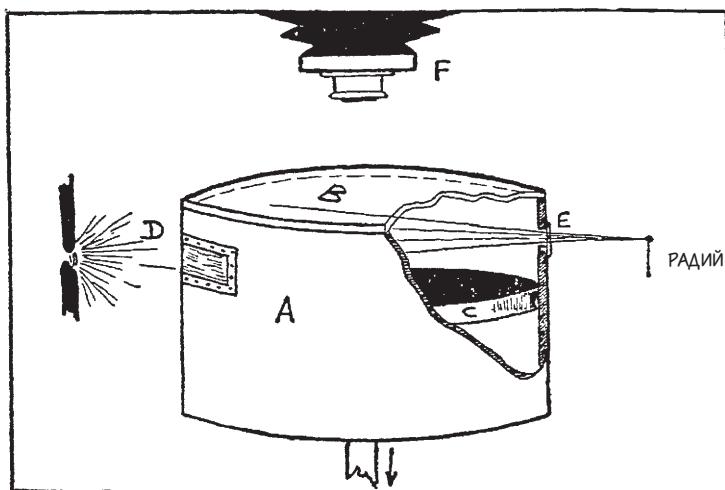


Рис. 68. Схема камеры Вильсона.

С технической точки зрения, камера Вильсона — очень простой аппарат, состоящий, главным образом, из металлического цилиндра (*A*) со стеклянной крышкой (*B*), который имеет поршень (*C*) способный перемещаться вверх и вниз с помощью устройства, не показанного на рисунке. Пространство между стеклянной крышкой и поверхностью поршня заполняется обычным атмосферным воздухом (или, по желанию, любым другим газом), содержащим значительное количество водяного пара. Если поршень резко опускается сразу же после того, как несколько бомбардирующих атомных частиц входят в камеру через окно (*E*), воздух над поршнем будет охлаждаться и водяной пар начнет осаждаться, образуя тонкие полосы тумана вдоль треков пролетающих частиц. Эти полосы тумана, хорошо освещенные через боковое окно (*D*), станут четко выделяться на фоне затемненной поверхности поршня, и их можно будет наблюдать визуально или сфотографировать с помощью фотоаппарата (*F*), который работает автоматически, согласуясь с действиями поршня. Это простое устройство — один из самых ценных аппаратов в современной физике, оно позволяет нам получить прекрасные фотографии результатов ядерной бомбардировки.

Естественно, что возникло желание разработать также и методы, с помощью которых можно было бы производить сильные пучки атомных частиц — путем ускорения различных заряженных частиц (ионов) в сильных электрических полях. Помимо устранения необходимости использовать редкие и дорогие радиоактивные вещества, такие методы позволяют нам применить другие типы бомбардирующих атомных частиц (как, например, протоны) и достичь кинетических энергий выше, чем те, которые обеспечиваются обычным радиоактивным распадом. Среди наиболее важных устройств для производства интенсивных пучков быстро движущихся атомных частиц — *электростатический генератор, циклотрон и линейный ускоритель*; они представлены, вместе с кратким описанием принципа работы, на рис. 69, 70 и 71 соответственно.

Используя вышеописанные типы электрических ускорителей для создания мощных пучков различных атомных частиц и направляя эти пучки в мишени из разнообразных веществ, мы можем получить большое количество ядерных превращений, кото-

рые удобно изучать с помощью фотографий, сделанных в камере Вильсона. Некоторые из этих фотографий, демонстрирующих процессы отдельных ядерных превращений, представлены на иллюстрациях III и IV «Вклейки».

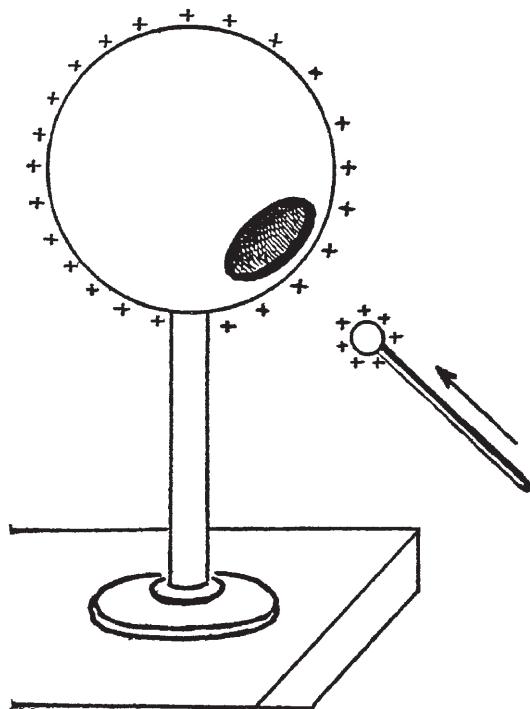


Рис. 69. Принцип работы электростатического генератора.

Из элементарной физики известно, что заряд, который сообщается сферическому металлическому проводнику, распределяется по его поверхности. Следовательно, мы можем зарядить такой проводник до сколь угодно высоких потенциалов, поставляя один за другим небольшие заряды внутрь него путем введения другого проводника через отверстие сферического и касаясь поверхности последнего изнутри. На практике используется сплошная лента, которую вставляют в сферический проводник через отверстие и по которой доставляются внутрь электрические заряды, вырабатываемые небольшим трансформатором.

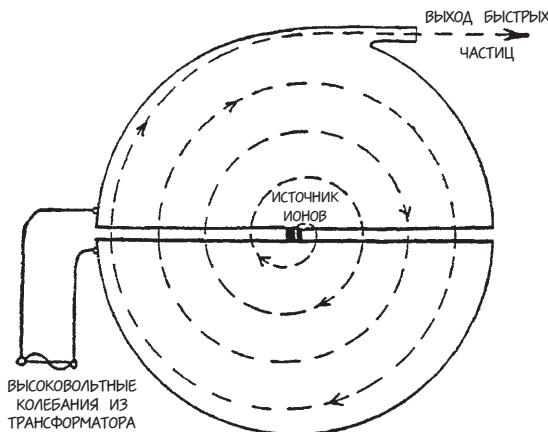


Рис. 70. Принцип работы циклотрона.

Циклотрон состоит, по сути, из двух металлических полуцилиндров, помещенных в вакуум и сильное магнитное поле (оно перпендикулярно плоскости рисунка). Оба полуцилиндра связаны с трансформатором и заряжаются попеременно положительным и отрицательным зарядами. Ионы, исходящие из источника в центре, описывают в магнитном поле круговые траектории, ускоряясь всякий раз, когда переходят из одного полуцилиндра в другой. Двигаясь все быстрее и быстрее, ионы описывают раскручивающуюся спираль и, наконец, выходят на очень высокой скорости.

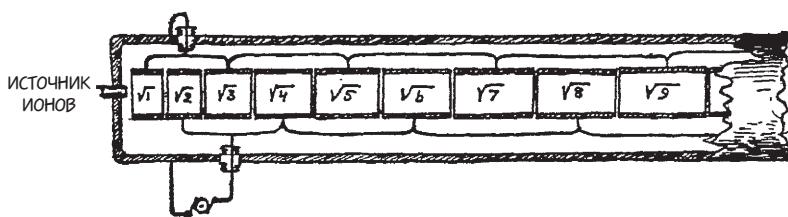


Рис. 71. Принцип работы линейного ускорителя.

Это устройство состоит из ряда цилиндров, чья длина увеличивается от цилиндра к цилинду и которые попеременно заряжаются трансформатором то положительно, то отрицательно. Переходя из одного цилиндра в другой, ионы постепенно ускоряются существующей разностью потенциалов, так что их энергия каждый раз увеличивается на заданную величину. Поскольку скорость пропорциональна квадратному корню из энергии, ионы станут совпадать по фазе с переменным полем, если длина цилиндров будет пропорциональна квадратному корню из целых чисел. Выстроив достаточно длинную систему этого типа, мы можем ускорить ионы до любой желаемой скорости.

Первую фотографию такого рода сделал П. М. С. Блэкетт, в Кембридже, она представляла пучок естественных α -частиц, проходящих через камеру, заполненную азотом*. Прежде всего фотография показала, что треки имеют определенную длину; в силу того что, пролетая через газ, частицы постепенно теряют свою кинетическую энергию, они в конечном итоге останавливаются. Имелось две группы треков, которые очевидно отличались друг от друга длиной и которые соответствовали двум группам α -частиц с разными энергиями, присутствовавшими в источнике (смесь двух альфа-излучателей — ThC и ThC¹). Было заметно, что, будучи в целом довольно прямыми, α -треки демонстрировали явные отклонения ближе к своему концу, где частицы уже потеряли большую часть своей начальной энергии и более легко отклонялись при непрямом столкновении с ядрами атомов азота, которые встречались им на пути. Но главная особенность этой фотографии заключалась в одном конкретном α -треке, который показал характерное разветвление: одна ветвь — длинная и тонкая, другая — короткая и толстая. Разветвление демонстрировало результат прямого лобового столкновения в камере падающей α -частицы и ядра одного из атомов азота. Тонкий длинный трек представлял траекторию протона, выбитого силой удара из ядра азота, а короткий толстый трек correspondовал самому ядру, отброшенному в сторону в результате столкновения. Тот факт, что не было третьего трека, который correspondовал бы рикошету α -частицы, указывал на то, что падающая α -частица прилипла к ядру и двигалась вместе с ним.

На иллюстрации III_в «Вклейки» мы видим эффект от столкновения искусственно ускоренных протонов с ядрами бора. Пучок быстрых протонов, испускаемых из сопла ускорителя (темная тень посередине фотографии), врезается в слой бора, помещенный напротив отверстия сопла, и ядерные осколки разлетаются во все стороны в окружающем воздухе. У этой фотографии есть интересная особенность: треки осколков представлены триплетами (на фотографии можно видеть два таких триплета, один из них отмечен стрелками), — это потому, что ядро бора при ударе протоном распадается на три равные части**.

* Алхимическая реакция, запечатленная на фотографии Блэкетта (ее нет в этой книге), представлена уравнением: $_{7}^{14}\text{N} + _{2}^{4}\text{He} \rightarrow _{8}^{17}\text{O} + _{1}^{1}\text{H}$.

** Уравнение этой реакции следующее: $_{5}^{11}\text{B} + _{1}^{1}\text{H} \rightarrow _{2}^{4}\text{He} + _{2}^{4}\text{He} + _{2}^{4}\text{He}$.

Другая фотография, иллюстрация III_A «Вклейки», показывает столкновения быстро движущихся дейtronов (ядра тяжелого водорода, образованные одним протоном и одним нейтроном) с дейtronами вещества-мишени*.

Более длинные треки, которые видны на фотографии, соответствуют протонам (₁H¹-ядра), а те, что короче, — ядрам в три раза более тяжелого водорода, они известны как тритоны.

Ни одна фотогалерея камеры Вильсона не была бы полной без ядерной реакции с участием нейтронов, которые наравне с протонами являются основными структурными элементами всякого ядра.

Однако тщетно было бы искать на фотографиях из камеры Вильсона треки нейтронов, так как, не имея электрического заряда, эти «темные лошадки ядерной физики» проходят сквозь вещество, не производя никакой ионизации вообще. Но когда вы наблюдаете дымок, курящийся из охотничьего ружья, и утку, падающую с неба, вы знаете, что пуля *была*, даже если вы ее не видели. Аналогично, глядя на фотографию из камеры Вильсона — иллюстрация III_C «Вклейки», которая показывает ядро азота, распавшегося на гелий (трек вниз) и бор (трек вверх), у вас возникает сильное чувство, что это ядро получило мощный удар от невидимой бомбардирующей частицы, прилетевшей слева. Для того чтобы получить такую фотографию на самом деле, нужно поместить на стенке камеры Вильсона слева смесь радия и бериллия, которая, как известно, является источником быстрых нейтронов**.

Прямую линию, по которой двигался нейтрон в камере, можно получить, соединив положение источника нейтронов с точкой, где состоялся распад атома азота.

Процесс деления уранового ядра показан на иллюстрации IV «Вклейки». Эту фотографию сделали Боггильд, Бростром и Ларитсен, она демонстрирует два осколка деления, летящих в противоположных направлениях от тонкой алюминиевой фольги, которая служит носителем уранового слоя, подвергающегося бомбардировке. Ни нейтрон-делитель, ни выбитые нейтроны, на

* Эта реакция представлена уравнением: ₁H² + ₁H² → ₁H³ + ₁H¹.

** В терминах алхимического уравнения процессы, которые здесь происходят, можно записать в следующем виде: (а) производство нейтрона: ₄Be⁹ + ₂He⁴ (α-частица из Ra) → ₆C¹² + ₀n¹; (б) столкновение нейтрона с ядром азота: ₇N¹⁴ + ₀n¹ → ₅B¹¹ + ₂He⁴.

фотографии, конечно же, не видны. Мы могли бы бесконечно описывать различные типы ядерных превращений, получаемые методом бомбардировки ядра электрически ускоренными частицами, но сейчас самое время перейти к более важному вопросу, касающемуся *эффективности* такой бомбардировки. Следует помнить, что иллюстрации III и IV «Вклейки» представляют отдельные случаи расщепления единичных атомов, а для того чтобы полностью превратить, скажем, один грамм бора в гелий, мы должны разбить каждый из $55\,000\,000\,000\,000\,000\,000$ атомов, содержащихся в нем. Далее, самый мощный электрический ускоритель производит около $1\,000\,000\,000\,000$ бомбардирующих частиц в секунду; даже если каждая ускоренная частица будет разбивать одно ядро бора, то для достижения поставленной цели мы должны держать аппарат постоянно работающим в течение 55 миллионов секунд, или около двух лет.

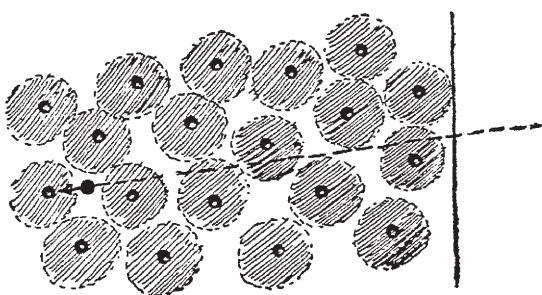


Рис. 72.

Правда состоит в том, однако, что эффективность заряженных бомбардирующих ядерных частиц, производимых различными ускорителями, много меньше, и обычно можно рассчитывать, что только одна частица из нескольких тысяч расколет ядро в бомбардируемом веществе. Объяснение этой крайне низкой эффективности атомной бомбардировки заключается в том, что атомные ядра окружены оболочками электронов, которые имеют способность замедлять заряженные налетающие атомные частицы, движущиеся через них. Поскольку размер атомной оболочки намного больше, чем размер ядра и поскольку мы, конечно же, не можем направить бомбардирующие атомные частицы прямо в ядро, каждая такая частица — прежде чем у нее появится возможность нанести пря-

мой удар по одному из ядер — непременно пронзит множество атомных оболочек.

Ситуация поясняется графически на рис. 72, где атомные ядра представлены маленькими черными кружками, а их электронные оболочки заштрихованными кружками. Соотношение между атомным и ядерным диаметром составляет около 10 000, так что площади мишней находятся в соотношении 100 000 000 к 1. С другой стороны, мы знаем, что заряженная частица, проходящая через электронную оболочку атома, теряет около одной сотой от одного процента своей энергии, так что, пройдя примерно через 10 000 атомных тел, она полностью остановится. Из приведенных выше цифр легко видеть, что только приблизительно у 1 частицы из 10 000 будет шанс ударить ядро до того, как ее начальная энергия рассеется при прохождении через атомные оболочки. Принимая во внимание, что заряженные налетающие частицы демонстрируют низкую эффективность в нанесении разрушительного удара по ядрам вещества-мишени, мы находим следующее: чтобы полностью преобразовать 1 г бора, нужно держать его под ударами пучка, испускаемого современной атомной «дробилкой», в течение как минимум 20 000 лет!

4. НУКЛЕОНИКА

«Нуклеоника» — крайне неудачное слово, но, как и многие подобные слова, похоже, продолжает применяться, и с этим ничего не поделаешь.

Как и термин «электроника», который используется для описания знаний в широкой области практического применения пучков свободных электронов, термин «нуклеоника» следует понимать как науку о практическом использования ядерной энергии, которая высвобождается в больших количествах. Мы видели в предыдущих параграфах, что ядра различных химических элементов (кроме серебра) перегружены огромным количеством внутренней энергии, которую можно освободить в результате процессов ядерного синтеза в случае более легких элементов и в результате деления ядра в случае более тяжелых. Мы также видели, что метод ядерной бомбардировки искусственно ускоренными заряженными частицами, хотя и имеет большое значение для теоретического изучения различных ядерных превращений,

не может использоваться на практике по причине его крайне низкой эффективности.

Поскольку неэффективность обычных налетающих ядерных частиц, таких как α -частицы, протоны и так далее, заключается, по сути, в их электрическом заряде, который становится причиной того, что они теряют свою энергию при прохождении через атомные тела, и который препятствует их достаточному приближению к заряженным ядрам бомбардируемого вещества, следует ожидать, что гораздо лучшие результаты даст использование незаряженных налетающих частиц и бомбардировка различных атомных ядер нейтронами. Здесь, однако, кроется подвох! В связи с тем что нейтроны могут без каких-либо затруднений проникнуть в ядерную структуру, они не существуют в природе в свободном виде, и когда бы свободный нейtron ни был искусственно выбит из какого-либо ядра падающей частицей (например, нейtron из ядра бериллия, подвергнутого альфа-бомбардировке), его очень скоро захватит какое-нибудь другое ядро.

Таким образом, чтобы произвести сильные пучки нейтронов для ядерной бомбардировки, мы должны выбрать каждый из ядер какого-нибудь элемента. А это вновь возвращает нас к низкой эффективности заряженных бомбардирующих частиц, которые используются для этой цели.

Однако из этого заколдованных круга есть выход. Если бы можно было заставить нейтроны выбивать нейтроны и делать это так, чтобы каждый нейtron производил бы более одного потомка, эти частицы плодились бы как кролики (сравните с рис. 97) или как бактерии в зараженной ткани, и вскоре потомство одного нейтрона стало бы достаточно многочисленным, чтобы атаковать каждое атомное ядро в большой массе вещества.

Великий бум в ядерной физике, касающийся самых глубинных свойств материи, который вывел ее из тихой башни из слоновой кости чистой науки ибросил в шумный водоворот кричащих заголовков газет, горячих политических дискуссий и грандиозных промышленных и военных разработок, связан с открытием одной специфической ядерной реакции, делающей такой процесс размножения нейтронов возможным. Все, кто читает газеты, знает, что ядерную энергию, или атомную энергию, как ее обычно называют, можно освободить в процессе деления ядра урана, который открыли Ган и Штассман в конце 1938 года. Но было бы ошибкой полагать, что само деление, то есть расщепление тяжелого

ядра на две почти равные части, может способствовать прогрессивной ядерной реакции. В действительности два осколка ядра, получившиеся в результате деления, несут тяжелые электрические заряды (примерно по половине заряда ядра урана каждый), которые мешают им подойти слишком близко к другим ядрам. Таким образом, стремительно теряя свою первоначально высокую энергию в электронных оболочках, окружающих соседние атомы, эти осколки быстро угомонятся и перестанут делиться вообще.

Открытие того, что, прежде чем замедлиться, каждый осколок деления испускает нейтрон, делает процесс деления исключительно важным для развития самоподдерживающейся ядерной реакции (рис. 73).

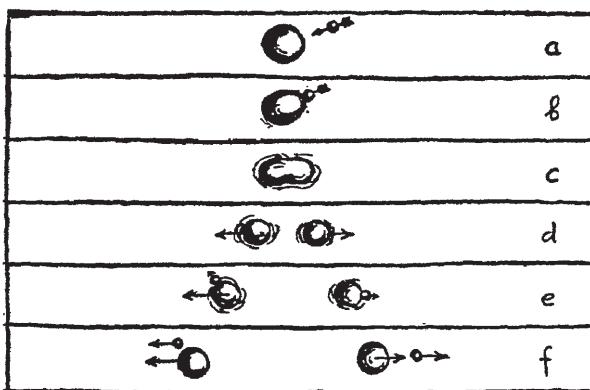


Рис. 73. Последовательные стадии процесса деления.

Это своеобразное последствие деления связано с тем, что, как и обе части сломанной пружины, две половинки разбитого тяжелого ядра начинают свое существование в состоянии довольно сильных колебаний. Эти колебания не способны вызвать повторное деление ядер (каждого из осколков на два), однако являются достаточно сильными, чтобы привести к выбросу некоторых структурных единиц ядра. Когда мы говорим, что каждый осколок испускает один новый нейтрон, мы имеем в виду — исключительно в статистическом смысле: в одних случаях могут выбрасываться два или даже три нейтрана из одного осколка, в то время как в других — ни одного. Среднее количество испускаемых нейтронов из делящегося осколка зависит, конечно же, от интенсивности

его колебаний, которые, в свою очередь, определяются общим количеством высвобожденной энергии в первоначальном процессе деления. Поскольку, как мы уже видели выше, энергия, выделяющаяся при делении, увеличивается с увеличением массы того или иного ядра, следует ожидать, что среднее число нейтронов, приходящихся на осколок деления, также будет больше, чем дальше находится элемент в периодической системе. Таким образом, деление ядра золота (которое не проводилось экспериментально из-за очень высокого значения энергии необходимой для активации) дало бы, вероятно, значительно менее одного нейтрона на осколок; деление ядра урана дает в среднем около одного нейтрона на осколок (около двух нейтронов на одно деление); а среднее число нейтронов на осколок от деления еще более тяжелых элементов (как, например, плутония) можно ожидать более одного.

Чтобы выполнялось условие прогрессивного размножения нейтронов, необходимо, очевидно, чтобы, скажем, из ста нейтронов, входящих в вещество, мы получали бы более ста нейтронов следующего поколения.

Возможность выполнения этого условия зависит от сравнительной эффективности нейтронов в активации деления ядер данного типа и среднего числа новых нейтронов, образованных в результате осуществленного деления. Следует помнить, что, хотя нейтроны гораздо эффективнее в качестве бомбардирующих ядерных частиц, чем заряженные частицы, их эффективность в активации деления, однако, не стопроцентная. Собственно, всегда есть вероятность, что, войдя в ядро, высокоскоростной нейtron отдаст ему только часть своей кинетической энергии, унеся остаток ее с собой; в таких случаях энергия будет рассеиваться между несколькими ядрами и ни одно из них не получит ее достаточно, чтобы вызвать деление.

Из общей теории строения ядра можно сделать вывод, что эффективность нейтронов в активации деления возрастает с увеличением атомной массы того или иного элемента, приближаясь к ста процентам у элементов, находящихся в конце периодической системы.

Ну а теперь мы можем рассмотреть два числовых примера, соответствующих благоприятному и неблагоприятному условиям для нейтронного размножения. (а) Предположим, у нас есть элемент, у которого эффективность быстрых нейтронов в активации деления составляет 35 процентов, а среднее число нейтронов,

производимых за одно деление, — 1,6*. В таком случае 100 исходных нейтронов вызовут всего 35 делений, породив $35 \times 1,6 = 56$ нейтронов следующего поколения. Ясно, что в этом случае количество нейтронов станет быстро уменьшаться, так как каждое поколение будет приблизительно вдвое меньше предыдущего. (b) Теперь предположим, что мы берем более тяжелый элемент, в котором эффективность нейтронов в активации деления возрастает до 65 процентов, а среднее число производимых за одно деление нейтронов доходит до 2,2. В этом случае 100 исходных нейтронов вызовут 65 делений, давая в итоге $65 \times 2,2 = 143$. С каждым новым поколением количество нейтронов увеличивается примерно на 50 процентов, и в течение очень короткого времени их число станет достаточным для того, чтобы атаковать и разбить любое ядро в образце. Мы сейчас рассматриваем прогрессивную *разветвленную цепную реакцию*, а вещества, в которых такая реакция может происходить, называем *делящимися веществами*.

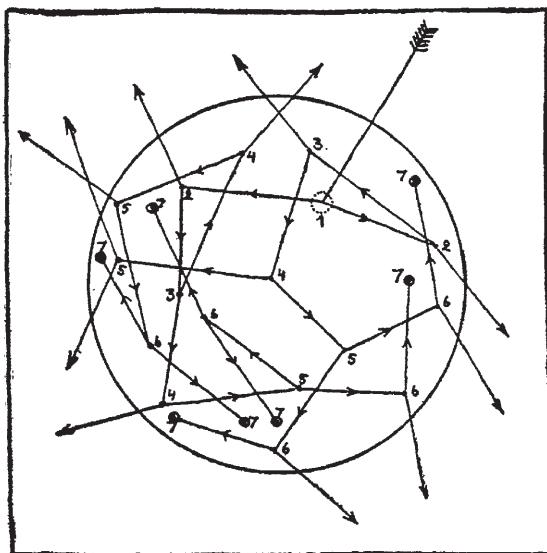


Рис. 74. Ядерная цепная реакция в сферическом фрагменте делящегося материала, которую начал блуждающий нейtron. Хотя многие нейтроны пересекают поверхность вещества и уходят прочь, в последующих поколениях количество нейтронов внутри возрастает и приводит к взрыву.

* Эти числовые значения взяты исключительно для примера и не соответствуют никаким реальным видам ядер.

Кропотливое экспериментальное и теоретическое изучение условий, необходимых для развития прогрессивной разветвленной цепной реакции, приводит нас к выводу, что среди всего многообразия видов ядер, существующих в природе, *есть лишь один особый, с которым такая реакция возможна. Это ядра знаменитого легкого изотопа урана, U-235, — единственного естественного делящегося вещества.*

Однако U-235 не существует в природе в чистом виде, он всегда оказывается в смеси с более тяжелым изотопом урана с большим перевесом последнего, U-238 (0,7 процента U-235 и 99,3 процента U-238), что препятствует развитию прогрессивной цепной реакции в природном уране таким же образом, как присутствие воды препятствует горению влажной древесины. Собственно, только благодаря этой смеси с неактивным изотопом активно делящиеся атомы U-235 все еще существуют в природе, так как в противном случае они были бы давно уничтожены собственной быстрой цепной реакцией. Следовательно, чтобы иметь возможность использовать энергию U-235, нужно либо отделить эти ядра от более тяжелых ядер U-238, либо разработать метод для нейтрализации возмущающего действия более тяжелых ядер, не удаляя их из смеси. В действительности в работе над проблемой освобождения атомной энергии были опробованы оба метода, и оба привели к успешным результатам. Мы обсудим их здесь очень кратко, так как технические проблемы такого рода находятся за пределами рассмотрения настоящей книги*.

Непосредственное разделение двух изотопов урана представляет собой очень сложную техническую проблему, так как из-за их идентичных химических свойств их невозможно разделить с помощью обычных методов промышленной химии. Единственная разница между этими двумя видами атомов заключается в их массе, одна из которых на 1,3% тяжелее другой. Это предполагает методы разделения, основанные на таких процессах, как диффузия, центрифугирование или отклонение ионных пучков в магнитном и электрическом полях, где масса отдельных атомов играет главенствующую роль. На рис. 75 *a, b* мы даем схематическое

* Для получения более подробных сведений читателю предлагается обратиться к книге Селига Гехта «Объясняя атом», которая была впервые опубликована издательством «The Viking Press» в 1947 году. Новое издание, переработанное и дополненное доктором Юджином Рабиновичем, доступно в мягкой обложке в серии «Explorer».

изображение двух основных методов разделения, сопровождая кратким описанием каждый.

Недостаток обоих методов заключается в том, что из-за небольшой разницы в массе между двумя изотопами урана разделение нельзя осуществить за один этап, оно требует большого количества повторений, что приводит к использованию вещества, все более и более обогащенного легким изотопом. Однако после достаточноного количества повторений можно получить довольно чистые образцы U-235.

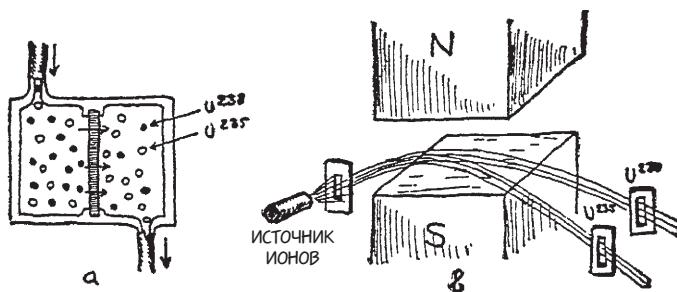


Рис. 75. (a) Разделение изотопов методом диффузии. Газ, содержащий оба изотопа, закачивается в левую часть камеры, откуда он просачивается сквозь стенку, отделяющую одну часть камеры от другой, в правую ее часть. Поскольку легкие молекулы просачиваются быстрее, часть камеры справа оказывается обогащенной U-235. (b) Разделение изотопов электромагнитным методом. Пучок направляется через сильное магнитное поле, и молекулы, содержащие более легкий изотоп урана, отклоняются сильнее. Поскольку для достижения приличной интенсивности нужно использовать широкие прорези, два пучка (с U-235 и с U-238) частично накладываются друг на друга, и мы снова получаем неполное разделение.

Гораздо более остроумный метод состоит в проведении цепной реакции в природном уране, в которой возмущающее действие более тяжелого изотопа искусственно уменьшается с помощью так называемого замедлителя. Чтобы понять этот метод, мы должны помнить, что отрицательное влияние более тяжелого изотопа урана состоит, по сути, в поглощении большого процента нейтронов, произведенных в результате делений U-235, тем самым исключая возможность развития прогрессивной цепной реакции. Следовательно, проблема была бы решена, если бы мы могли сделать что-нибудь, чтобы не допустить похищения нейтронов ядрами U-238, прежде чем они смогут встретиться с ядрами U-235 и вызвать их

деление. На первый взгляд задача удержать ядра U-238, которые в 140 раз многочисленнее, чем ядра U-235, от получения львиной доли нейтронов кажется совершенно невыполнимой. Нам, однако, помог с этой задачей тот факт, что «поймай-нейtron-способность» у двух изотопов урана разная и зависит от скорости, с которой движется нейtron.

Способности к ловле быстрых нейтронов, движущихся прочь от делящегося ядра, у обоих изотопов одинаковы, так что U-238 захватит 140 нейтронов против одного нейтрона, который захватит U-235. Нейтроны, движущиеся со средней скоростью, ядра U-238 захватывают несколько лучше, чем ядра U-235. Однако — и это очень важно — ядра U-235 становятся гораздо более успешными ловцами, если нейтроны движутся очень медленно.

Следовательно, если мы сможем замедлить нейтроны, вызывающие деление, таким образом, что их изначально высокая скорость значительно снизится, и сделаем это до того, как они встретят на своем пути первое ядро урана (238 или 235), ядра U-235, даже будучи в меньшинстве, имеют больше шансов захватить нейтроны, чем ядра U-238.

Необходимого замедления можно достичь, если распределить большое количество маленьких кусочков природного урана в неком веществе (*замедлителе*), который тормозит нейтроны и одновременно не захватывает их слишком много. Лучшие вещества для этой цели — тяжелая вода, углерод и соли бериллия. На рис. 76 мы даем схематическое изображение того, как работает «реактор», образованный зернами урана, распределенного в замедляющем веществе*.

Как указывалось выше, легкий изотоп, U-235, на который приходится лишь 0,7 процента природного урана, является единственным видом делящихся ядер, способным поддерживать прогрессивную цепную реакцию, которая приводит к выделению огромного количества ядерной энергии. Это не означает, однако, что мы не можем создать *искусственно* другие виды ядер, не существующие в природе, но имеющие те же свойства, что и U-235. На самом деле, используя нейтроны, которые производятся в больших количествах в ходе прогрессивной цепной реакции в одном делящемся элементе, мы можем превратить другие, изначально не делящиеся ядра, в подверженные делению.

* Для получения более подробных сведений об урановых реакторах читателю вновь предлагается обратиться к специальным книгам по атомной энергетике.

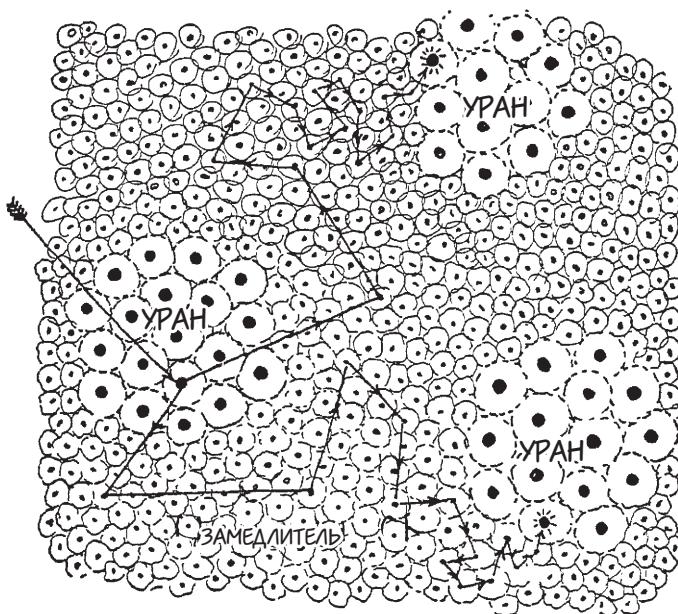


Рис. 76. Это изображение выглядит несколько биологически, но представляет собой скопления урана (большие атомы) в замедляющем веществе (маленькие атомы). Два нейтрона, получившиеся в результате деления ядра урана в одном из скоплений слева, входят в замедлитель и последовательно тормозятся серией столкновений с его атомными ядрами. К тому времени, как эти нейтроны достигают других скоплений урана, они значительно замедляются и захватываются ядрами U-235, которые являются гораздо более эффективными ловцами медленных нейтронов, чем ядра U-238.

События, происходящие в описанном выше «реакторе», где используется природный уран, смешанный с замедляющим веществом, являются примером превращений такого рода. Мы увидели, что с помощью замедлителя можем уменьшить захват нейтронов ядрами U-238 до той степени, которая позволит развиться цепной реакции между ядрами U-235. Однако некоторые нейтроны захватят все же U-238. И к чему это приведет?

Непосредственным результатом захвата нейтронов ядрами U-238 является, конечно же, еще более тяжелый изотоп урана, U-239. Выяснилось, однако, что это новообразованное ядро долго не существует и, испустив один за другим два электрона, переходит в ядро нового химического элемента с атомным номером 94. Этот новый искусственный элемент, который известен как плuto-

ний (Pu-239), подвержен делению даже еще больше, чем U-235. Если мы заменим U-238 другим природным радиоактивным элементом, известным как торий (Th-232), захват нейтронов и последующая эмиссия двух электронов приведет в результате к *другому искусственному делящемуся элементу*, U-233.

Итак, начиная с природного делящегося элемента, U-235, и проводя реакцию цикл за циклом, возможно — только, по *идее конечно, — превратить весь запас природных урана и тория в делящиеся продукты, которые можно использовать как концентрированные источники ядерной энергии*.

Завершая этот параграф, давайте приблизительно оценим общее количество энергии, доступной человечеству как для будущего мирного развития, так и для военного самоуничтожения. Подсчитано, что общее количество U-235 в известных месторождениях урановой руды могут обеспечить достаточно ядерной энергии, чтобы удовлетворить нужды мировой промышленности (полностью переориентированной на ядерную энергию) на период в несколько лет. Если, однако, мы учитываем возможность использования U-238, путем его превращения в плутоний, оценка времени исчисляется несколькими столетиями. Добавив торий (превращенный в U-233), залежей которого в четыре раза больше, чем залежей урана, мы поднимем нашу оценку еще выше — как минимум до одной или двух тысяч лет, что достаточно долго для того, чтобы свести на нет всякое беспокойство о «нехватке атомной энергии в будущем».

Однако, даже если все эти ресурсы ядерной энергии истощатся и никаких новых месторождений урановой и ториевой руды не найдут, будущие поколения всегда смогут получить ядерную энергию из обычных горных пород. Собственно, уран и торий, как и все остальные химические элементы, содержатся в малых количествах практически в любом веществе. Так, обычные гранитные породы содержат 4 г урана и 12 г тория на тонну. На первый взгляд кажется, что этого очень мало, но давайте подсчитаем. Мы знаем, что один килограмм делящегося вещества содержит ядерную энергию в количестве эквивалентном 20 000 тоннам тротила (как у атомной бомбы), если его взорвать, или примерно 20 000 тоннам бензина, если использовать его в качестве топлива. Следовательно, 16 г урана и тория, содержащиеся в одной тонне гранитной породы и превращенные в делящиеся вещества, будут эквивалентны 320 тоннам обычного топлива.

Этого достаточно, чтобы вознаградить нас за все сложности с отделением веществ друг от друга — особенно если обнаружим, что запасы месторождений руд, более богатых ураном и торием, приближаются к концу.

Овладев контролем над процессом высвобождения энергии при ядерном делении тяжелых элементов, таких как уран, физики решили задачу и обратного процесса, называемого *ядерным синтезом*, в котором два ядра сливаются вместе, образуя более тяжелое ядро и выделяя при этом огромное количество энергии. Как мы увидим в главе XI, наше Солнце получает собственную энергию путем такого процесса синтеза, при котором обычные водородные ядра, в результате интенсивных тепловых столкновений внутри его недр, соединяются, чтобы образовать более тяжелые ядра гелия. Чтобы воспроизвести эти так называемые термоядерные реакции для человеческих нужд, самым лучшим веществом для синтеза является тяжелый водород, или *дейтерий*, который существует в малых количествах в обычной воде. Ядро дейтерия, которое называется «дейтроном», содержит один протон и один нейтрон. Когда два дейтрона сталкиваются, происходит одна из двух реакций:



Чтобы добиться превращения дейтерия, его следует подвергнуть воздействию температуры в сто миллионов градусов.

Первым успешным устройством для ядерного синтеза была водородная бомба, в которой реакцию дейтерия вызывал взрыв атомной бомбы. Однако гораздо более сложной проблемой является *управляемая термоядерная реакция*, которая обеспечила бы огромное количество энергии для использования в мирных целях. Главную трудность с обузданием чрезвычайно горячего газа можно преодолеть с помощью сильных магнитных полей, которые предотвращают прикосновения дейтронов к стенкам емкости (иначе они будут таять и испаряться!), удерживая их в центральной горячей области.

Глава VIII

Закон беспорядка

1. ТЕПЛОВОЙ БЕСПОРЯДОК

Если вы нальете в стакан воду и приглядитесь к ней, вы увидите однородную прозрачную жидкость, без намека на какую-либо внутреннюю структуру или движение (при условии, конечно же, что вы не встряхиваете стакан). Мы знаем, однако, что однородность воды только кажущаяся, и, если воду увеличить в несколько миллионов раз, обнаружится ярко выраженная зернистая структура, образованная большим количеством плотно упакованных индивидуальных молекул.

При том же увеличении также становится очевидно, что вода далека от спокойствия и что ее молекулы перемещаются с места на место, толкая друг друга, словно люди в сильно возбужденной толпе. Это хаотическое движение молекул воды или молекул любого другого материального вещества известно как *тепловое движение*, «тепловое» — потому что оно ответственно за явление тепла. Поскольку, хотя молекулярное движение, а также сами молекулы невидимы для человеческого глаза, именно молекулярное движение производит определенное раздражение нервных волокон в организме человека и вызывает ощущение, которое мы называем теплом. Для тех организмов, которые намного меньше, чем люди, таких как, например, крошечные бактерии, взвешенные в капле воды, эффект теплового движения выражен гораздо более ярко: этих бедных существ непрестанно пинают, толкают и швыряют из стороны в сторону беспокойные молекулы, которые атакуют их со всех сторон и не дают никакого покоя (рис. 77). Это занимательное явление, известное как *броуновское движение*, названо в честь английского ботаника Роберта Броуна, который

первым заметил его более века¹ назад, изучая крошечные споры растений; оно носит абсолютно общий характер, и его можно наблюдать при изучении любых видов достаточно мелких частиц, взвешенных в любом виде жидкости, или микроскопических частиц дыма и пыли, плавающих в воздухе.

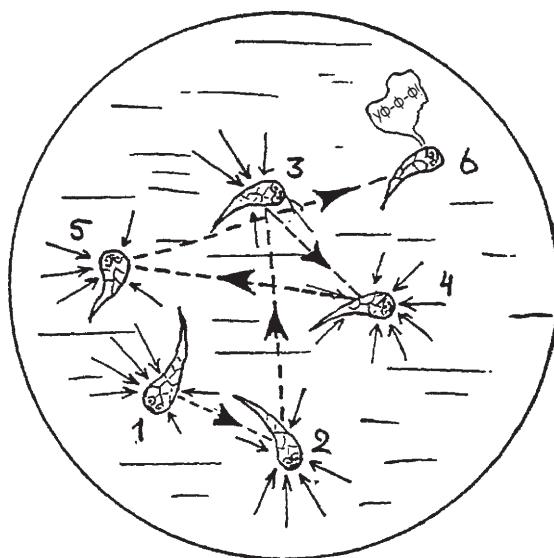


Рис. 77. Шесть последовательных позиций бактерии, которую швыряют из стороны в сторону удары молекул (физически — верно, бактериологически — не особенно).

Если мы нагреваем жидкость, дикая пляска крошечных частиц, взвешенных в ней, становится все более неистовой; если охлаждаем — интенсивность движения заметно падает. Это не оставляет сомнений в том, что здесь мы на самом деле наблюдаем эффект скрытого теплового движения материи, и то, что мы обычно называем температурой, — не что иное, как определение степени молекулярного возбуждения. При изучении зависимости броуновского движения от температуры выяснилось, что при температуре -273°C , или -459°F , тепловое возбуждение вещества полностью прекращается и все его молекулы приходят в со-

¹ На сегодняшний день — почти 200 лет назад; свое открытие Броун совершил в 1827 году.

стояние покоя. Очевидно, что это — самая низкая температура, и она получила название «*абсолютный нуль*». Было бы абсурдом говорить о еще более низких температурах, так как нет движения более медленного, чем абсолютный покой!

При температуре, близкой к абсолютному нулю, молекулы любого вещества обладают столь малым количеством энергии, что силы сцепления, действующие на них, спаивают их в одно твердое тело, и все, что они могут в своем замороженном состоянии, — лишь мелко дрожать. Когда температура поднимается, дрожь становится все более и более интенсивной, и на определенном этапе молекулы обретают некоторую свободу движения и уже способны скользить друг мимо друга. Твердость замороженного вещества исчезает, и оно становится жидким. Температура, при которой происходит процесс плавления, зависит от сил сцепления, действующих на молекулы. В некоторых веществах, таких как водород или смесь азота и кислорода, образующая атмосферный воздух, сцепление молекул очень слабое и тепловое возбуждение разрушает замороженное состояние при сравнительно низких температурах. Так, водород существует в замороженном состоянии только при температуре ниже 14 К (то есть ниже -259°C), тогда как твердые кислород и азот плавятся при 55 К и 64 К соответственно (то есть при -218°C и -209°C). В других веществах сцепление между молекулами сильнее, и они остаются твердыми и при более высоких температурах: так, чистый спирт пребывает в замерзшем состоянии до -130°C , в то время как замерзшая вода (лед) тает всего лишь при 0°C . Другие вещества остаются твердыми и при гораздо более высоких температурах: кусок свинца будет плавиться только при $+327^{\circ}\text{C}$, железо — при $+1535^{\circ}\text{C}$, а редкий металл, известный как осмий, остается твердым до температуры $+2700^{\circ}\text{C}$. Хотя в твердом состоянии вещества молекулы крепко привязаны к своим местам, это совсем не означает, что на них не влияет тепловое возбуждение. В самом деле, согласно основному закону теплового движения, количество энергии в каждой молекуле при данной температуре одинаково для всех веществ — твердых, жидких или газообразных, и разница заключается лишь в том, что в некоторых случаях этой энергии достаточно, чтобы оторвать молекулы от их фиксированных положений и дать им перемещаться туда-сюда, а в других случаях они могут только дрожать на одном месте, подобно злой собаке, посаженной на короткую цепь.

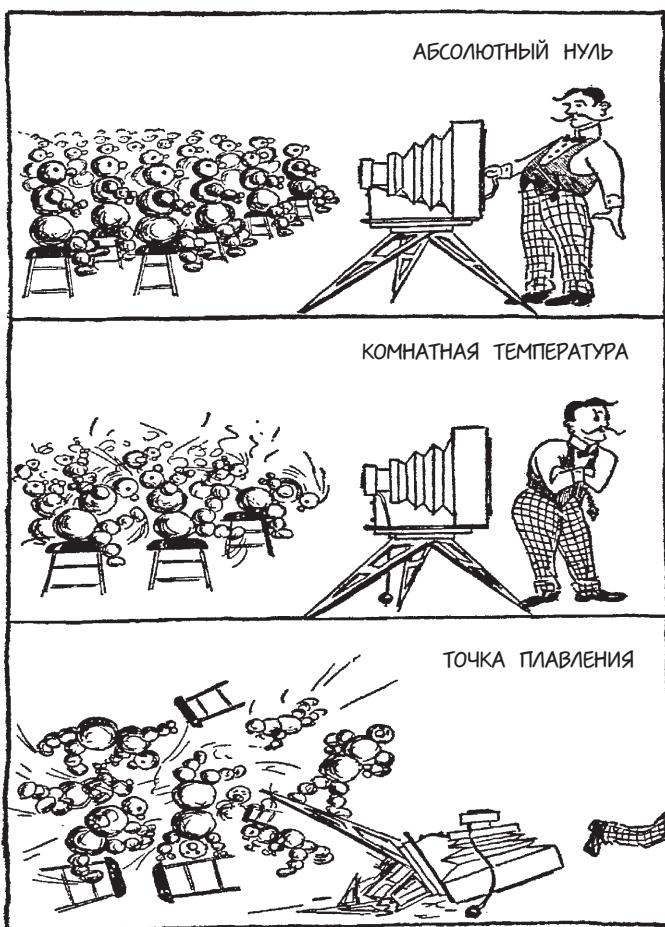


Рис. 78.

Эту тепловую дрожь, или колебание, молекул, образующих твердое тело, можно легко наблюдать на рентгеновских снимках, описанных в предыдущей главе. Мы действительно видели именно эту дрожь; поскольку фотографирование молекул в кристаллической решетке требует продолжительного времени, очень важно, чтобы они не меняли занятого положения во время экспозиции. Но постоянная дрожь в определенной точке не способствует получению хорошей фотографии, и в результате выходит несколько размытое изображение. Этот эффект виден у молекулы на иллю-

стации I «Вкладыша». Для получения более четких снимков кристаллы необходимо охладить настолько, насколько возможно. Иногда это достигается погружением их в жидкий воздух. С другой стороны, если кристалл, который нужно сфотографировать, подогревают, изображение становится все более и более размытым, и в точке плавления порядок полностью исчезает — из-за того что молекулы покидают свои места и начинают хаотично двигаться в расплавленном веществе.

После того как твердый материал расплывается, молекулы, тем не менее, остаются вместе, так как тепловое возбуждение, хотя и достаточно сильно, чтобы сместить их с фиксированного положения в кристаллической решетке, все же недостаточно, чтобы окончательно оторвать их друг от друга. Однако при еще более высоких температурах силы сцепления больше не способны удерживать молекулы вместе, и они разлетаются кто куда — если только стены не останавливают. Когда подобное происходит, в результате получается вещество в газообразном состоянии. Как и при плавлении твердого тела, испарение жидкостей происходит у разных материалов при разных температурах, и вещества с более слабым внутренним сцеплением превращаются в пар при более низких температурах, чем те, у которых силы сцепления сильнее. В этом случае процесс довольно существенно зависит также и от давления, под которым жидкость находится, так как давление снаружи явно помогает силам сцепления удерживать молекулы вместе. Так, например, известно, что вода в герметично закрытом чайнике кипит при более высокой температуре, чем в открытом. С другой стороны, на вершинах высоких гор, где атмосферное давление значительно ниже, вода будет кипеть при температуре намного меньше 100 °С. Здесь нужно заметить, что, измерив температуру, при которой будет кипеть вода, можно рассчитать атмосферное давление и, следовательно, высоту данного местоположения над уровнем моря.

Но не следуйте примеру Марка Твена, который, если верить его рассказу, однажды решил поместить анероидный барометр в котелок с кипящим гороховым супом. Это не даст вам никакого представления о высоте, а вот вкус супа оксид меди испортит.

Чем выше точка плавления вещества, тем выше его точка кипения. Так, жидкий водород кипит при -253°C , жидкий кислород и азот при -183°C и -196°C , спирт при $+78^{\circ}\text{C}$, свинец при

+1620 °C, железо при +3000 °C, а осмий всего лишь при +5300 °C и более*.

Разрушение красивой кристаллической структуры твердого тела заставляет молекулы сначала ползать друг рядом с другом, как черви, а потом разлететься, как стайка испуганных птиц. Но это последнее явление все еще не предел разрушительной силы увеличивающегося теплового движения. Если температура поднимается еще выше, ставится под угрозу само существование молекул, так как постоянно растущая сила межмолекулярных столкновений способна разбить их на отдельные атомы. Это — так называемая *термическая диссоциация*, и зависит она от относительной силы молекул, подвергнутых ее действию. Молекулы некоторых органических веществ распадутся на отдельные атомы или группы атомов при температурах всего лишь в несколько сотен градусов. Для того чтобы уничтожить другие, более прочные молекулы, такие как молекулы воды, потребуется температура более тысячи градусов. Но когда температура поднимается до нескольких тысяч градусов, никаких молекул не остается, а вещество становится газообразной смесью чистых химических элементов.

Так, например, обстоят дела на поверхности нашего Солнца, где температура колеблется в районе 6000 °C. С другой стороны, в сравнительно холодной атмосфере красных звезд** некоторые молекулы все еще сохраняются — факт, продемонстрированный методами спектрального анализа.

Сила тепловых столкновений при высоких температурах не только разбивает молекулы на составляющие их атомы, но также повреждает и сами атомы, отщипывая у них внешние электроны. Эта *термическая ионизация* становится все более и более заметной, когда температура поднимается до десятков и сотен тысяч градусов и достигает своего завершения, поднявшись до нескольких миллионов градусов выше нуля. При этих крайне высоких температурах, что намного выше тех, которые мы можем воспроизвести в наших лабораториях, но которые обычны в недрах звезд и, в частности, внутри нашего Солнца, атомы как таковые перестают существовать. Все электронные оболочки полностью сорваны, и вещество становится смесью голых ядер и свободных электронов, бешено носящихся в пространстве и с чудовищной силой

* Все значения даны при атмосферном давлении.

** См. главу XI.

сталкивающихся друг с другом. Однако, несмотря на полное разрушение атомных тел, вещество по-прежнему сохраняет свои основные химические характеристики благодаря тому, что остаются целыми атомные ядра. Если температура упадет, ядра вновь отловят свои электроны и целостность атомов восстановится.

Для достижения полной термической диссоциации вещества, то есть для того чтобы разбить сами ядра на отдельные нуклоны (протоны и нейтроны), температура должна подняться, как минимум, до нескольких миллиардов градусов. Даже внутри самых горячих звезд мы не найдем столь высоких температур, хотя кажется весьма вероятным, что температуры такой величины и в самом деле существовали несколько миллиардов лет назад, когда наша Вселенная была молода. Мы вернемся к этому волнующему вопросу в последней главе книги.

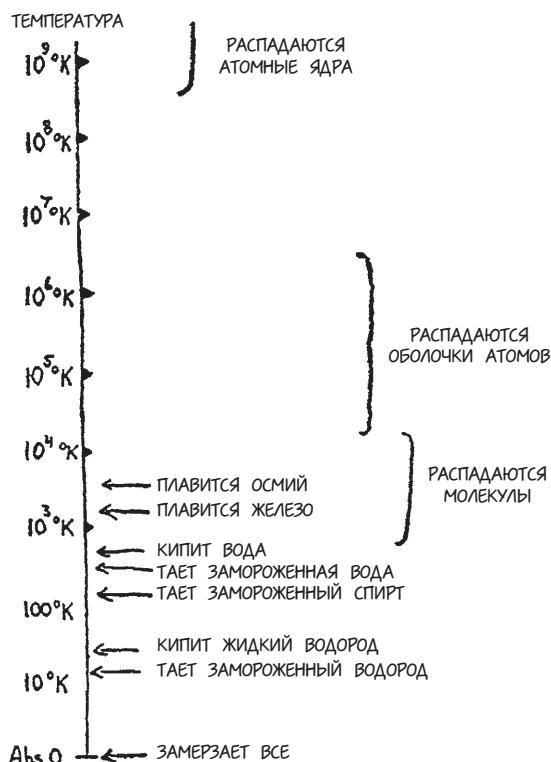


Рис. 79. Разрушительное действие температуры.

Итак, мы видим, что эффект теплового возбуждения заключается в поэтапном разрушении сложной архитектуры материи, построенной на законе квантовой физики, и превращении этого величественного здания в массу частиц, неистово мечущихся туда-сюда и сталкивающихся друг с другом, не подчиняясь никакому очевидному закону или закономерности.

2. КАК ОПИСАТЬ БЕСПОРЯДОЧНОЕ ДВИЖЕНИЕ?

Было бы, однако, серьезной ошибкой полагать, что из-за хаотичности теплового движения ему нельзя дать физического описания. Сам факт, что тепловое движение *совершенно беспорядочно* заставляет его подчиняться закону иного рода — закону *беспорядка*, более известному как *закон статистического поведения*. Чтобы понять это утверждение, давайте обратимся к небезызвестной проблеме «Прогулки пьяницы». Предположим, мы наблюдаем за пьяницей, который стоял посреди большой городской площади, привалившись к фонарному столбу (никто не знает, как и когда он туда попал), и вдруг решил пойти куда-то. Итак, он идет, делая несколько шагов в одном направлении, затем несколько шагов в другом — и так далее, и так далее, — каждые несколько шагов меняя свой курс абсолютно непредсказуемым образом (рис. 80). Как далеко окажется пьяница от фонарного столба после, скажем, ста фаз своего беспорядочного зигзагообразного путешествия? Сначала можно подумать, что из-за непредсказуемости каждого поворота ответить на этот вопрос нет никакой возможности. Если, однако, мы рассмотрим проблему немного внимательнее, то обнаружим, что, хотя мы действительно не можем сказать, где пьяница окажется в конце своей прогулки, мы вполне в состоянии ответить на вопрос о его *наиболее вероятном* расстоянии от фонарного столба после данного большого числа поворотов. Для того чтобы подойти к этой проблеме строго математически, давайте нарисуем на асфальте площади две оси координат с фонарным столбом в качестве начала отсчета; ось X направлена к нам, а ось Y — вправо. Пусть R — расстояние от фонарного столба, на котором находится пьяница после N -го количества зигзагов (на рис. 80 их 14). Если теперь X_N и Y_N являются проекциями N -го отрезка пути на соответствующую ось, теорема Пифагора даст нам, очевидно, следующее:

$$R^2 = (X_1 + X_2 + X_3 + \dots + X_N)^2 + (Y_1 + Y_2 + Y_3 + \dots + Y_N)^2,$$

где X -ы и Y -и являются положительными или отрицательными в зависимости от того, двигался ли наш пьяница от столба или к столбу в каждой конкретной фазе своей прогулки. Обратите внимание, что, так как его движение *совершенно беспорядочно*, положительных значений X -ов и Y -ов будет примерно столько же, сколько и отрицательных. Рассчитывая значение квадрата членов в скобках, согласно элементарным правилам алгебры, мы должны умножить каждый член в скобках и на себя, и на каждый из всех других имеющихся членов.

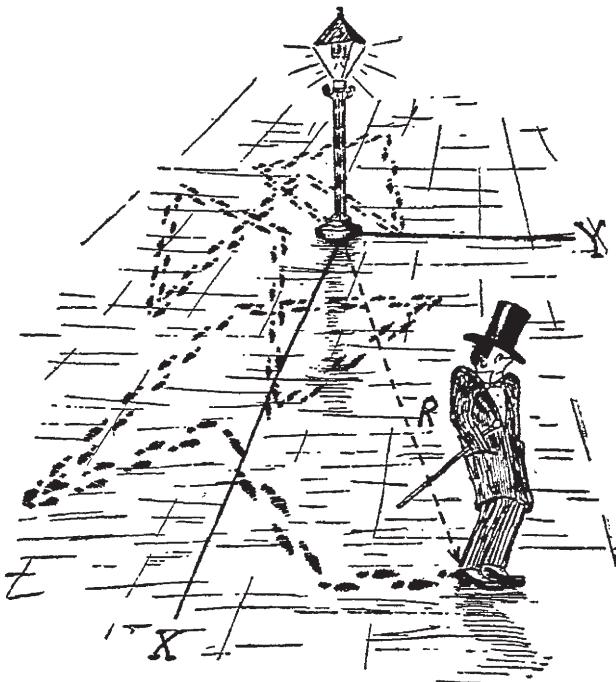


Рис. 80. Прогулка пьяницы.

Таким образом:

$$(X_1 + X_2 + X_3 + \dots + X_N)^2 = (X_1 + X_2 + X_3 + \dots + X_N) \cdot (X_1 + X_2 + X_3 + \dots + X_N) = \\ = X_1^2 + X_1 X_2 + X_1 X_3 + \dots X_2^2 + X_1 X_2 + \dots X_n^2.$$

Эта длинная сумма будет содержать и квадраты всех X -ов ($X_1^2, X_2^2 \dots X_N^2$), и так называемые смешанные произведения, как, например, X_1X_2, X_2X_3 и тому подобное.

До сих пор мы имели дело с простой арифметикой, но сейчас, из-за беспорядочности прогулки пьяницы, подошли к области статистики. Поскольку он двигался совершенно случайным образом и с одной и той же вероятностью сделал бы шаг и к столбу, и от него, значения X -ов имеют шансы пятьдесят на пятьдесят быть как положительными, так и отрицательными. Следовательно, просматривая «смешанные произведения», вы, вероятно, всегда найдете пары, которые имеют одинаковое числовое значение, но противоположные знаки и таким образом компенсируют друг друга, и чем больше общее количество поворотов, тем более вероятно, что произойдет такая компенсация. В итоге остаются лишь квадраты X -ов, так как квадрат всегда положителен. Следовательно, все это можно записать как $X_1^2 + X_2^2 + \dots + X_n^2 = NX^2$, где X — средняя длина проекции отрезка зигзагообразной линии на ось X .

Таким же образом мы находим, что вторые скобки, содержащие Y -и, можно сократить до NY^2 , где Y будет средней проекцией отрезка на ось Y .

Повторимся: то, что мы сделали, — это не строго алгебраическая операция, она основывается на статистическом аргументе, касающемся взаимной компенсации «смешанных произведений» из-за случайного характера перемещения. Для наиболее вероятного расстояния, на котором наш пьяница находится от фонарного столба, мы теперь получаем:

$$R^2 = N(X^2 + Y^2),$$

или же

$$R = \sqrt{N} \sqrt{X^2 + Y^2}.$$

Но средние проекции отрезка на обе оси — это 45° -проекция, поэтому $X^2 + Y^2$ (опять же по теореме Пифагора) равен средней длине зигзага. Обозначив его l , мы получаем:

$$R = l \sqrt{N}.$$

Проще говоря, наш результат означает: *наиболее вероятное расстояние, на которое наш пьяница уйдет от фонарного столба после определенного большого числа беспорядочных поворотов, равно*

средней длине каждого прямого участка, который он проходит, умноженной на квадратный корень из их количества.

Итак, если пьяница каждый раз, перед тем как повернуть (под непредсказуемым углом!), проходит один ярд¹, то он, наиболее вероятно, будет находиться всего в десяти ярдах от фонарного столба, пройдя в общей сложности сто ярдов. Если бы пьяница не поворачивал, а шел прямо, он бы удалился на сотню ярдов, что демонстрирует явное преимущество прогулок в трезвом состоянии.

Статистическая природа приведенного выше примера раскрывается в том, что мы ссылаемся здесь только на *наиболее вероятное*, а не на точное расстояние в каждом индивидуальном случае. Каждой-нибудь один пьяница — может так случиться, хотя это и маловероятно — вообще нигде не повернет и, двигаясь, таким образом, по прямой линии, уйдет далеко от фонарного столба. Может случиться и так, что он станет всякий раз поворачивать, скажем, на 180 градусов, оказываясь тем самым лицом к фонарному столбу после каждого второго поворота. Но если большое количество пьяниц, начав от одного фонаря, будут двигаться, не мешая друг другу, по разным зигзагообразным траекториям, вы обнаружите, что через достаточно продолжительное время они разбредутся по определенной площади вокруг фонарного столба таким образом, что *среднее расстояние от столба можно рассчитать по приведенному выше правилу*. Пример такого распределения вследствие беспорядочного движения показан на рис. 81, где мы рассматриваем шесть гуляющих пьяниц. Само собой разумеется, что чем больше пьяниц и чем больше количества поворотов, которые они совершают во время своей беспорядочной прогулки, тем точнее правило.

Теперь замените пьяниц какими-нибудь микроскопическими телами, такими как споры растений или бактерии, взвешенные в жидкости, и вы получите именно ту картину, которую ботаник Броун увидел в своем микроскопе. Правда, споры и бактерии трезвые, но, как мы уже сказали выше, их постоянно пинают, отправляя во все возможные стороны, окружающие молекулы, участвующие в тепловом движении, и поэтому они вынуждены следовать точно таким же беспорядочным зигзагообразным траекториям, как и человек, который под воздействием алкоголя полностью утратил чувство направления.

¹ 1 ярд равен 91,44 см.

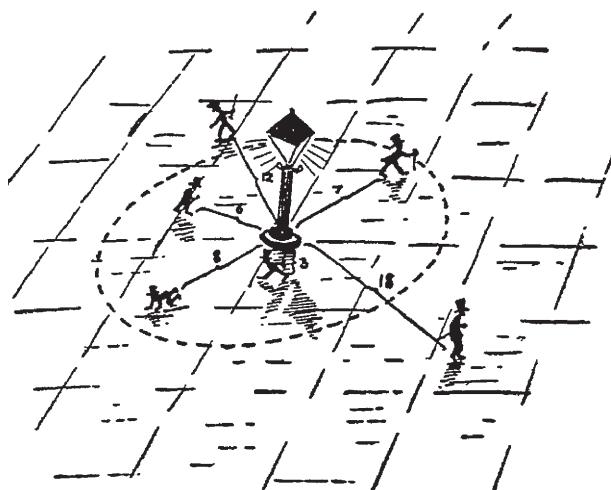


Рис. 81. Статистическое распределение шести гуляющих пьяниц вокруг фонарного столба.

Если вы смотрите через микроскоп на броуновское движение большого количества мелких частиц, взвешенных в капле воды, вы, как правило, сосредоточиваетесь на определенной их группе, которая в данный момент сконцентрирована в данной маленькой области (около «фонарного столба»). Далее вы заметите, что они постепенно распределяются по всей зоне видимости и что среднее расстояние, на котором они находятся от точки отсчета, увеличивается пропорционально квадратному корню из временного интервала, — как того и требует математический закон, с помощью которого мы рассчитали расстояние, покрытое гуляющим пьяницей.

Один и тот же закон движения применим, конечно же, к любой отдельно взятой молекуле в капле воды; но вы не можете видеть молекулы, и даже если бы увидели, не смогли бы отличить одну от другой. Чтобы сделать такое движение видимым, нужно использовать два различных вида молекул, отличающихся, например, по цвету. Итак, давайте наполним химическую пробирку до половины водным раствором перманганата калия, который придаст воде красивый фиолетовый оттенок. Если теперь мы нальем поверх раствора немного чистой воды, действуя осторожно, чтобы слои не перемешались, то заметим, что краситель постепенно проникает в чистую воду. Если вы подождете достаточно, то обнаружите, что вся

вода от дна до поверхности равномерно окрасилась. (См. рис. 82.) Это хорошо знакомое всем явление известно как *диффузия*, и связано оно с хаотическим тепловым движением молекул красителя среди молекул воды. Нам следует представить каждую молекулу перманганата калия маленьким пьяницей, которого гоняют туда-сюда непрерывно сыплющиеся удары от других молекул. Поскольку в воде молекулы упакованы довольно плотно (в отличие от их расположения в газе), средняя длина свободного пробега каждой молекулы между двумя последовательными столкновениями очень коротка — приблизительно лишь одна стомиллионная дюйма. Поскольку, с другой стороны, молекулы при комнатной температуре движутся со скоростью около одной десятой мили в секунду, требуется всего одна миллионная миллионной доли секунды, чтобы молекула столкнулась с другой молекулой. Таким образом, в течение одной секунды каждая молекула красителя подвергнется примерно миллиону миллионов последовательных столкновений и изменит направление движения столько же раз. Среднее расстояние, пройденное за первую секунду, будет равно одной стомиллионной дюйма (длина свободного пробега), умноженной на квадратный корень из миллиона миллионов. Это дает среднюю скорость диффузии — всего одна сотая дюйма в секунду; довольно медленное продвижение, учитывая, что, если бы ее не отклоняли столкновения, та же самая молекула оказалась бы на расстоянии в одну десятую мили! Если вы подождете 100 с, молекула продвинется на расстояние в 10 раз большее ($\sqrt{100} = 10$), а через 10 000 с, то есть примерно через 3 часа, диффузия распространит краситель в 100 раз дальше ($\sqrt{10000} = 100$), то есть на расстояние около 1 дюйма. О да, диффузия — процесс медленный; когда вы кладете кусок сахара в чашку чая, лучше его размешать, чем ждать, пока молекулы сахара распространятся повсюду за счет собственного движения.

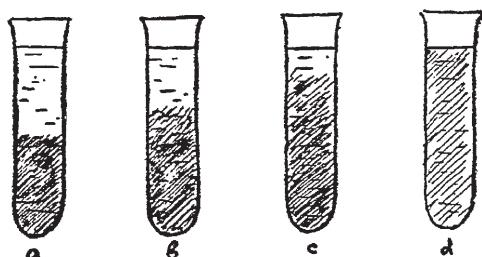


Рис. 82.

В качестве другого примера процесса диффузии, который является одним из наиболее важных процессов в молекулярной физике, давайте рассмотрим способ, которым тепло распространяется по железной кочерге, один конец которой помещен в камин. Вы знаете из собственного опыта, что проходит довольно много времени, прежде чем другой конец кочерги становится некомфортно горячим, но вы, вероятно, не знаете, что тепло переносится по металлическому стержню с помощью процесса диффузии электронов. Да-да, обычная железная кочерга, как и любой другой металлический объект, буквально напичкана электронами. Разница между металлом и другими веществами, например, стеклом, заключается в том, что атомы металла, будучи вовлечеными в хаотическое тепловое движение, теряют часть своих внешних электронов, так как они свободны блуждать по всей металлической решетке, подобно молекулам газа.

Поверхностные силы на внешних границах металлического предмета препятствуют уходу этих электронов*, но в своем движении внутри вещества они практически полностью свободны. Если приложить электрическую силу к металлической проволоке, свободные, несвязанные, электроны бросятся стремглав в направлении силы, создавая явление электрического тока. Неметаллы, с другой стороны, обычно хорошие диэлектрики, потому что все их электроны привязаны к атомам и, следовательно, не могут двигаться свободно.

Когда один конец металлического стержня находится в огне, тепловое движение свободных электронов в этой части металла значительно возрастает, и быстро движущиеся электроны начинают проникать в другие области, неся с собой дополнительную энергию тепла. Процесс очень похож на диффузию молекул красителя в воде, за исключением того, что вместо двух разных видов частиц (молекул воды и молекул красителя) здесь мы имеем *диффузию горячего электронного газа в область занятую холодным электронным газом*. Однако закон прогулки пьяницы применяется здесь точно так же, и расстояния, на которые распространяется тепло в металлическом стержне, увеличиваются как квадратные корни из соответствующих интервалов времени.

* Когда мы доводим металлическую проволоку до высокой температуры, тепловое движение электронов внутри нее становится более интенсивным, и некоторые из них уходят через поверхность. Это явление используется в электронных лампах и знакомо всем радиолюбителям.

В качестве последнего примера диффузии давайте возьмем совершенно иной случай — космический. Как мы узнаем из следующих глав, энергия нашего Солнца производится глубоко в его недрах алхимическим превращением химических элементов. Эта энергия высвобождается в виде интенсивного излучения, и «частицы света», или «кванты света», начинают свой долгий путь через тело Солнца к его поверхности. Поскольку свет движется со скоростью 300 000 км в секунду, а радиус Солнца составляет всего 700 000 км, кванту света потребовалось бы чуть более двух секунд, чтобы выйти наружу, если бы он двигался по прямой, без каких-либо отклонений. Однако это далеко не так: на своем пути наружу световые кванты претерпевают бесчисленное количество столкновений с атомами и электронами в веществе Солнца. Свободный проход кванта света в солнечной материи составляет около сантиметра (это намного длиннее, чем свободный проход молекулы!), и, поскольку радиус Солнца составляет 70 000 000 000 см, квант света должен сделать $(7 \cdot 10^{10})^2$, или $5 \cdot 10^{21}$, шагов пьяницы, чтобы достичь поверхности. Поскольку каждый шаг требует $\frac{1}{3^{10}}$, (или $3 \cdot 10^{-11}$ с), полное время путешествия равно $3 \times 10^{-11} \times 5 \times 10^{21} = = 1,5 \times 10^{11}$ с, или около 5000 лет! И вот мы опять видим, насколько медленен процесс диффузии. Свету нужно 50 веков, чтобы добраться от центра Солнца до его поверхности, тогда как после выхода в пустое межпланетное пространство, двигаясь по прямой линии, он покрывает расстояние от Солнца до Земли всего за восемь минут!

3. СЧИТАЯ ВЕРОЯТНОСТИ

Случай диффузии представляет собой лишь один простой пример применения статистического закона вероятности к проблеме молекулярного движения. Прежде чем мы продолжим обсуждение и попытаемся понять наиважнейший закон энтропии, который регулирует тепловое поведение каждого материального тела, будь то крошечная капелька какой-нибудь жидкости или гигантская вселенная звезд, мы должны сначала больше узнать о том, как вычислить вероятность различных простых и сложных событий.

Несомненно, самая простая проблема вычисления вероятностей — это когда вы бросаете монету. Всем известно, что в этом

случае (если не жульничать) есть равные шансы получить и орла, и решку. Обычно говорят, что *шансы пятьдесят на пятьдесят* и для орла, и для решки, но в математике более принято говорить «шансы половина на половину». Если вы сложите шансы получить орла и шансы получить решку, вы получите $\frac{1}{2} + \frac{1}{2} = 1$. Единица в теории вероятности означает уверенность; и в самом деле, подбрасывая монету, вы совершенно уверены, что получите либо орла, либо решку, если только монета не закатится под диван и не исчезнет там бесследно.



Рис. 83. Четыре возможных комбинации при подбрасывании двух монет.

Предположим теперь, вы бросаете монету два раза подряд или, что то же самое, вы бросаете 2 монеты одновременно. Легко видеть, что у вас есть 4 различных варианта; они показаны на рис. 83.

В первом случае вы получаете дважды орла, в последнем случае — дважды решку, тогда как два промежуточных случая приводят к одному и тому же результату, так как для вас не имеет значения, в каком порядке (или у какой монеты) появляется орел или решка. Следовательно, шансы получить орла оба раза — 1 из 4, или $\frac{1}{4}$, шансы получить решку оба раза — тоже $\frac{1}{4}$, в то время как шансы орла один раз и решки один раз — 2 из 4, или $\frac{1}{2}$. Здесь снова $\frac{1}{4} + \frac{1}{4} + \frac{1}{2} = 1$, что означает, вы уверены, что получите одну из 3 возможных комбинаций. Теперь давайте посмотрим, что будет, если мы подбросим монету 3 раза. Существует всего 8 возможностей, сведенных в следующую таблицу:

352 ГЕОРГИЙ ГАМОВ. ОДИН, ДВА, ТРИ... БЕСКОНЕЧНОСТЬ

Первое подбрасывание	орел	орел	орел	орел	решка	решка	решка	решка
Второе	орел	орел	решка	решка	орел	орел	решка	решка
Третье	орел	решка	орел	решка	орел	решка	орел	решка
	I	II	II	III	II	III	III	IV

Если вы изучите эту таблицу, то обнаружите, что существует 1 шанс из 8 получить орла три раза, и тот же шанс получить три раза решку. Остальные возможности делятся поровну между орлом дважды и решкой один раз и орлом один раз и решкой дважды с вероятностью три восьмых для каждого события.

Наша таблица различных возможностей растет довольно быстро, но давайте сделаем еще один шаг и бросим монету 4 раза. И у нас появляются следующие 16 возможностей:

Первое подбрасывание	о	о	о	о	о	о	о	о	р	р	р	р	р	р	р	р
Второе	о	о	о	о	р	р	р	р	о	о	о	о	р	р	р	р
Третье	о	о	р	р	о	о	р	р	о	о	р	р	о	о	р	р
Четвертое	о	р	о	р	о	р	о	р	о	р	о	р	о	р	о	р
	I	II	II	III	II	III	III	IV	II	III	III	IV	III	IV	IV	V

Здесь мы имеем вероятность $\frac{1}{16}$ получения орла четыре раза и ту же вероятность получения решки четыре раза. Смешанные случаи орла три раза и решки один раз или решки три раза и орла один раз имеют вероятность $\frac{4}{16}$ каждый, или $\frac{1}{4}$, то время как шансы орла и решки одинаковое количество раз — $\frac{6}{16}$, или $\frac{3}{8}$.

Если вы будете продолжать в том же духе, увеличивая число подбрасываний, таблица станет такой длинной, что у вас скоро закончится бумага; так, например, для десяти подбрасываний у вас есть 1024 различных возможности (то есть $2 \times 2 \times 2$). Но нет абсолютно никакой необходимости в столь длинных таблицах, так как незамысловатые законы вероятности и без того наблюдаются в простых примерах, которые мы привели выше, и их уже можно применить к более сложным случаям.

Прежде всего вы видите, что вероятность получить орла дважды равна произведению вероятностей его получения отдельно в первом и отдельно во втором подбрасываниях, а именно $\frac{1}{4} = \frac{1}{2} \times \frac{1}{2}$. Аналогично вероятность получить орла три или четыре раза подряд — это произведение вероятностей его получения при каждом отдельном подбрасывании ($\frac{1}{8} = \frac{1}{2} \times \frac{1}{2} \times \frac{1}{2}$; $\frac{1}{16} = \frac{1}{2} \times \frac{1}{2} \times \frac{1}{2} \times \frac{1}{2}$). Таким образом, если кто-то спросит вас, каковы шансы получить орла каждый раз при десяти подбрасываниях, вы сможете легко дать ответ, умножив $\frac{1}{2}$ на $\frac{1}{2}$ десять раз. Результат будет 0,00098, который указывает на то, что шансы на самом деле очень низкие: примерно один шанс из тысячи! Здесь мы имеем дело с правилом «умножения вероятностей», которое гласит: *если вы хотите получить несколько разных независимых исходов, вы можете определить математическую вероятность их получения, перемножив математические вероятности получения индивидуально каждого из этих нескольких исходов.* Если же исходов много и получить каждый из них не очень-то и вероятно, шансы на то, что вы получите их *все*, обескураживающе низки!

Есть и другое правило — «сложение вероятностей», в котором говорится, что, *если вы хотите получить только один из нескольких независимых исходов (не имеет значения какой), математическая вероятность его получения — это сумма математических вероятностей получения индивидуально каждого исхода из вашего списка.*

Это можно легко проиллюстрировать на примере получения равного количества орлов и решек при подбрасывании монеты дважды. Вам нужна либо последовательность «орел первый раз, решка второй раз», либо последовательность «решка первый раз, орел второй раз». Вероятность каждой из вышеприведенных комбинаций — $\frac{1}{4}$, а вероятность получения одной из них — это $\frac{1}{4}$ плюс $\frac{1}{4}$, или $\frac{1}{2}$. Итак, если вы хотите «это, и это, и это...», вы *умножаете* отдельные математические вероятности различных объектов. Если, однако, вы хотите «это, либо это, либо это», вы *складываете* вероятности.

В первом случае ваши шансы получить все, что вы просите, будут уменьшаться по мере увеличения количества желаемых исходов. Во втором случае, когда вы хотите лишь один из нескольких исходов, ваши шансы получить удовлетворение возрастают по мере того, как список объектов на выбор становится длиннее.

Эксперименты с подбрасыванием монет представляют прекрасный пример того, что имеется в виду, когда говорят, что зако-

ны вероятности становятся более точными, когда у вас есть большое количество попыток. Это иллюстрирует рис. 84, который представляет вероятности получения различного относительного количества орлов и решек при двух, трех, четырех, десяти и ста подбрасываниях. Вы видите, что с увеличением количества подбрасываний кривая вероятности все более и более заостряется и при соотношении орлов и решек пятьдесят на пятьдесят максимум становится наиболее выраженным.

Таким образом, в то время как при 2, или 3, или даже 4 подбрасываниях шансы иметь каждый раз орла или каждый раз решку все еще довольно существенны, при 10 подбрасываниях — даже получение 90 процентов орлов или 90 процентов решек каждый раз весьма маловероятно.

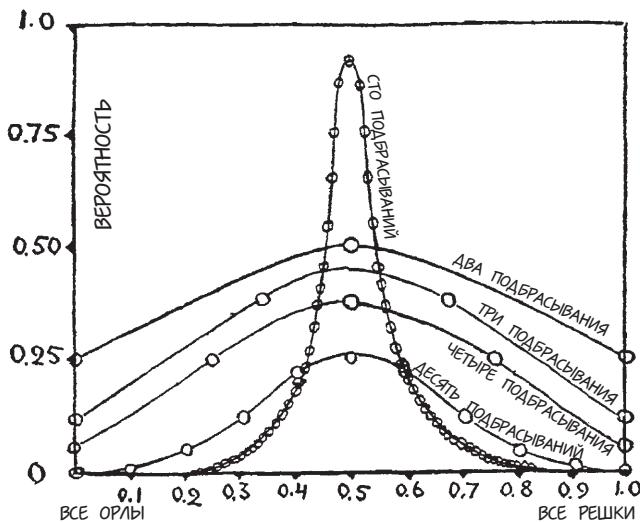


Рис. 84. Относительное количество орлов и решек.

При еще большем количестве подбрасываний, скажем, 100 или 1000, кривая вероятности становится такой же острой, как игла, а шансы получить даже небольшое отклонение от распределения пятьдесят на пятьдесят становятся практически нулевыми.

Давайте теперь воспользуемся простыми правилами вероятностного исчисления, которые мы только что узнали, чтобы вычислить относительные вероятности различных комбинаций пяти

игральных карт, которые встречаются в хорошо известной всем игре покер.

На тот случай, если вы не знаете, в этой игре каждому участнику раздается 5 карт, и тот, кто получает самую сильную комбинацию, забирает банк. Мы опустим здесь дополнительные сложности, возникающие из возможности обменять некоторые из ваших карт на другие в надежде получить более сильные, а также психологическую стратегию блефа, которая используется, чтобы заставить ваших противников поверить, что у вас намного более сильная рука, чем есть на самом деле. Хотя на самом деле блеф — сердце игры, именно он подтолкнул известного датского физика Нильса Бора предложить однажды совершенно новый тип игры, в которой карты не используются вообще, а игроки только блефуют — заявляя о комбинациях, имеющихся у них в воображении; это, будучи чисто психологическим вопросом, находится полностью за пределами области вероятностных исчислений.

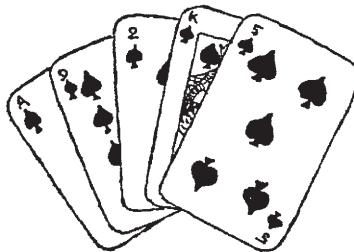


Рис. 85. Флеш (пиковый).

Чтобы немного поупражняться в вероятностных исчислениях, давайте вычислим вероятности некоторых комбинаций в покере. Одна из таких комбинаций называется «флеш» и представляет собой 5 карт одной масти (рис. 85).

Если вы хотите получить флеш, то не важно, какую карту вам сдали первой, нужно только вычислить шансы остальных четырех оказаться одной масти. В колоде всего 52 карты, по 13 карт каждой масти*, поэтому после того как вы получите первую карту, в колоде останется 12 карт той же масти. Следовательно, шансы, что ваша вторая карта будет подходящей масти — $\frac{12}{51}$. Аналогично

* Здесь мы опускаем сложности, связанные с джокером — дополнительной картой, которую можно заменить на любую другую карту по желанию игрока.

шансы, что третья, четвертая и пятая карты будут той же масти, представлены дробями: $\frac{11}{50}$, $\frac{10}{49}$ и $\frac{9}{48}$. Поскольку вы хотите, чтобы *все* 5 карт были одной масти, вы должны применить правило умножения вероятностей. Сделав это, вы обнаружите, что вероятность получить флеш составляет:

$$\frac{12}{51} \times \frac{11}{50} \times \frac{10}{49} \times \frac{9}{48} = \frac{13\,068}{5\,997\,600},$$

или приблизительно 1 из 500.

Но не думайте, пожалуйста, что через 500 раздач вы обязательно получите флеш. Вы можете не получить ни одного, но вы также можете получить и два флеша. Это всего лишь вероятностные исчисления, и может случиться так, что раздач будет гораздо больше, чем 500, а вы так и не получите желаемой комбинации, или, напротив, вам могут сдать флеш с первого же раза. Все, что теория вероятности в состоянии сказать, — что вам, *вероятно*, сдадут 1 флеш через 500 раздач. Следуя тем же методам вычислений, вы также можете узнать, что, сыграв в 30 000 000 игр, вы, вероятно, получите 5 туза (включая джокера) около десяти раз.

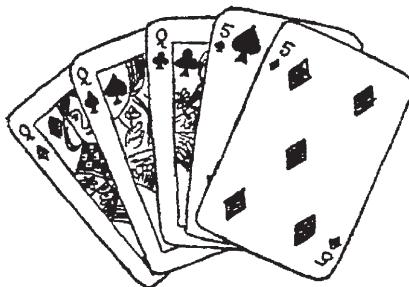


Рис. 86. Фулл-хаус.

Другая комбинация в покере, которая встречается даже еще реже и поэтому еще более ценна, — так называемая «фулл-хаус»¹, более известная под названием «фулл-хаус». Фулл-хаус состоит из «пары» и «тройки одного достоинства» (то есть 2 карты одного достоинства и 2-х мастей и 3-х карт одного достоинства и 3-х мастей — как, например, 2 пятерки и 3 дамы, показанные на рис. 86).

¹ Полная рука (англ.).

Если вы хотите получить фулл-хаус — не важно, какие 2 карты вам сдали первыми, но после их получения одна из 2-х карт из тех 3-х, что осталось получить, должна соответствовать одной вашей карте, а вторая — другой. Поскольку существует 6 карт, которые будут соответствовать имеющимся у вас (если у вас дама и пятерка, есть еще 3 дамы и еще 3 пятерки), вероятность того, что вам подойдет третья карта, — 6 из 50, или $\frac{6}{50}$. Шансы на то, что подойдет четвертая карта, — $\frac{5}{49}$, так как теперь имеется только 5 подходящих карт из 49 оставшихся, а вероятность того, что подойдет пятая карта, — $\frac{4}{48}$. Следовательно, полная вероятность получения фулл-хауса составляет:

$$\frac{6}{50} \times \frac{5}{49} \times \frac{4}{48} = \frac{120}{117\,600},$$

или примерно половину вероятности получения флеша.

Аналогичным образом можно вычислить вероятности других комбинаций, таких как, например, «стрит»¹, а также учесть приносимые в вероятность изменения, вызванные наличием джокера и возможностью обменять первоначально сданные карты.

В результате таких вычислений выясняется, что последовательность старшинства, используемая в покере, соответствует порядку математических вероятностей. Автору неизвестно, был ли такой порядок предложен в старые времена неким математиком, или он установился чисто эмпирически — благодаря миллионам игроков по всему миру, рисковавших своими деньгами в фешенебельных игровых салонах и в маленьких темных притонах. Если верно последнее, мы должны признать, что у нас есть довольно хорошее статистическое исследование относительных вероятностей сложных событий!

Еще одним интересным примером вероятностных исчислений, который приводит к довольно неожиданному ответу, является проблема «Совпадения дней рождения». Постарайтесь вспомнить, приглашали ли вас когда-либо в один и тот же день на две разные вечеринки по случаю дня рождения. Вы, вероятно, скажете, что шансы на такие двойные приглашения очень малы, так как у вас всего лишь около 24 друзей, которые могут вас пригласить, а в году 365 дней, на которые их дни рождения могут выпасть. Следовательно, с таким количеством возможных дат на выбор

¹ Пять карт подряд по старшинству, масти не имеют значения.

шансы на то, что любые 2 из ваших 24 друзей разрежут свои праздничные торты в один и тот же день, должно быть, очень малы.

Сколь бы невероятно это ни звучало, однако ваше суждение совершенно неверно. Правда в том, что существует довольно высокая вероятность, что в компании из 24 человек есть пара или даже несколько пар, чьи дни рождения совпадают. На самом деле больше шансов как раз на то, что такое совпадение есть, чем на то, что его нет.

Вы можете проверить этот факт, составив список дней рождения, включающий около 24 человек, или, что проще, сравнив даты рождения 24 человек, чьи имена появляются последовательно на любых страницах какого-нибудь справочника типа «Кто есть кто в Америке», открытого случайно, на любой странице. Или же вероятности можно определить с помощью простых правил вероятностного исчисления, с которыми мы познакомились в примерах с подбрасыванием монеты и с игрой в покер.

Предположим, что сначала мы пытаемся вычислить шансы на то, что в компании из двадцати четырех человек у каждого — отличная от других дата рождения. Давайте спросим первого человека в группе, когда он родился; конечно же, день может быть любым из 365 в году. Далее, какова вероятность того, что дата рождения второго человека, к которому мы подходим с тем же вопросом, отличается от даты рождения первого? Поскольку этот (второй) человек мог родиться в любой день года, имеется один шанс из 365, что его дата рождения совпадает с датой рождения первого, и 364 шанса из 365 (то есть вероятность $\frac{364}{365}$), что не совпадает. Аналогично вероятность того, что третий человек имеет дату рождения, отличную от дат рождения либо первого, либо второго, — $\frac{363}{365}$, так как два дня года были исключены. Вероятность того, что у следующих людей, которым мы задаем тот же вопрос, даты рождения отличаются от дат рождения тех, у которых мы спросили раньше, составит тогда: $\frac{362}{365} / \frac{361}{365} / \frac{360}{365} / \dots$ — и так далее вплоть до последнего человека, для которого вероятность равна $\frac{(365-23)}{365}$, или $\frac{342}{365}$.

Поскольку мы пытаемся узнать, какова вероятность того, что одно из совпадений существует, мы должны перемножить все вышеприведенные дроби, тем самым получая вероятность того, что все люди имеют разные даты рождения:

$$\frac{364}{365} \times \frac{363}{365} \times \frac{362}{365} \times \dots \times \frac{342}{365}$$

Используя определенные методы высшей математики, к произведению можно прийти всего за несколько минут, но, если вы их не знаете, остается пойти трудным путем прямого умножения*, который, впрочем, займет не так уж много времени. Результат — 0,46, который означает, что вероятность того, что дни рождения не совпадут, — чуть меньше половины. Иными словами, существует лишь 46 шансов из 100, что среди ваших двух десятков друзей нет двух, чьи дни рождения приходятся на один и тот же день, и 54 шанса из 100, что у двоих или более друзей дни рождения совпадают. Следовательно, если у вас есть 25 или более друзей и вас никогда не приглашали в один и тот же день на две вечеринки по случаю дня рождения, вы можете заключить с высокой степенью вероятности, что либо большинство ваших друзей не празднуют свои дни рождения, либо не приглашают к себе вас!

Проблема совпадения дней рождения представляет собой прекрасный пример того, что суждения с точки зрения здравого смысла относительно вероятности сложных событий могут быть совершенно неверными. Автор задал этот вопрос очень многим людям, включая и выдающихся ученых, и во всех случаях, кроме одного**, предлагались ставки, начиная с 2 к 1 и заканчивая 15 к 1, что такого совпадения не произойдет. Прими автор все эти ставки — сейчас был бы богатым человеком!

Не лишним будет повторить, что, если мы вычисляем вероятности различных событий в соответствии с данными правилами и выбираем наиболее вероятное из них, это совсем не означает, что именно оно и должно произойти. Если только количество случаев, которые мы рассматриваем, не исчисляется тысячами, миллионами или, что лучше, миллиардами, прогнозируемые результаты являются лишь «вероятными», а вовсе не «обязательными». Эта ограниченность законов вероятности, когда количество случаев сравнительно невелико, уменьшает полезность статистического анализа, например, при расшифровке разнообразных кодов и криптограмм, которые ограничиваются относительно короткими текстами. Давайте рассмотрим, например, известный случай, описанный Эдгаром Алланом По в его знаменитой новелле «Золотой жук». Он рассказывает нам о неком мистере Легране, который, прогуливаясь по пустынному пляжу в Южной Каролине, подобрал

* Если умеете, используйте логарифмическую таблицу или логарифмическую линейку!

** Этим исключением, конечно же, был венгерский «математик» (см. начало первой главы этой книги).

кусок пергамента, который был погребен наполовину под мокрым песком. Под воздействием тепла, исходившего от огня, весело горевшего в хижине мистера Леграна, на пергаменте простирали некие таинственные знаки, написанные чернилами, которые были невидимы при естественной температуре, но при нагревании покраснели, явив символы, которые оказалось довольно легко разобрать. На пергаменте было изображение черепа, наводившее на мысль, что документ написал пират; голова козла, не оставлявшая сомнений, что пират был не кем иным, как знаменитым капитаном Киддом; и несколько строк типографских знаков, указывавших, по-видимому, на местонахождение спрятанного сокровища (см. рис. 87).

Мы оставляем на совести Эдгара Аллана По тот факт, что пираты семнадцатого века были знакомы с такими типографскими знаками, как точка с запятой и кавычки и тем более такими, как: ‡, + и ¶.

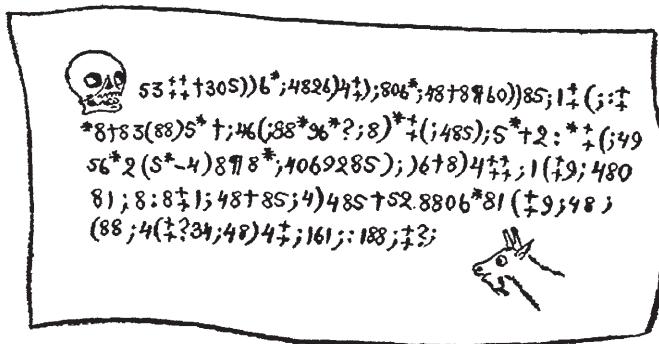


Рис. 87. Послание капитана Кидда.

Сильно нуждаясь в деньгах, мистер Легран использовал все свои умственные способности, чтобы расшифровать таинственную криптоограмму, и в итоге сделал это, взяв за основу относительную частоту появления различных букв в английском языке. Его метод основывался на том, что, если подсчитать количество разных букв в любом тексте на английском языке, будь то сонет Шекспира или детективный роман Эдгара Уоллеса, вы обнаружите, что буква «е» появляется явно гораздо чаще других. После «е» последовательность наиболее часто встречающихся букв следующая:

a, o, i, d, h, n, r, s, t, u, y, c, f, g, l, m, w, b, k, p, q, x, z.

Подсчитав различные символы, использованные в крипто-грамме капитана Кидда, мистер Легран нашел, что символ, который встречался в послании чаще всего, — цифра 8. «Ага, — сказал он, — значит, 8, скорее всего, означает букву “е”».

Что ж, в этом случае он оказался прав, но, конечно, это было лишь *весьма вероятно*, а ни в коем случае не обязательно.

Собственно, если бы секретное послание было: «You will find a lot of gold and coins in an iron box in woods two thousand yards south from an old hut on Bird Island’s north tip»¹ — оно не содержало бы ни одной «е»! Но законы случая были благосклонны к мистеру Леграну, и его предположение оказалось верным.

Добившись успеха на первом этапе, мистер Легран самоуверенно продолжал в том же духе — выбирая буквы в порядке вероятности их появления. В таблице² ниже мы приводим символы, фигурировавшие в послании капитана Кидда, в порядке относительной частоты их использования.

8	33	e ← → e
;	26	a ↑ t
4	19	o ↗ h
†	16	i ↙ o
(16	d ↘ r
*	13	h ↖ n
5	12	n ↙ a
6	11	r ↙ i
†	8	s ↙ d
1	8	t ↓
0	6	u ↑ y
g	5	y ↓ c
2	5	c ↓
i	4	g ← → g
3	4	l ↓ u
?	3	m ↓
¶	2	w ↓
-	1	b ↓
.	1	

¹ «Вы найдете много золота и монет в железной коробке в лесу в двух тысячах ярдах к югу от старой хижины на северной оконечности острова Птиц» (англ.).

² Первая строчка слева наверху: 33 появления символа «8» (Of the character 8 there are 33).

Первый столбец справа содержит буквы алфавита, расположенные в порядке относительной частоты их употребления в английском языке.

Следовательно, логично предположить, что знаки слева, приведенные в широком столбце, обозначают буквы, указанные напротив них в первом узком столбце справа. Но, используя эту систему, мы находим, что начало послания капитана Кидда гласит: *nguisgunndrhaoe...c*...

Бессмыслица!

Что же произошло? Был ли старый пират настолько хитер, чтобы намеренно использовать слова, которые не содержали букв, следующих тем же правилам частоты появления, каким следуют буквы в словах, обычно используемых в английском языке? Вовсе нет; просто для хорошей статистической выборки текст послания недостаточно длинен и наиболее вероятное распределение букв не происходит. Спрячь капитан Кидд свое сокровище таким сложным образом, что инструкция, как его найти, заняла бы пару страниц, а лучше целый фолиант, мистер Легран имел бы намного большие шансы разгадать загадку, применяя правила частоты появления букв.

Если вы бросите монету 100 раз, вы можете быть уверены, что она упадет орлом вверх примерно 50 раз, но, бросив всего 4 раза, можете получить три раза орла и один раз решку или наоборот. Если сформулировать на основе этого правило, то оно будет таким: чем больше попыток, тем точнее действуют законы вероятности.

Поскольку из-за недостаточного количества букв в криптограмме простой метод статистического анализа потерпел неудачу, мистер Легран вынужден был перейти к анализу частей, из которых состоят различные слова в английском языке. Прежде всего он укрепил свою гипотезу, что наиболее частый знак «8» означал «е», заметив, что в этом сравнительно коротком послании комбинация «88» встречалась очень часто (5 раз), потому что, как все знают, буква «е» нередко удваивается в английских словах (как например: *meet, fleet, speed, seen, been, agree* и так далее¹). Кроме того, если «8» действительно означала «е», можно было ожидать, что она неоднократно появится в качестве части

¹ *Meet* — встретиться, *fleet* — флот, *speed* — скорость, *seen* — видел, *been* — был, *agree* — согласиться.

слова «the». Изучив текст криптограммы, мы обнаруживаем, что комбинация «;48» встречается семь раз в нескольких коротких строчках. Но если это так, мы должны сделать вывод, что «;» обозначает «t», а «4» — «h».

За деталями, касающимися дальнейших шагов по расшифровке послания капитана Кидда, мы отсылаем читателя к первоисточнику — новелле По, полный же текст послания, найденный в итоге, таков: «Хорошее стекло в обители епископа на сиденье дьявола. Сорок один градус и тринадцать минут на северо-восток к северу. Главная ветвь, седьмая ветка, восточная сторона. Стреляй из левого глаза головы смерти. От дерева через пулью пятьдесят футов по прямой».

Правильные значения различных символов, которые мистер Легран в итоге расшифровал, показаны во втором столбце таблицы на странице 361, и вы видите, что они не соответствуют тому распределению, которое разумно ожидать, основываясь на законах вероятности. Это, безусловно, потому, что текст слишком короткий и не предоставляет поэтому богатых возможностей для действия законов вероятности. Но даже в этой маленькой «статистической выборке» можно заметить тенденцию букв выстроиться в порядке, требуемом теорией вероятности, тенденцию, которая стала бы практически нерушимым правилом, если бы количество букв в послании было много большим.

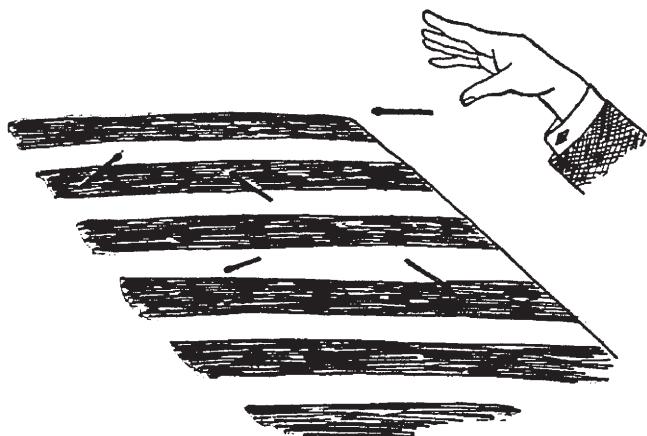


Рис. 88.

Похоже, существует только один пример (исключая тот факт, что страховые компании никогда не прогорают), в котором прогнозы теории вероятности были действительно проверены очень большим количеством попыток. Это известная проблема с американским флагом и коробкой кухонных спичек.

Для решения конкретно этой проблемы вероятности вам понадобится американский флаг, вернее, та его часть, которая имеет красные и белые полосы; если флага не найти, возьмите большой лист бумаги и нарисуйте на нем ряд параллельных и равноудаленных друг от друга линий. Затем вам потребуется коробка спичек, подойдет любой их вид, при условии, что они короче ширины полос. Далее вам понадобится греческая «пи», нет, это не что-то неприличное, а всего лишь буква греческого алфавита эквивалентная нашей «р»¹. Она выглядит так: π . Помимо того, что это буква греческого алфавита, она используется для обозначения отношения длины окружности к ее диаметру. Вы, возможно, знаете, что численно оно равно $3,1415926535\dots$ (далее известно еще много цифр, но все они нам не нужны).

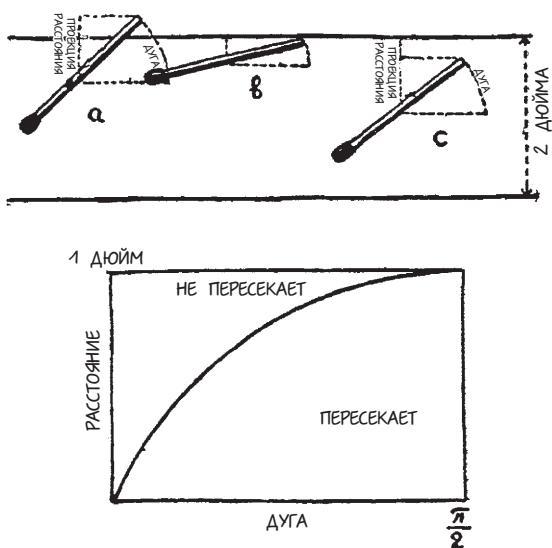


Рис. 89.

¹ Английская буква «р» произносится как «пи».

Теперь разложите флаг на столе, подбросьте спичку и наблюдайте, как она упадет на флаг (рис. 88). Упав, она может оказаться в пределах одной полосы или очутиться на границе, разделяющей две полосы. Каковы шансы для первого и второго варианта?

Следуя процедуре, которую мы применяли выше, определяя другие вероятности, мы должны сначала сосчитать количество случаев, которые соответствуют той или иной возможности.

Но как можно подсчитать все возможности, когда ясно, что количество вариаций падения спички на флаг бесконечно?

Давайте рассмотрим этот вопрос более внимательно. Как видно из рис. 89, положение упавшей спички относительно полосы, на которую она упала, можно определить расстоянием от середины спички до ближайшей границы между полосами и углом, который образует спичка и направление полосы. Мы даем три типичных примера, как может упасть спичка, предположив ради простоты, что длина спички равна ширине полосы, и каждая — два дюйма. Если центр спички довольно близко от границы и угол довольно большой (как в случае *a*), спичка будет пересекать линию. Если, напротив, угол мал (как в случае *b*) или расстояние велико (как в случае *c*), спичка останется в пределах одной полосы. Точнее говоря, спичка пересечет границу, если проекция полスピчки на вертикальное направление больше половины ширины полосы (как в случае *a*), и пересечения не произойдет, если верно обратное (как в случае *b*). Это утверждение представлено графически на схеме в нижней части рисунка. По горизонтальной оси (абсцисса) мы откладываем угол упавшей спички, заданный длиной соответствующей дуги с радиусом 1. По вертикальной оси (ордината) мы откладываем длину проекции длины полスピчки на вертикальное направление; в тригонометрии эта длина известна как *синус*, он соответствует данной дуге. Ясно, что синус равен нулю, когда дуга равна нулю, так как в этом случае спичка занимает горизонтальное положение. Когда дуга равна $\pi/2$, что соответствует прямому углу*, синус равен единице, так как спичка занимает вертикальное положение и таким образом совпадает со своей проекцией. Синус промежуточных значений дуги определяется хорошо знакомой нам волнистой математической кривой, известной как синусоида. (На рис. 89 изображена лишь одна четверть полной волны в интервале 0 и $\pi/2$.)

* Длина окружности с радиусом 1 равна 2π . Следовательно, длина одного квадранта круга равна $2\pi/4$, или $\pi/2$.

Такой график, если его построить, удобно использовать для оценки шансов, пересечет или не пересечет падающая спичка черту. Собственно, как мы видели выше (посмотрите еще раз на три примера в верхней части рис. 89), спичка пересечет линию границы между полосами, если расстояние от центра спички до линии границы меньше соответствующей проекции, то есть меньше синуса дуги. Это означает, что, отложив на нашем графике данное расстояние и данную дугу, мы получим точку *под* синусоидой. И наоборот, спичка, которая после падения окажется целиком в пределах полосы, даст точку *над* синусоидой.

Таким образом, согласно правилам исчисления вероятностей, шансы на пересечение находятся в том же соотношении с шансами на непересечение, в каком находится площадь под кривой линией к площади над ней; или же вероятности обоих событий можно рассчитать путем деления двух площадей на всю площадь прямоугольника. Математически можно доказать (см. главу II), что площадь синусоиды, представленной на нашем графике, точно равна 1. Поскольку общая площадь прямоугольника равна $\frac{\pi}{2} \times 1 = \frac{\pi}{2}$, мы находим, что вероятность того, что спичка упадет на границу (для спичек, чья длина равна ширине полосы): $\frac{1}{\pi/2} = \frac{2}{\pi}$.

Интересную особенность π появляться там, где его менее всего ожидают, впервые наблюдал ученый восемнадцатого века, граф Бюффон, и теперь проблема со спичками и флагом носит его имя.

Реальный эксперимент со спичками провел итальянский математик Лаззерини, человек большого усердия: он сделал 3408 бросков спичек и наблюдал, как 2169 из них пересекли границу. В скрупулезной записи этого эксперимента, который был проведен формулой Бюффона, π заменяет значение $\frac{2 \times 3408}{2169}$ или 3,1415929, которое отличается от точного математического значения лишь седьмым знаком после запятой!

Это представляет, пожалуй, самое занятное доказательство действенности законов вероятности, но не более занятное, чем число «2», которое вы вычислите, если подбросите монету несколько тысяч раз и разделите общее количество подбрасываний на количество выпадений орла. Без сомнения, в этом случае вы получите 2,0000... и ошибка будет столь же маленькой, как и у Лаззерини в определении π .

4. «ТАИНСТВЕННАЯ» ЭНТРОПИЯ

Из приведенных выше примеров вероятностного исчисления, каждый из которых взят из обычной жизни, мы узнали, что прогнозы такого рода, будучи нередко разочаровывающими, когда речь идет о маленьких числах, становятся все точнее и точнее, когда мы переходим к действительно большим числам. Это делает данные законы подходящими, в частности, для описания почти бесчисленных количеств атомов или молекул, образующих даже самый маленький клочок материи, с которым мы только можем иметь дело. Таким образом, статистический закон прогулки пьяницы, если его применить к полудюжине пьяниц, которые делают, возможно, два десятка поворотов каждый, способен дать нам лишь приблизительные результаты, но если его применить к миллиардам молекул красителя, подвергающимся миллиардам столкновений каждую секунду, приводит к строжайшему физическому закону диффузии. Мы также можем сказать, что краситель, который первоначально был растворен только в половине воды в пробирке, имеет тенденцию, посредством процесса диффузии, равномерно распространяться по всей жидкости, потому что такое равномерное распределение *более вероятно*, чем первоначальное.

По той же самой причине комната, в которой вы сидите, читая эту книгу, равномерно заполнена воздухом от стены до стены и от пола до потолка, и вам даже в голову не приходит, что весь воздух в комнате может неожиданно собраться в дальнем углу, оставив вас задыхаться в кресле. Однако *физически это ужасающее событие совсем не невозможно, оно лишь в высшей степени маловероятно*.

Чтобы прояснить ситуацию, давайте рассмотрим комнату, разделенную на две равные половины воображаемой вертикальной плоскостью, и спросим себя, каково будет наиболее вероятное распределение молекул воздуха между двумя частями. Проблема, конечно же, идентична проблеме подбрасывания монеты, обсуждавшейся в предыдущем параграфе. Если мы возьмем какую-нибудь одну молекулу, то она имеет равные шансы оказаться и в правой, и в левой половине комнаты, точно так же, как подброшенная монета может упасть на стол либо вверх орлом, либо вверх решкой.

Вторая, третья и все остальные молекулы также имеют равные шансы оказаться либо в правой, либо в левой части комнаты не-

зависимо от того, где находятся другие*. Поэтому проблема распределения молекул между двумя половинами комнаты эквивалентна проблеме разделения на орлов и решек при большом количестве подбрасываний, и, как видно из рис. 84, в этом случае распределение пятьдесят на пятьдесят является, безусловно, наиболее вероятным. Мы также видим из этой цифры, что с увеличением количества подбрасываний (количества молекул воздуха в нашем случае) вероятность 50 процентов становится все выше и выше, превращаясь практически в уверенность, когда это количество становится очень большим. Поскольку в комнате среднего размера находится около 10^{27} молекул**, вероятность того, что все они соберутся одновременно, скажем, в правой части комнаты —

$$\left(\frac{1}{2}\right)^{10^{27}} \cong 10^{-3 \cdot 10^{26}},$$

то есть 1 из $10^{3 \cdot 10^{26}}$. С другой стороны, поскольку молекулы воздуха движутся со скоростью около 0,5 км в секунду, затрачивая всего 0,01 с на перемещение из одного конца комнаты в другой, они будут перетасовываться в комнате 100 раз каждую секунду. Следовательно, время ожидания искомой комбинации — $10^{2999999999999999999999998}$ с; сравните его с общим возрастом Вселенной — всего 10^{17} с! Поэтому вы можете спокойно продолжать читать книгу, не боясь случайно задохнуться.

В качестве другого примера давайте возьмем стакан воды, стоящий на столе. Мы знаем, что молекулы воды, участвуя в хаотическом тепловом движении, перемещаются с высокой скоростью во всех возможных направлениях, однако окончательно разлететься в разные стороны им не дают существующие между ними силы сцепления.

Поскольку направление движения каждой отдельной молекулы регулируется исключительно законом случайности, мы можем рассмотреть вероятность того, что в определенный момент

* На самом деле из-за больших расстояний между отдельными молекулами газа пространство отнюдь не переполнено ими, и наличие большого количества молекул в заданном объеме совершенно не мешает поступлению новых молекул.

** Комната 10 футов на 15 футов с потолком 9 футов имеет объем 1350 куб. футов, или $5 \cdot 10^7$ куб. см и, следовательно, содержит $5 \cdot 10^4$ г воздуха. Поскольку средняя масса молекулы воздуха равна $30 \times 1,66 \times 10^{-24} \cong 5 \times 10^{-23}$ г, общее количество молекул составляет $5 \cdot 10^4 / 5 \cdot 10^{-23} = 10^{27}$. (Здесь означает «при мерно равно».)

скорости половины молекул, а именно в верхней части стакана, будут все направлены вверх, тогда как другая половина, в нижней части стакана, будет двигаться вниз*. В таком случае силы сцепления, действующие вдоль горизонтальной плоскости, разделяющей две группы молекул, не смогут противостоять их «обоюдному желанию расстаться», и мы станем свидетелями необычайного физического явления — как половина воды в стакане спонтанно выстрелит в потолок со скоростью пули!

Другая возможность состоит в том, что общая энергия теплового движения молекул воды случайно сосредоточится в тех молекулах, которые находятся в верхней части стакана. В этом случае вода возле дна внезапно замерзнет, тогда как верхние ее слои начнут сильно кипеть. Почему вы никогда не видели, чтобы такое происходило? Не потому что это абсолютно невозможно, а только потому, что крайне маловероятно. Собственно, если вы попытаетесь вычислить вероятность того, что молекулярные скорости, первоначально распределенные произвольно во всех направлениях, по чистой случайности окажутся распределенными так, как описано выше, вы придетете к цифре, которая примерно столь же мала, как и вероятность того, что все молекулы воздуха соберутся в одном углу. Аналогичным образом шанс, что из-за взаимных столкновений некоторые молекулы потеряют большую часть своей кинетической энергии, в то время как другая часть получит значительный переизбыток ее, также ничтожно мал. И в этом случае наибольшей вероятностью снова обладает то распределение скоростей, которое соответствует обычно наблюдаемому.

Если начать со случая, который не соответствует наиболее вероятному порядку расположения молекул или наиболее вероятным их скоростям, изъяв часть газа из одного угла комнаты либо влив немного горячей воды в холодную, то последует ряд физических изменений, благодаря которым наша система перейдет от данного менее вероятного состояния к наиболее вероятному. Газ будет до тех пор распространяться по комнате, пока равномерно не заполнит ее всю, а тепло вверху стакана будет струиться по направлению к дну, пока вся вода не станет одной температуры. Итак, мы можем сказать, что *все физические процессы, зависящие*

* Мы должны рассмотреть распределение половины на половину, так как возможность того, чтобы все молекулы двигались в одном направлении, исключается механическим законом сохранения импульса.

от хаотического движения молекул, идут в направлении увеличения вероятности, а состояние равновесия — когда больше ничего не происходит — соответствует максимуму вероятности. Поскольку, как мы видели на примере воздуха в комнате, вероятности различных молекулярных распределений часто выражаются неудобно малыми числами (как шансы $10^{-3 \cdot 10^{26}}$ для воздуха скопиться в одной половине комнаты), то вместо них принято ссылаться на их логарифмы. Этот параметр известен под названием «энтропия», он играет значимую роль во всех вопросах, связанных с хаотическим тепловым движением материи. Вышеизложенное утверждение, касающееся изменений вероятности в физических процессах, можно переписать теперь в таком виде: *любые самопроизвольные изменения в физической системе происходят в направлении возрастания энтропии, а конечное состояние равновесия соответствует максимально возможному значению энтропии.*

Это и есть знаменитый закон энтропии, также известный как второй закон термодинамики (первым является закон сохранения энергии), и, как вы видите, в нем нет ничего пугающего.

Закон энтропии можно также назвать *законом возрастания беспорядка*, так как, насколько мы видели из всех приведенных выше примеров, энтропия достигает своего максимума, когда распределение молекул и их скорости полностью случайны, так что любая попытка навести некоторый порядок в их движении приведет к уменьшению энтропии. Другую, более соответствующую практике формулировку закона энтропии можно дать, обратившись к проблеме превращения тепла в механическое движение.

Памятуя, что тепло на самом деле является хаотическим движением молекул, легко понять, что полное превращение тепловой энергии материального тела в большое количество механической энергии движения эквивалентно задаче принуждения всех молекул этого тела двигаться сонаправленно. Однако на примере стакана воды, который мог бы спонтанно выстрелить в потолок половину своего содержимого, мы видели, что такое явление настолько маловероятно, что считается практически невозможным. Следовательно, *хотя энергия механического движения может полностью перейти в тепло (например, посредством трения), тепловая энергия никогда не может полностью перейти в механическое движение.* И это исключает возможность так называемого «вечного

двигателя второго рода»*, который извлекал бы тепло из материальных тел при естественной температуре, тем самым охлаждая их и используя полученную таким образом энергию для выполнения механической работы. Например, невозможно построить теплоХод, в котле которого пар генерируется не сжиганием угля, а извлечением тепла из воды океана, которая сначала закачивается в машинное отделение, а после извлечения из нее тепла выбрасывается за борт в виде кубиков льда.

Но как же тогда обычные паровые машины, не нарушая закон энтропии, превращают тепло в движение? Этот фокус стал возможен благодаря тому, что в паровом двигателе *только часть тепла, выделяющаяся при сжигании топлива, действительно превращается в энергию*, другая же, большая часть, выбрасывается в воздух в виде отработанного пара или поглощается специально установленными пароохладителями. В этом случае мы имеем два противоположных изменения энтропии в нашей системе: (1) уменьшение энтропии, соответствующее превращению части тепла в механическую энергию поршней, и (2) увеличение энтропии в результате перетока другой части тепла из водонагревательных котлов в охладители. Закон энтропии лишь требует, чтобы возрастило *общее количество* энтропии системы, а это можно легко устроить, делая второй фактор больше, чем первый. Ситуацию можно понять несколько лучше, рассмотрев пример, когда предмет весом в 5 фунтов лежит на полке в 6 футах от пола. Согласно закону сохранения энергии, совершенно невозможно, чтобы этот предмет самопроизвольно и без посторонней помощи поднялся к потолку. С другой стороны, можно сбросить одну часть веса этого предмета на пол и использовать высвобожденную таким образом энергию, чтобы поднять другую его часть вверх.

Аналогичным образом мы можем уменьшить энтропию в одной части нашей системы, если в другой ее части энтропия возрастет и таким образом произойдет компенсация. Иными словами, *учитывая хаотическое движение молекул, мы можем навести порядок в одной области, если не возражаем против того, что это сделает движение в других частях еще более хаотическим*. И во многих практических случаях, как, например, все виды тепловых двигателей, мы не возражаем.

* Назван так, чтобы отличать его от «вечного двигателя первого рода», который нарушает закон сохранения энергии, работая без источника энергии.

5. СТАТИСТИЧЕСКАЯ ФЛУКТУАЦИЯ

Предмет обсуждения предыдущего параграфа должен был прояснить для вас следующее: закон энтропии и все его следствия полностью основываются на том факте, что в физике очень больших количеств мы всегда имеем дело с бесконечно большим количеством индивидуальных молекул, поэтому любой прогноз, опирающийся на анализ вероятностей, превращается почти в абсолютную уверенность. Однако этот же вид прогноза становится значительно менее точным, когда мы рассматриваем очень малые количества материи.

Так, например, если вместо рассмотрения воздуха, заполняющего большую комнату, как в примере, приведенном выше, мы возьмем гораздо меньший объем газа, скажем, куб, размеры которого в любом направлении составляют одну сотую микрона*, ситуация будет выглядеть совершенно иначе. Итак, поскольку объем нашего куба составляет 10^{-18} куб. см, он будет содержать лишь $\frac{10^{-18} \cdot 10^{-3}}{3 \cdot 10^{-23}} = 30$ молекул, и шансы на то, что все они соберутся в одной из половин исходного объема, составляют $\left(\frac{1}{2}\right)^{30} = 10^{-10}$.

С другой стороны, из-за гораздо меньшего размера куба молекулы будут перетасовываться со скоростью $5 \cdot 10^9$ раз в секунду (при скорости 0,5 км в секунду и продвижении на расстояние лишь в 10^{-6} см), поэтому примерно раз в секунду мы станем обнаруживать, что одна половина куба пуста. Само собой разумеется, что случаи, когда только определенная часть молекул сосредоточивается в одном конце нашего маленького куба, происходят значительно чаще. Так, например, распределение, в котором 20 молекул находятся в одном конце и 10 молекул в другом (то есть в одном конце лишь на 10 молекул больше) будет случаться с частотой $\binom{1}{2}^{10} \times 5 \cdot 10^{10} = 10^{-3} \times 5 \times 10^{10} = 5 \times 10^7$, то есть 50 000 000 раз в секунду.

Таким образом, при малых количествах распределение молекул в воздухе далеко не равномерно. Если бы мы могли использовать достаточное увеличение, то увидели бы небольшие скопления молекул, мгновенно образующиеся в различных точках газа, для того чтобы тут же распасться и образовать аналогичные скопления в других точках. Этот эффект известен как *флуктуация плотности*,

* Микрон, обычно обозначается греческой буквой *Mi* (μ), равен 0,0001 см.

он играет важную роль во многих физических явлениях. Так, например, когда солнечные лучи проходят через атмосферу, эта неоднородность распределения вызывает рассеяние синих лучей спектра, придавая небу его привычный нам цвет, а Солнцу — красноватый оттенок. Эффект красноты особенно ярко проявляется во время заката, когда солнечные лучи проходят через более толстые слои воздуха. Если бы не было флюктуаций плотности, небо всегда выглядело бы совершенно черным, и звезды были бы видны днем.

Подобные, хотя и менее выраженные, флюктуации плотности и давления также имеют место в обычных жидкостях, и другой способ описать причины броуновского движения — это сказать, что крошечные частицы, взвешенные в воде, толкают друг друга то туда, то сюда из-за быстро меняющегося давления, действующего на их противоположные стороны. Когда жидкость нагревается по мере приближения к точке кипения, флюктуации плотности становятся более выраженными и вызывают легкое светорассеяние.

Теперь мы можем спросить себя, применяется ли закон энтропии к столь малым объектам как таковым, для которых статистические флюктуации имеют первостепенную важность. Бактерия, которую на протяжении всей ее жизни швыряют удары молекул, пожалуй, посмеется над утверждением, что тепло не может перейти в механическое движение! Но в этом случае правильнее было бы сказать, что закон энтропии теряет свой смысл, нежели говорить, что он нарушается. Собственно, закон утверждает следующее: движение молекул нельзя полностью превратить в движение больших объектов, включающих в себя огромное количество отдельных молекул. Для бактерии, которая лишь *ненамного* больше самих молекул, разница между тепловым и механическим движением практически исчезла бы, а молекулярные столкновения, бросающие ее из стороны в сторону, рассматривались бы бактерией так же, как мы рассматриваем толчки, которые получаем от наших сограждан в возбужденной толпе. Будь мы бактериями, мы имели бы возможность создать вечный двигатель второго рода, просто привязав себя к маховому колесу, но тогда у нас отсутствовал бы мозг и мы не смогли бы его использовать в наших интересах. Таким образом — нет никаких оснований сожалеть, что мы не бактерии!

Живые организмы, как кажется, противоречат закону возрастающей энтропии. Собственно, растение поглощает простые

молекулы углекислого газа (из воздуха) и воды (из почвы) и соединяет их в сложные органические молекулы, которые его составляют. Превращение простых молекул в сложные подразумевает уменьшение энтропии; на самом же деле естественный процесс, при котором энтропия действительно возрастает, — это сжигание древесины и разложение ее молекул на углекислый газ и водяной пар. Действительно ли растения противоречат закону возрастания энтропии и получают помощь в росте от некой таинственной *vis vitalis* (жизненной силы), существование которой так отстаивали древние философы?

Анализ этого вопроса показывает, что никакого противоречия не существует, так как наряду с углекислым газом, водой и некоторыми солями, растениям для их роста необходимо обилие солнечного света. Помимо энергии, которая хранится в веществе растений и может освободиться при горении, лучи Солнца несут с собой так называемую «отрицательную энтропию» (энтропию низкого уровня), которая исчезает, когда свет поглощается зелеными листьями. Таким образом, фотосинтез, происходящий в листьях растений, включает в себя два взаимосвязанных процесса: а) превращение энергии света солнечных лучей в химическую энергию сложных органических молекул; б) использование низкоуровневой энтропии лучей Солнца для снижения энтропии, сопутствующей строительству сложных молекул из простых. В терминах «порядок против беспорядка» можно сказать, что, когда зеленые листья поглощают солнечное излучение, они крадут его внутренний порядок, с которым оно прибывает на Землю, и этот порядок сообщается молекулам, позволяя им соединяться в более сложные, более упорядоченные конфигурации. В то время как растения, строя свои тела из неорганических соединений, получают отрицательную энтропию (порядок) от солнечных лучей, животные, чтобы обеспечить себя отрицательной энтропией, должны есть растения (или друг друга), являясь, так сказать, вторичными ее потребителями.

Глава IX

Загадка жизни

1. МЫ СДЕЛАНЫ ИЗ КЛЕТОК

В нашем обсуждении строения материи мы преднамеренно опускали до поры какие-либо ссылки на сравнительно небольшую, но чрезвычайно важную группу материальных тел, которые своеобразно отличаются от всех других объектов во Вселенной, будучи *живыми*. Что составляет существенное различие между живой и неживой материи? И насколько оправданы наши надежды на то, что феномен жизни можно понять, основываясь на тех фундаментальных физических законах, которые успешно объясняют свойства неживой материи?

Когда мы говорим о феномене жизни, мы обычно имеем в виду некий довольно большой и сложный живой организм — такой, как дерево, лошадь или человек. Но пытаться изучить фундаментальные свойства живой материи, рассматривая такие сложные органические системы как целое, было бы столь же бесполезно, как и пытаться изучить строение неорганического вещества, рассматривая как целое какой-нибудь хитроумный механизм вроде автомобиля.

Трудности, возникающие в этой ситуации, становятся очевидными, когда мы понимаем, что работоспособный автомобиль состоит из тысяч частей различной формы, сделанных из разнообразных материалов, в разных физических состояниях. Одни из них (например, стальная ходовая часть, медные провода и лобовое стекло) — твердые, другие (такие, как вода в радиаторе, бензин в баке и масло в цилиндре) — жидкые, а третьи (такие, как смесь, подаваемая из карбюратора в цилиндры) — газообразные. В таком случае первый шаг в анализе комплекса материи, известного как автомобиль, состоит в том, чтобы разбить его на отдельные, фи-

зически гомогенные составные части. Таким образом мы находим, что он состоит из различных металлических веществ (например, сталь, медь, хром и тому подобное); различных стекловидных веществ (например, стеклянные и пластиковые материалы, используемые в конструкции); различных гомогенных жидкостей (например, вода и бензин) и так далее, и тому подобное.

Продолжая анализировать дальше и используя доступные нам методы физического исследования, мы находим, что медные части состоят из отдельных маленьких кристаллов, образованных упорядоченными слоями индивидуальных атомов меди, жестко закрепленных и плотно уложенных один на другой; что вода в радиаторе образована большим количеством сравнительно свободно упакованных молекул воды, созданных 1 атомом кислорода и 2 атомами водорода каждая; и что карбюраторная смесь, текущая через клапаны в цилиндры, состоит из роя свободно движущихся молекул атмосферного кислорода и молекул азота, смешанных с молекулами паров бензина, которые, в свою очередь, состоят из атомов углерода и водорода.

Аналогично при анализе сложного живого организма, к примеру человеческого тела, мы должны сначала разбить его на отдельные органы, такие как мозг, сердце и желудок, а затем на различные *биологически гомогенные материалы*, известные под общим названием «ткани».

В некотором смысле различные типы тканей представляют собой материал, из которого строятся сложные живые организмы, так же как механические устройства создаются из различных физически гомогенных веществ. И науки анатомия и физиология, анализирующие функционирование живых организмов с точки зрения свойств различных тканей, из которых они строятся, аналогичны в этом смысле инженерной науке, основывающей функционирование различных машин на известных механических, магнитных, электрических и других свойствах физических веществ, которые используются в их конструкциях.

Таким образом, ответ на загадку жизни нельзя найти, просто изучив, как ткани соединяются в сложные организмы, ответ на нее в том, как эти ткани строятся из индивидуальных атомов, которые в конечном итоге и составляют любой живой организм.

Было бы большой ошибкой полагать, что биологически гомогенную ткань можно сравнить с обычным физически гомогенным веществом.

Собственно, предварительный микроскопический анализ произвольно выбранной ткани (кожи, мышц или мозга) указывает на то, что она состоит из очень большого числа отдельных единиц, природа которых более или менее определяет свойства всей ткани (рис. 90). Эти элементарные структурные единицы живой материи известны как «клетки»; их также можно назвать «биологическими атомами» (то есть «неделимыми»), в том смысле, что биологические свойства данного типа ткани будут сохраняться до тех пор, пока она содержит хотя бы одну полноценную клетку.

Например, мышечная ткань, от которой оставили лишь половину одной клетки, потеряла бы способность к мышечному сокращению и прочие свойства, точно так же как кусок магниевой проволоки, содержащий только половину атома магния, больше не будет металлом магнием, а скорее — маленьким кусочком угля!*



Рис. 90. Различные типы клеток.

Клетки, образующие ткани, довольно малы по размеру (в среднем одна сотая миллиметра в поперечнике**). Любое хорошо знакомое нам растение или животное состоит из чрезвычайно большого количества отдельных клеток. Например, тело зрелого человека создают несколько сотен тысяч миллиардов отдельных клеток!

* Из обсуждения строения атома следует вспомнить, что атом магния (атомный номер 12, атомная масса 24) состоит из ядра, образованного 12 протонами и 12 нейтронами, окруженными оболочкой из 12 электронов. Разрезав атом магния пополам, мы бы получили 2 новых атома, каждый из которых содержал бы 6 ядерных протонов, 6 ядерных нейтронов и 6 внешних электронов, иными словами, 2 атома углерода.

** Иногда отдельные клетки достигают гигантских размеров, как, например, хорошо знакомый нам желток яйца, который, как известно, является всего лишь одной клеткой. В этих случаях, однако, жизненно важные части клетки, ответственные за ее существование, остаются микроскопических размеров, большая масса желтого материала — просто накопленная пища, служащая для развития эмбриона цыпленка.

Организмы меньшего размера созданы, конечно же, из меньшего числа клеток; комнатная муха, например, или муравей состоят из нескольких сотен миллионов клеток, не более. Существует также большой класс *одноклеточных* организмов, таких как амебы, грибки (как, например, те, которые вызывают заражение «стригущим лишаем») и различные виды *бактерий*, которые образованы лишь одной клеткой и которые можно увидеть только через хороший микроскоп. Изучение этих клеток-индивидуалистов, чей покой не нарушается выполнением «социальных функций», которые они должны были бы выполнять в сложном организме, представляет собой одну из самых увлекательных глав биологии.

Чтобы понять проблему жизни вообще, мы должны искать ответ в строении и свойствах живых клеток.

Какие же свойства живых клеток отличают их от неорганических веществ или, если уж на то пошло, от мертвых клеток, образующих дерево вашего письменного стола или кожу ваших туфель?

Основные отличительные свойства живой клетки заключаются в ее способностях: (1) ассимилировать материалы, необходимые для ее строения из окружающей среды; (2) превращать эти материалы в вещества, которые она использует для роста своего тела; и (3), когда ее геометрические размеры становятся слишком большими, делиться на две одинаковые клетки каждая размером в половину от ее величины (и способные расти). Способности «есть», «расти» и «размножаться» являются, конечно же, общими для всех, в том числе более сложных организмов, состоящих из отдельных клеток.

Критически мыслящий читатель может возразить, что эти три свойства также можно найти и у обычных неорганических веществ. Если, например, мы бросим маленький кристалл соли в пересыщенный раствор соли в воде*, кристалл будет *растти*, последовательно добавляя к своей поверхности слой за слоем соль, извлеченную (или, скорее, «выброшенную») из воды. Мы можем

* Пересыщенный раствор можно приготовить путем растворения большого количества соли в горячей воде и затем охлаждения ее до комнатной температуры. Поскольку растворимость в воде уменьшается с понижением температуры, в воде окажется больше молекул соли, чем она может удержать в растворе.

Однако избыток молекул соли будет оставаться в растворе в течение очень долгого времени, если только мы не поместим туда маленький кристалл, который, так сказать, дает начальный импульс и служит своего рода организатором исхода молекул соли из раствора.

даже представить, что из-за некоторых механических воздействий, как, например, увеличивающийся вес растущих кристаллов, они, после достижения определенной величины, распадутся на две половины, и что образовавшиеся таким образом кристаллы-дети будут продолжать процесс роста. Почему бы нам и этот процесс не классифицировать как «феномен жизни»?

Отвечая на этот и другие подобные вопросы, необходимо прежде всего указать, что, рассматривая жизнь просто как более сложный случай обычных физических и химических явлений, не следует ожидать увидеть четкую грань между жизнью и нежизнью. Аналогично, используя статистические законы для описания поведения газа, образованного чрезвычайно большим количеством индивидуальных молекул (см. главу VIII), мы не можем определить пределы точности такого описания.

Собственно, мы знаем, что атмосферный воздух, заполняющий комнату, не соберется внезапно в одном углу комнаты, или, по крайней мере, что шансы на то, что такое необычное событие случится, ничтожно малы. С другой стороны, мы также знаем, что если бы было только две, три или четыре молекулы во всей комнате, они бы оказывались в одном углу довольно часто.

Где четкая грань между количеством, к которому применяется одно утверждение, и тем, к которому применимо другое? Тысяча молекул?

Миллион? Милиард?

Аналогично, двигаясь по нисходящей к элементарным жизненным процессам, не следует ожидать, что мы обнаружим четкую грань между таким простым молекулярным феноменом, как кристаллизация соли в водном растворе, и гораздо более сложным, хотя и принципиально не отличающимся, феноменом роста и деления живой клетки.

В отношении, в частности, этого примера можно сказать, однако, что рост кристалла в растворе не следует рассматривать как феномен жизни, потому что «пища», используемая кристаллом для своего роста, ассимилируется его телом без изменений той формы, в которой она пребывала в растворе.

Молекулы соли, ранее перемешанные с молекулами воды, просто собираются на поверхности растущего кристалла. Здесь имеет место обычное *механическое наращивание* вещества вместо типичной *биохимической ассимиляции*. Также размножение кристаллов, случайно распавшихся под собственным весом на неоди-

наковые части без заданных пропорций, — действие чисто механической силы и имеет мало сходства с точным и последовательным биологическим делением живых клеток пополам, которое вызывается, главным образом, внутренними силами.

У нас был бы гораздо более близкий аналог биологического процесса, если бы, например, единственная молекула спирта (C_2H_5OH) в водном растворе углекислого газа начала бы самостоятельный процесс синтеза, который бы соединил одну за другой молекулы воды H_2O с молекулами растворенного газа CO_2 и образовал новые молекулы алкоголя*. Если бы действительно одна капля виски, помещенная в стакан с обычной газированной водой, начала бы превращать эту газированную воду в чистый виски, нам бы пришлось признать алкоголь живой материей!

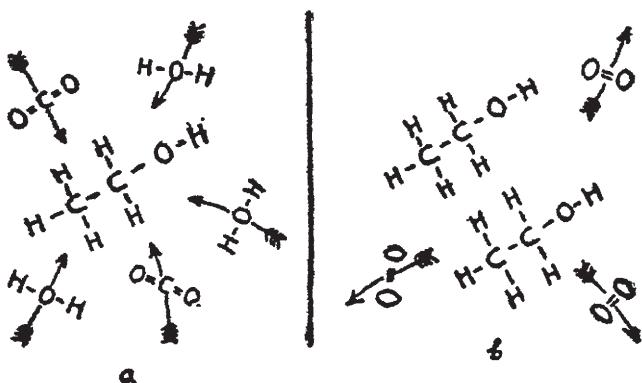


Рис. 91. Схематическое изображение того, как молекула алкоголя могла бы организовать молекулы воды и углекислого газа, чтобы создать еще одну молекулу алкоголя. Если бы такой процесс «автосинтеза» алкоголя был бы возможен, нам пришлось бы рассматривать алкоголь как живую материю.

Этот пример не так фантастичен, как кажется, поскольку, как мы увидим позже, на самом деле существуют сложные химические вещества, известные как *вирусы*, чьи довольно сложные

* Например, в соответствии с гипотетической реакцией



в которой присутствие одной молекулы спирта приводит к образованию еще одной молекулы спирта.

молекулы (образованные сотнями тысяч атомов каждая) фактически выполняют задачу организации других молекул, находящихся в окружающей среде, для создания структурных единиц похожих на себя. Эти вирусные частицы должны рассматриваться и как обычные химические молекулы, и как живые организмы, являясь, таким образом, «недостающим звеном» между живой и неживой материи.

Но сейчас мы должны вернуться к проблеме роста и размножения обычных клеток, которые, хоть и очень сложны, все же гораздо менее сложны, чем молекулы, и должны рассматриваться, скорее, как простейшие живые организмы.

Если мы посмотрим на типичную клетку через хороший микроскоп, мы увидим, что она состоит из полупрозрачного студенистого вещества, которое имеет очень сложное химическое строение. Общее название этого вещества — *протоплазма*. Она окружена стенками — тонкими и гибкими в клетках животных, но толстыми и плотными в клетках растений, что придает их телам высокую степень жесткости (см. рис. 90). Каждая клетка содержит небольшое сферическое тело, *ядро*, которое образовано мелкой сетью вещества известного как *хроматин* (рис. 92). Здесь следует отметить, что различные части протоплазмы, образующие тело клетки, при обычных обстоятельствах имеют одинаковую оптическую прозрачность, поэтому, просто глядя на живую клетку через микроскоп, нельзя увидеть ее строение. Мы должны окрасить клетку, воспользовавшись тем, что различные структурные части протоплазмы поглощают краситель в разной степени, и тогда мы увидим ее строение. Вещество, образующее сеть ядра, особенно хорошо поддается процессу окрашивания и становится ясно видным на более светлом фоне*. Отсюда и название «хроматин», что на греческом означает «вещество, которое окрашивается».

Когда клетка готовится к жизненно важному процессу деления, структура ядерной сети делается гораздо более дифференцированной, чем была ранее, и становится видно, что она состоит из набора отдельных частиц (рис. 92 b , c), обычно волокнообраз-

* Вы можете использовать аналогичный метод, написав что-нибудь восковой свечой на листе бумаги. Написанное будет невидимым, пока вы не заштрихуете бумагу черным карандашом. Поскольку графит не будет прилипать к местам, покрытым воском, надпись станет четко выделяться на заштрихованном фоне.

ных или палочковидных, которые называются «хромосомы» (то есть «тела, которые окрашиваются»). Иллюстрация V_{A,B} «Вклейки»*.

Все клетки в организме данного биологического вида (кроме так называемых репродуктивных клеток) содержат одинаковое количество хромосом, которое в целом больше у высокоразвитых организмов, чем у менее развитых.

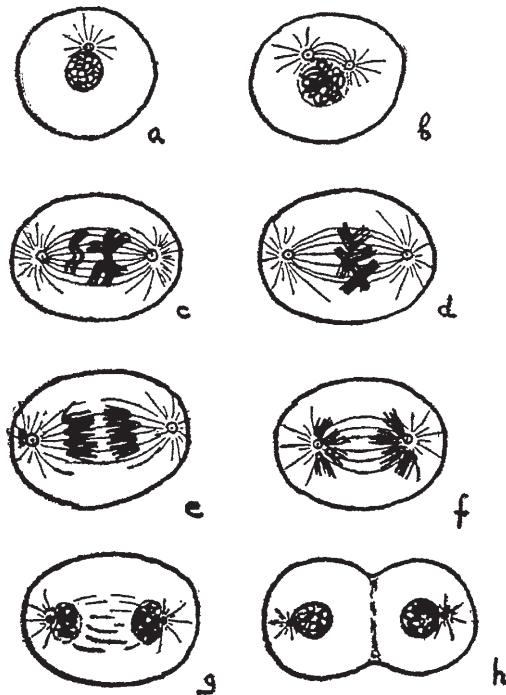


Рис. 92. Последовательные стадии деления клетки (митоз).

Маленькая плодовая муха, которая носит величественное латинское название *Drosophila melanogaster* и которая помогла биологам понять многие явления, касающиеся основных загадок

* Следует помнить, что, окрашивая живую клетку, мы обычно убиваем ее и таким образом останавливаем ее дальнейшее развитие. Поэтому последовательные изображения клеточных делений, как на рис. 92, получены из наблюдений отнюдь не за единственной клеткой, а методом окрашивания (и убийства) разных клеток на разных этапах их развития. В принципе, однако, это ничего не меняет.

жизни, имеет в каждой своей клетке *восемь хромосом*. Клетки растения гороха имеют *четырнадцать хромосом*, а кукурузы — *двадцать*. Сами биологи, как и все остальные люди, гордо носят в каждой своей клетке *сорок восемь хромосом*¹; это можно было бы счесть чисто арифметическим доказательством того, что человек в шесть раз лучше мухи, если бы подобные рассуждения не вели к выводу, что лангуст, клетки которого содержат *двести хромосом*, в четыре с лишним раза лучше человека!

Что касается количества хромосом в клетках различных биологических видов, то оно *всегда четное*; собственно, в каждой живой клетке (за исключением тех, которые мы обсудим позже в этой главе) есть *два почти идентичных набора хромосом* (см. иллюстрацию V_A «Вклейки»): *один набор от матери, а другой от отца*. *Эти два набора, поступающие от обоих родителей, несут с собой сложные наследственные свойства, которые передаются из поколения в поколение всем живым существам*.

Хромосомы инициируют начало деления клетки, и каждая из них аккуратно расщепляется по всей длине на два идентичных, но несколько более тонких волокна, в то время как сама клетка продолжает оставаться единым целым (рис. 92d).

Когда, готовясь к делению, изначально перепутанный пучок ядерных хромосом начинает распутываться, две точки, известные как *центросомы*, которые расположены близко друг от друга и рядом с внешней границей ядра, начинают постепенно удаляться друг от друга к противоположным концам клетки (рис. 92a, b, c). У расходящихся в стороны центросом обнаруживаются тонкие нити, соединяющие их с хромосомами внутри ядра. После того как хромосома разделится на две части, каждая ее половина прикрепляется к одной из противоположных центросом, нити энергично сокращаются, и центросомы постепенно отделяются друг от друга (рис. 92e, f). Когда этот процесс завершается (рис. 92g), стенки клетки начинают закругляться (рис. 92h) в направлении центральной линии, разделяющей клетки-половинки, в каждой из которых тем временем растет своя тонкая стенка; в итоге обе отрываются друг от друга — и пожалуйста, две новоиспеченные отдельные клетки.

¹ Во времена написания книги не было достоверно известно о количестве хромосом и считалось, что в нашем геноме их 24 пары. На самом деле в человеческих клетках 23 пары (а значит, 46 хромосом).

Если обе дочерние клетки получат достаточное количество пищи снаружи, они вырастут до размера своей матери (коэффициент 2) и после определенного периода отдыха подвергнутся дальнейшему делению, следя той же схеме, благодаря которой они обрели собственное существование.

Данное описание отдельных этапов деления клетки — результат прямого наблюдения и практически предел, до которого наука смогла продвинуться в своих попытках объяснить это явление, но того, что дали наблюдения, очень мало для правильного понимания природы физико-химических сил, ответственных за этот процесс. Клетка как целое по-прежнему кажется слишком сложной для прямого физического анализа, и, перед тем как штурмовать эту проблему, нужно понять природу хромосом; эта проблема сравнительно более простая, мы обсудим ее в следующем параграфе.

Но сначала будет полезно рассмотреть, как деление клеток отвечает за репродуктивные процессы в сложных организмах, образованных большим количеством клеток. Здесь возникает соблазн спросить: что было первым — курица или яйцо? Но правда заключается в том, что при описании такого циклического процесса, как этот, не имеет значения, начнем ли мы с «яйца», которое разовьется в курицу (или другое животное), или с курицы, которая собирается отложить яйцо.

Предположим, мы начнем с «курицы», которая только что вылупилась из яйца. С того момента как она вылупилась (или родилась), клетки в ее теле переживают процесс последовательного деления, тем самым осуществляя быстрый рост и развитие организма. Памятуя, что тело зрелого животного содержит много тысяч миллиардов клеток, каждая из которых образовалась в результате последовательных делений одной оплодотворенной яйце-клетки, естественно на первый взгляд полагать, что для достижения этого результата, должно пройти очень большое количество последовательных процессов деления. И здесь полезно вспомнить, сколько зерен пшеницы неосторожно пообещал Сиссе Бену благодарный царь, согласившись на предложение того рассчитать их количество на основе 64 простых шагов геометрической прогрессии, или сколько лет понадобилось бы для переноса 64 дисков из проблемы «Конца Света», которая обсуждалась в главе I, чтобы увидеть, что сравнительно небольшое число последовательных клеточных делений приведет на самом деле к очень большому количеству клеток. Если мы обозначим количество последова-

тельных делений клеток, необходимое организму, чтобы вырасти до полноценного человеческого существа, как и будем помнить, что при каждом делении количество клеток в растущем теле удваивается (так как каждая клетка становится двумя), мы придем к общему количеству делений, которые происходят в человеческом теле, начиная с единичной яйцеклетки и заканчивая полностью сформированным человеком, с помощью уравнения: $2^x = 10^{14}$ — и найдем, что $x = 47$.

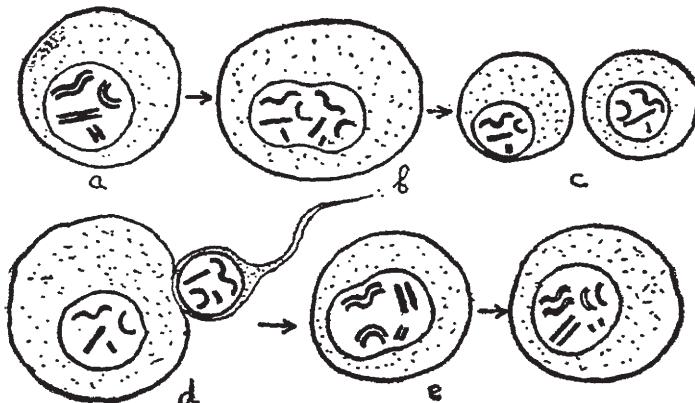


Рис. 93. Образование гамет (a, b, c) и оплодотворение яйцеклетки (d, e, f). В первом процессе (мейоз) парные хромосомы резервной репродуктивной клетки разделяются на две «клетки-половинки» без предварительного расщепления. Во втором процессе (сингамия) мужской сперматозоид проникает в женскую яйцеклетку, и их хромосомы объединяются в пары. В результате оплодотворенная клетка начинает готовиться к обычному делению, которое уже было показано на рис. 92.

Таким образом, мы видим, что каждая клетка в наших зрелых телах является членом примерно пятидесятиго поколения исходной яйцеклетки, которая ответственна за то, что мы существуем*.

Хотя у молодого животного клетки делятся довольно быстро, большинство клеток зрелого человека обычно находятся в «со-

* Интересно сравнить этот расчет и его результат с аналогичным расчетом, касающимся взрыва атомной бомбы (см. главу VII). Количество последовательных процессов атомного деления, необходимое для того, чтобы вызвать деление («оплодотворение») каждого атома урана в одном килограмме вещества (всего $2 \cdot 5 \cdot 10^{24}$ атомов) рассчитывается по аналогичному уравнению: $2^x = 2 \cdot 5 \cdot 10^{24}$ — и дает $x = 61$.

стоянии покоя» и делятся лишь от случая к случаю — чтобы обеспечить телу «содержание в исправности» и компенсацию износа.

Теперь мы подошли к особому и очень важному типу деления клеток, которое приводит к образованию так называемых «гамет», или «брачующихся клеток», отвечающих за феномен репродукции.

На самой ранней стадии существования любого двуполого живого организма некоторое количество его клеток выделяется «в резерв» — для будущей репродуктивной деятельности. Эти клетки, расположенные в специальных репродуктивных органах, во время роста организма претерпевают гораздо меньше обычных делений, чем любые другие клетки, и когда их призывают произвести новое потомство, они бодры и полны сил. Так же деление репродуктивных клеток происходит другим, гораздо более простым способом, чем описанный выше, свойственный обычным клеткам тела. Хромосомы, образующие их ядра, не расщепляются на две, как в обычных клетках, а просто разрываются (рис. 93 a , b , c), так, что каждая *дочерняя клетка получает лишь половину исходного набора хромосом*.

Процесс, ведущий к образованию этих «хромосомодефицитных» клеток, известен как «мейоз», обычный же процесс деления называется «митоз». Клетки, полученные в результате такого деления, известны как «сперматозоиды» и «яйцеклетки», или как *мужские и женские гаметы*.

Внимательный читатель может недоумевать, как деление исходной репродуктивной клетки на две равные части может породить гаметы либо с мужскими, либо с женскими свойствами, и объяснение этому лежит в упомянутом ранее исключении из утверждения, что хромосомы существуют только в идентичных парах. Существует одна особая хромосомная пара, два компонента которой идентичны в женском теле, но разнятся в мужском. Эти особые хромосомы известны как половые хромосомы и отличаются символами X и Y . Клетки в теле женщины всегда имеют две X -хромосомы, тогда как у клеток мужчины одна X - и одна Y -хромосома*. Замена Y -хромосомой одной из представительниц X -ов составляет основную разницу между полами (рис. 94).

* Это утверждение верно как для людей, так и для всех млекопитающих вообще. У птиц, однако, ситуация противоположная: петух имеет две одинаковые половые хромосомы, в то время как у курицы они разные.

Поскольку все репродуктивные клетки, зарезервированные в женском организме, имеют полный набор X -хромосом, когда одна распадается на две в процессе мейоза, каждая клетка-половинка, или гамета, получает одну X -хромосому. Но поскольку мужские репродуктивные клетки имеют по одной X - и одной Y -хромосоме каждая, то в результате деления получаются две гаметы, одна из которых содержит X -, а другая Y -хромосому.

Когда в процессе оплодотворения мужская гамета (сперматозоид) соединяется с женской гаметой (яйцеклеткой), шансы пятьдесят на пятьдесят на то, что соединение приведет к клетке с двумя X -хромосомами или с одной X - и одной Y -хромосомой; в первом случае ребенок будет девочкой, во втором — мальчиком.

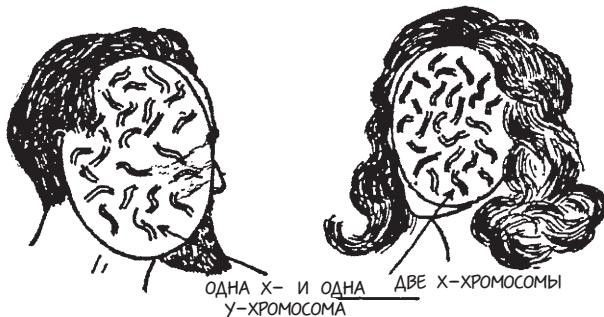


Рис. 94. Разница между мужчиной и женщиной налицо. В то время как все клетки женского тела содержат 48¹ парных хромосом, полностью идентичных в каждой паре, клетки мужского тела содержат одну асимметричную пару. Вместо двух X -хромосом, как у женщины, у мужчины есть одна X - и одна Y -хромосома.

Мы вернемся к этой важной проблеме в следующем параграфе, сейчас же продолжим описание репродуктивного процесса.

Когда мужской сперматозоид соединяется с женской яйцеклеткой — процесс, известный как «сингамия», — образуется полноценная клетка, которая начинает делиться на две части в процессе «митоза», он изображен на рис. 92. После короткого периода отдыха две новые клетки, появившиеся таким образом, снова делятся на две части, затем каждая из четырех новых клеток повторяет весь процесс — и так далее. Каждая дочерняя клетка получает точную копию всех хромосом от исходной оплодотво-

¹ 46 хромосом.

ренной яйцеклетки, половина из которых поступает от матери, а половина — от отца. На рис. 95 схематично представлено постепенное развитие организма от оплодотворенной яйцеклетки до полноценного человека. На рисунке (а) мы видим, как сперматозоид проникает в тело покоящейся яйцеклетки.

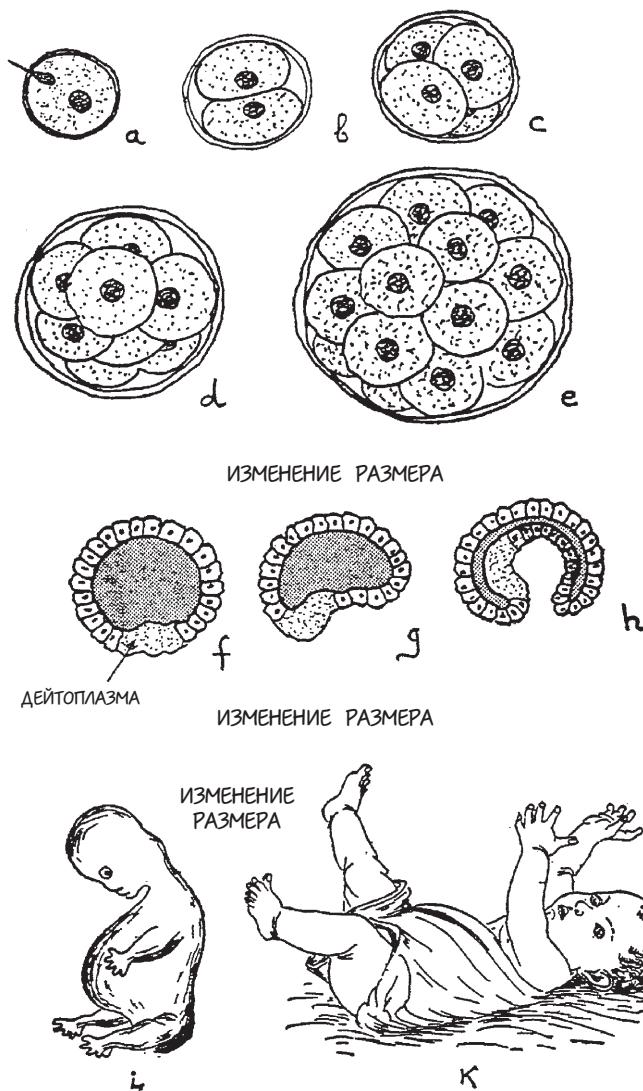


Рис. 95. От яйцеклетки до человека.

Соединение двух гамет стимулирует начало новой деятельности в оплодотворенной клетке, и она разбивается сначала на 2, затем на 4, затем на 8, затем на 16 и так далее, и так далее (рис. 95*b, c, d, e*) Когда количество отдельных клеток становится достаточно большим, они стремятся так организовываться, чтобы быть всем на поверхности, где они находятся в наилучшем положении для получения еды из окружающей питательной среды. Эта стадия развития, в которой организм выглядит как маленький пузырь с полостью внутри, известна как «blastula» (*f*). Позже стенка полости начинает вдавливаться внутрь (*g*), и организм входит в стадию известную как «гастрula» (*h*), во время которой он выглядит как маленький мешочек с отверстием, служащим как для приема свежих продуктов, так и для выведения отходов переваривания. Простые животные, такие как, например, кораллы, никогда не развиваются дальше этой стадии. Однако у более развитых видов процесс роста и дальнейшего видоизменения продолжается. Одни клетки развиваются в костный скелет, другие — в пищеварительную, дыхательную и нервную системы, и, пройдя через различные эмбриональные стадии (*i*), организм наконец становится юным животным, которое опознается как представитель своего вида (*k*).

Как уже упоминалось выше, некоторые из развивающихся клеток растущего организма, даже на ранних стадиях развития, откладывают про запас, так сказать, резервируются для будущей репродуктивной функции. Когда организм достигает зрелости, эти клетки подвергаются мейозу и производят гаметы, которые начинают весь процесс с самого начала. И так продолжается жизнь.

2. НАСЛЕДСТВЕННОСТЬ И ГЕНЫ

Самая замечательная особенность процесса размножения заключается в том, что новый организм, зачатый союзом пары гамет от двух родителей вырастает не просто каким-то там живым существом, а развивается в довольно верную, хотя и не всегда точную копию своих родителей и родителей своих родителей.

Собственно, мы можем быть уверены, что щенок, который родился от пары ирландских сеттеров, не только сформируется как собака, а не как слон или кролик, но также и в том, что он не вырастет столь же большим, как слон, или не останется столь же маленьким, как кролик, и что у него будет четыре ноги, один

длинный хвост, два уха и два глаза — по одному на каждой стороне головы. Мы также обоснованно уверены, что его уши будут мягкими и висячими, а шерсть — длинной и по цвету золотисто-коричневой, и что ему, скорее всего, понравится охота. Кроме того, щенок будет обладать рядом незначительных черт, которые можно проследить до его отца, до его матери, а возможно, и до одного из его более ранних предков, и у него также будет несколько своих собственных индивидуальных особенностей.

Как все эти признаки, что создают прекрасного ирландского сеттера, перенеслись внутри микроскопических частиц материи, образовавших две гаметы, союз которых дал начало развитию нашего щенка?

Как мы видели выше, каждый новый организм получает ровно одну половину своих хромосом от отца, а другую — от матери. Ясно, что основные признаки данного вида должны содержаться как в отцовских, так и в материнских хромосомах, в то время как различные второстепенные свойства, которые могут варьироваться от человека к человеку, пришли, возможно, только от одного из родителей. И хотя почти не осталось сомнений, что, по прошествии долгого времени и после весьма значительного числа поколений, даже основные свойства различных животных и растений в своем большинстве могут подвергаться изменениям (органическая эволюция тому доказательство), людям известны лишь сравнительно малые изменения второстепенных признаков, которые можно заметить в течение ограниченного периода наблюдения.

Изучение таких признаков и их перехода от родителей к детям — главный предмет новой науки *генетики*, которая, будучи еще практически в младенческом состоянии, способна тем не менее рассказать нам волнующие истории о самых сокровенных секретах жизни. Мы узнали, например, что, в отличие от большинства биологических явлений, законы наследственности обладают почти математической простотой, указывающей на то, что здесь мы имеем дело с одним из фундаментальных феноменов жизни.

Возьмем, например, такой известный дефект человеческого зрения, как *дальтонизм*, наиболее распространенная форма которого выражается в неспособности различать красный и зеленый цвета. Чтобы объяснить дальтонизм, мы должны сначала понять, почему мы вообще видим цвета, а для этого нам нужно изучить сложное строение и свойства сетчатки, касающиеся

фотохимических реакций, вызванных светом с различной длиной волны, — и так далее, и тому подобное.

Но если мы спросим себя о *наследовании дальтонизма* — вопрос, который на первый взгляд кажется еще более сложным, чем собственно объяснение этого явления, — ответ окажется неожиданно простым и легким. Из наблюдений известно: (1) что мужчины чаще страдают дальтонизмом, чем женщины, (2) что дети дальтоника и «нормальной» женщины никогда не бывают дальтониками, но (3) что среди детей женщины-дальтоника и «нормального» мужчины сыновья становятся дальтониками, а дочери — нет. Зная эти факты, которые ясно указывают на то, что наследование дальтонизма как-то связано с полом, нам остается лишь предположить, что признаки дальтонизма появляются в результате дефекта в одной из хромосом и переносятся с этой хромосомой из поколения в поколение, и, объединив знания и логическое допущение, предположить далее, что *дальтонизм является результатом дефекта в половой хромосоме, которую мы ранее обозначили X*.

Это предположение делает эмпирические правила, касающиеся дальтонизма, кристально ясными. Мы помним, что женские клетки обладают двумя *X*-хромосомами, а мужские — лишь одной (*другая является Y-хромосомой*). Если одиночная *X*-хромосома у мужчины неполноценна, в частности, в этом отношении, он — дальтоник. У женщины же должны пострадать обе *X*-хромосомы, так как, чтобы обеспечить нормальное восприятие цвета, достаточно только одной хромосомы. Если шансы, что *X*-хромосома имеет этот цветовой дефект, скажем, один из тысячи, то будет один дальтоник на тысячу человек. *Априори* шансы, что у женщины обе хромосомы имеют цветовой дефект, рассчитываются согласно теореме умножения вероятностей (см. главу VIII) с помощью произведения: $\frac{1}{1000} \times \frac{1}{1000} = \frac{1}{1000\,000}$, поэтому можно ожидать, что лишь 1 женщина из 1 000 000 окажется дальтоником.

Давайте теперь рассмотрим случай дальтоника мужа и «нормальной» жены (рис. 96а). Их сыновья не получат никаких *X*-хромосом от отца и получат одну «хорошую» *X*-хромосому от матери, и, следовательно, у них не будет причин для дальтонизма.

У их дочерей, с другой стороны, будет «хорошая» хромосома от матери и «плохая» от отца.

Они не будут дальтониками, хотя их дети (сыновья) могут ими стать.

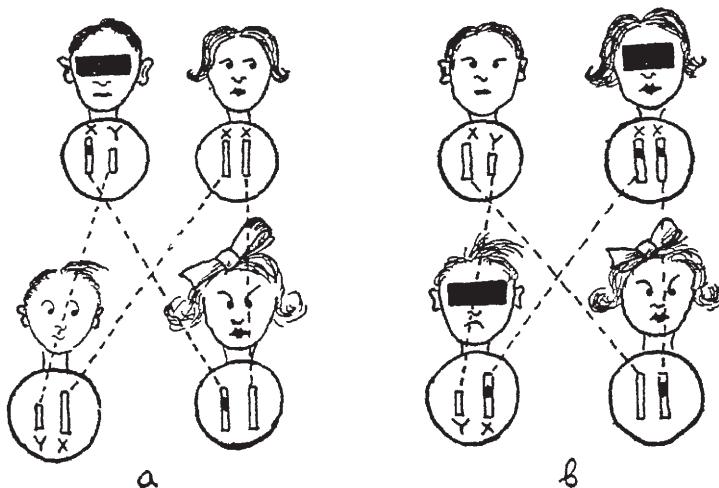


Рис. 96. Наследование дальтонизма.

В противоположном случае — жены-дальтоника и «нормального» мужа — (рис. 96б) сыновья определенно будут дальтониками, так как их единственная X -хромосома происходит от матери. Дочери же, у которых будет одна «хорошая» X -хромосома от отца и одна «плохая» от матери, не станут дальтониками, а их сыновья, как и в предыдущем случае, могут стать. Проще не бывает!

Такие наследственные свойства, как дальтонизм, которые, для достижения заметного эффекта, требуют, чтобы были поражены *обе хромосомы* из пары, известны как «рецессивные». Они могут передаваться от бабушек и дедушек к внукам в скрытой форме и несут ответственность за такие прискорбные факты, как случай рождения щенка у двух прекрасных немецких овчарок похожего на кого угодно только не на немецкую овчарку.

Противоположное верно и для так называемых доминантных признаков, которые становятся заметными, когда поражена лишь одна хромосома из пары. Чтобы уйти от фактического материала генетики, мы проиллюстрируем этот случай на примере выдуманного мышолика (прошу прощения, кролика), который родился с ушами, напоминающими уши Микки Мауса. Если мы предположим, что «ушки Микки» являются *доминантным* признаком наследственности — то есть когда достаточно изменения одной хромосомы, чтобы заставить уши расти в этом постыдном (для

кролика) виде, — мы, глядя на рис. 97 и исходя из предположения, что кролики, рожденные от родоначальника, далее будут спариваться с нормальными кроликами, можем предсказать виды ушей, которые будут у следующих поколений кроличьего потомства. Отклонение от нормы в хромосоме, ответственной за уши Микки, отражено на нашей схеме темным пятнышком.

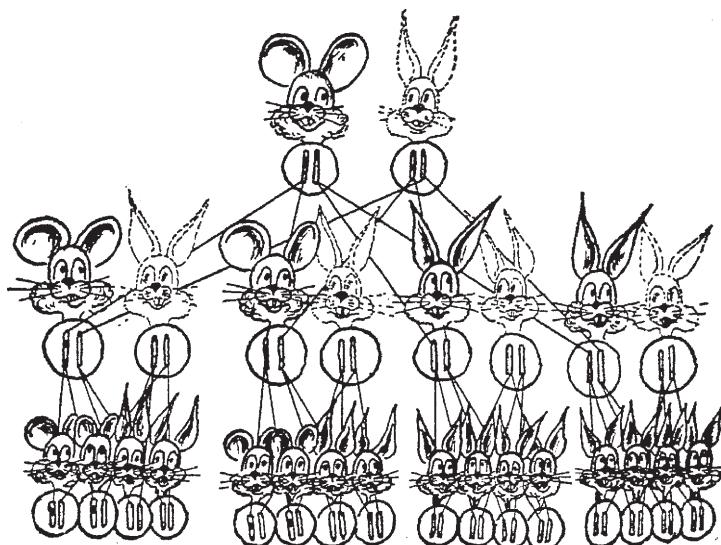


Рис. 97.

Кроме влиятельных доминантного и рецессивного признаков, существуют и признаки, которые можно назвать «индифферентными». Предположим, у нас в саду есть красная и белая ночные красавицы.

Когда пыльца (сперматозоиды у растений) из растений с красными цветками переносится ветром или насекомыми на пестики другого такого же растения, она объединяется с семяпочками (яйцеклетки у растений), расположенными в основании пестика, и развиваются семена, которые снова дадут красные цветки. Следовательно, если пыльца растений с белыми цветками оплодотворяет другие такие же растения, все цветки следующего поколения будут белыми. Если, однако, пыльца из белых цветков попадает в красные, или, наоборот, полученное таким образом растение будет иметь розовые цветки. Легко видеть, однако, что розовые

цветки не являются биологически стабильным сортом. Если мы вырастим несколько таких ночных красавиц, то обнаружим, что следующее поколение цветков будет на 50 процентов розового цвета, на 25 процентов красного и на 25 процентов белого.

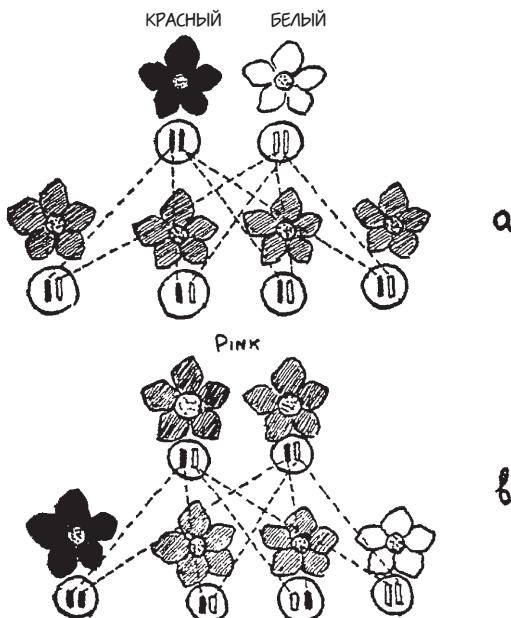


Рис. 98.

Объяснение легко найти, если предположить, что свойство красного или белого цветков переносится одной из клеточных хромосом растения и что для получения «чистого» цвета *обе* хромосомы из пары должны быть идентичны в этом отношении. Если одна хромосома «красная», а другая «белая», битва цвета приводит к розовым цветкам. Глядя на рис. 98, который схематически представляет, как распределяются между потомками «хромосомы цвета», мы видим численное соотношение, упомянутое выше. Нарисовав другую схему, аналогичную изображенной на рис. 98, легко показать, что, занимаясь разведением белой и розовой ночных красавиц, мы должны получить в первом поколении 50 процентов розовых и 50 процентов белых цветков, но ни одного красного. Аналогично красные и розовые цветки дают 50 процентов крас-

ных, 50 процентов розовых, но ни одного белого. Таковы законы наследственности, которые первым открыл, почти столетие назад¹, скромный моравский монах Грегор Мендель, выращивая садовый горох в монастыре рядом с Брюнном.

До сих пор мы связывали различные свойства, унаследованные молодым организмом, с различными хромосомами, которые он получает от своих родителей. Но, поскольку существует почти неисчислимое количество разнообразных свойств по сравнению с относительно небольшим количеством хромосом (8 — в каждой клетке муhi, 48 — в клетке человека), мы вынуждены признать, что каждая хромосома несет в себе длинный список индивидуальных признаков, которые, как представляется, распределены вдоль ее тонкого волокнообразного тела. Собственно, глядя на иллюстрацию V_A «Вклейки», которая демонстрирует хромосомы слюнных желез плодовой муhi (*Drosophila melanogaster*^{*}), трудно избавиться от впечатления, что многочисленные темные полосы, «разрезающие» поперек длинное тело хромосомы, являются местоположениями различных свойств, несомых ею. Одни из этих поперечных полос, возможно, регулируют цвет муhi, другие — форму ее крыльев, а третьи могут отвечать за то, что у нее шесть лапок, что она около *четверти дюйма* в длину, и что она вообще выглядит как плодовая муха, а не как сороконожка или курица.

И наука генетика, собственно, и говорит нам о том, что это впечатление совершенно верно. Можно не только показать, что эти крошечные структурные единицы любой хромосомы, известные как «гены», несут в себе разнообразные индивидуальные наследственные свойства, но во многих случаях можно также сказать, какой именно ген несет то или иное конкретное свойство.

Даже при максимально возможном увеличении все гены выглядят почти одинаково, скрывая функциональные отличия где-то глубоко в своей молекулярной структуре.

Таким образом, «цель жизни» каждого гена можно найти, только тщательно изучив способ, с помощью которого различные наследственные свойства передаются из поколения в поколение у данного вида растений или животных.

¹ На сегодняшний день — более столетия назад.

* В частности, в этом случае, в отличие от множества других, хромосомы чрезвычайно большие и их строение можно легко изучить методами микрографии.

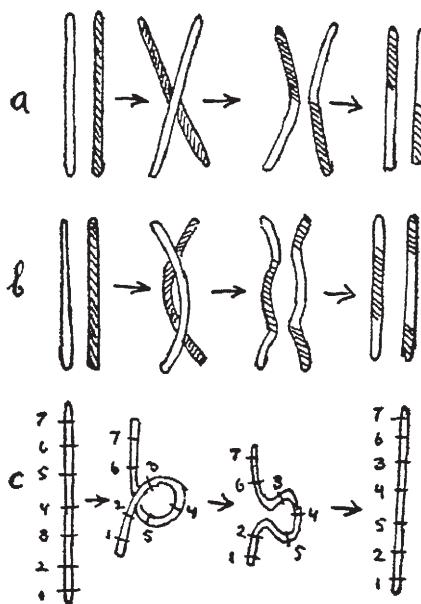


Рис. 99.

Мы уже видели, что любой новый живой организм получает половину своих хромосом от отца и половину от матери. Поскольку отцовские и материнские наборы хромосом, в свою очередь, представляют собой смесь 50/50 тех, которые происходят от соответствующих бабушек и дедушек, мы должны ожидать, что ребенок получит наследство только от одного из дедушек и бабушек с каждой стороны. Это, однако, не всегда верно, и есть случаи, когда *обе бабушки и оба дедушки завещали внуку свои признаки*.

Значит ли это, что схема переноса хромосом, описанная выше, неверна? Нет, не значит, она лишь немного упрощена. Фактор, который также необходимо принять во внимание, заключается в том, что, готовясь к процессу мейоза, в ходе которого резервная репродуктивная клетка разделяется на две гаметы, парные хромосомы часто обвиваются друг вокруг друга и могут обменяться своими частями. Такие процессы обмена, схематически изображенные на рис. 99 a , b , приводят к смешению генетических последовательностей, приобретаемых от родителей, и несут ответственность за беспорядок в наследственности. Бывают также случаи (рис. 99 c), когда одна хромосома может завязаться петлей в одном

месте, а разорваться в другом, оказываясь с перепутанным порядком генов (рис. 99с; иллюстрация V_B «Вклейки»).

Ясно, что такая перестановка генов у обеих хромосом из пары или в пределах одной хромосомы с большей вероятностью повлияет на положения тех генов, которые первоначально находились далеко друг от друга, чем на те, которые были ближайшими соседями. Именно таким же образом, когда снимают колоду, меняются положения карт в снятой и в остальной части колоды, и карта, которая была снизу оставшейся части колоды, складываются вместе), но разделяется лишь одна пара непосредственных соседей.

Следовательно, наблюдая, что два определенных наследственных свойства почти всегда перемещаются вместе в кроссинговере¹ хромосом, мы можем заключить, что соответствующие гены были близкими соседями. И наоборот, свойства, которые часто разделяются в процессе кроссинговера, должны находиться в удаленных друг от друга частях хромосомы.

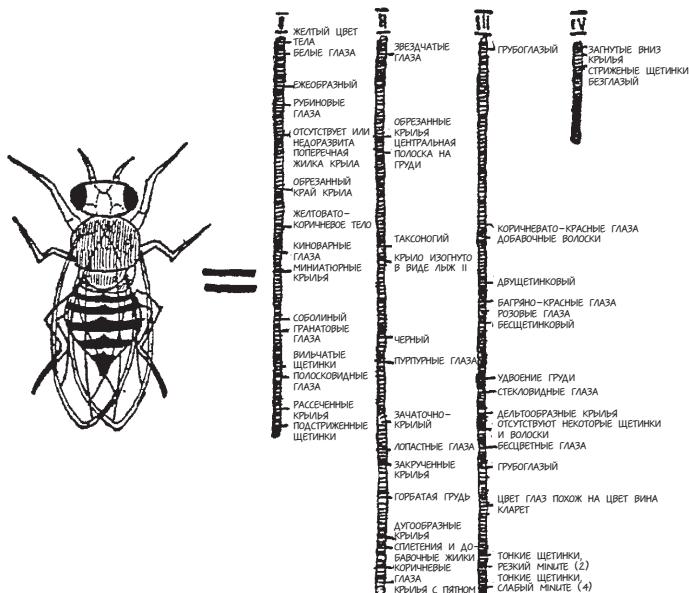


Рис. 100.

¹ Взаимный обмен гомологичными участками гомологичных хромосом.

Работая в этом направлении, американский генетик Т.Х. Морган и его школа смогли установить определенный порядок генов в хромосомах плодовой мухи, которую они использовали в своем исследовании. Рис. 100 представляет собой схему итогов этого исследования, показывающую, как разные признаки плодовой мухи распределяются по формирующим ее генам четырех хромосом.

Схема, показанная на рис. 100, была сделана для мухи, но подобную можно составить, конечно же, и для более сложных животных, включая человека, хотя для этого потребуются гораздо более кропотливые и глубокие исследования.

3. ГЕНЫ КАК «ЖИВЫЕ МОЛЕКУЛЫ»

Анализируя шаг за шагом невероятно сложное строение живых организмов, мы, наконец, пришли к тому, что, похоже, является фундаментальными единицами жизни. Собственно, мы уже видели, что и весь ход развития, и практически все свойства взрослого организма регулируются набором генов, скрытых глубоко внутри его клеток; можно сказать, что каждое животное или растение «разрастается вокруг» своих генов. Если здесь допустима сильно упрощенная физическая аналогия, мы можем сравнить отношение между генами и живым организмом с отношением между атомными ядрами и большими массами неорганической материи. Здесь тоже практически все физико-химические свойства данного вещества можно свести к основным свойствам атомных ядер, которые характеризуются всего лишь одним числом, обозначающим их электрический заряд. Так, например, ядра, несущие заряд в 6 элементарных электрических единиц, будут окружать себя атомными оболочками с 6 электронами каждый, что обусловит стремление этих атомов организовываться в повторяющемся шестиугольном порядке и образовывать кристаллы исключительной твердости, с очень высоким показателем преломления, которые мы называем алмазами. Аналогично набор ядер с электрическими зарядами 29, 16 и 8 породит атомы, которые слепляются, чтобы образовать мягкие синие кристаллы вещества известного, как сульфат меди. Конечно, даже самый простой живой организм гораздо сложнее, чем любой кристалл, но в обоих случаях мы имеем дело с явлением типичной макроскопической организации, которая до последней детали определяется микроскопическими центрами организации.

Насколько велики эти организационные центры, которые определяют все свойства живых организмов, — от аромата розы до формы хобота слона? На этот вопрос можно легко ответить, разделив объем обыкновенной хромосомы на количество генов, содержащихся в ней. Согласно микроскопическим наблюдениям, толщина средней хромосомы составляет около одной тысячной миллиметра, это означает, что ее объем — около 10^{-14} куб. см. Тем не менее селекционные эксперименты наводят на мысль, что одна хромосома, должно быть, ответственна ни много ни мало за несколько тысяч различных наследственных свойств — цифра, которую также можно получить путем непосредственного подсчета количества темных полос (предположительно отдельных генов), пересекающих длинные тела чрезвычайно разросшихся хромосом плодовой мухи *Drosophila melanogaster** (иллюстрация V «В克莱йки»). Разделив общий объем хромосомы на количество отдельных генов, мы находим, что объем одного гена не более 10^{-17} куб. см. Поскольку объем среднего атома составляет около 10^{-23} куб. см [$\cong (2 \cdot 10^{-8})^3$], мы заключаем, что *каждый отдельный ген состоит, должно быть, из примерно миллиона атомов*.

Мы также можем оценить общую массу генов, скажем, в теле человека.

Как мы видели выше, взрослый человек собран примерно из 10^{14} клеток, каждая клетка содержит 48 хромосом. Таким образом, общий объем всех хромосом в организме человека составляет около $10^{14} \times 48 \times 10^{-14} \cong 50$ см³, а весить они должны (так как плотность живого вещества сопоставима с плотностью воды) меньше двух унций. И именно это ничтожно малое количество «организующего вещества», которое выстраивает вокруг себя сложную «оболочку» тела животного или растения, в тысячи раз превышающего его собственный вес, руководит «изнутри» каждым этапом его роста, каждой особенностью его строения — и даже изрядно влияет на его поведение.

Но что есть сам ген? Должен ли он рассматриваться как сложное «животное», которые можно разделить на еще меньшие биологические единицы? Ответ на этот вопрос — однозначно нет. Ген — самая маленькая единица живой материи. Далее, в то время как вполне определенным является то, что гены имеют

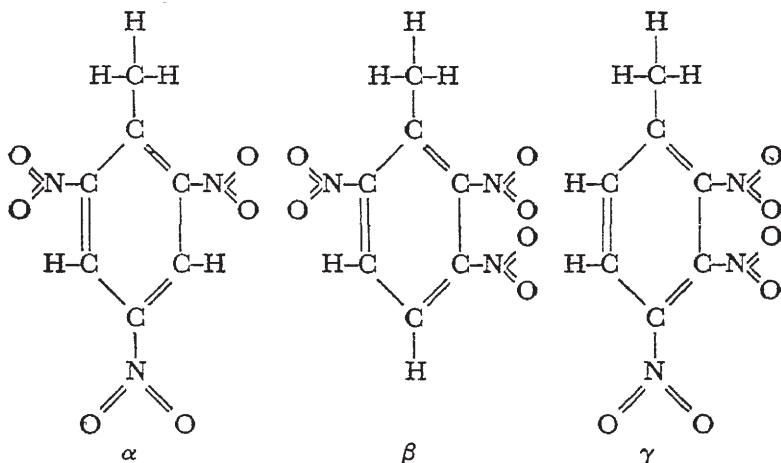
* Хромосомы обычного размера настолько малы, что даже через микроскоп не видно их деления на гены.

характеристики, которые отличают материю, обладающую жизнью, от материи, не обладающей ею, с другой стороны, вряд ли можно усомниться и в том, что они связаны со сложными молекулами (например, белками), которые подчиняются всем законам химии.

Иными словами, похоже, что ген представляет собой недостающее звено между органической и неорганической материей — «живую молекулу», о которой мы рассуждали в начале этой главы.

И действительно, учитывая, с одной стороны, замечательное постоянство, с которым гены проносят через тысячи поколений практически без отклонений свойства данного вида, а с другой стороны, сравнительно малое количество индивидуальных атомов, образующих один ген, нельзя не счесть его ничем иным, как хорошо продуманной структурой, в которой каждый атом или атомная группа находится на своем, заранее определенном месте. Отличия в свойствах различных генов, которые отражаются во внешних вариациях образовавшихся организмов, признаки, которые их обуславливают, теперь можно понять как изменения в распределении атомов внутри структуры генов.

В качестве простого примера давайте возьмем молекулу тротила (тринитротолуола), взрывчатого вещества, которое сыграло значимую роль в последних двух войнах. Молекула тротила построена из 7 атомов углерода, 5 атомов водорода, 3 атомов азота и 6 атомов кислорода, организованных по одной из схем:



Отличия в трех конфигурациях обусловлены способом, с помощью которого группы $\text{N} \begin{smallmatrix} \text{O} \\ \text{O} \end{smallmatrix}$ прикрепляются к углеродному кольцу, а образующиеся вещества обычно обозначаются как α -тротил, β -тротил и γ -тротил. Все три вещества могут быть синтезированы в химической лаборатории. Все три взрывчаты по природе, но демонстрируют небольшие вариации в плотности, растворимости, температуре плавления, взрывной силе и тому подобном. Используя обычные методы химии, группы $\text{N} \begin{smallmatrix} \text{O} \\ \text{O} \end{smallmatrix}$ можно легко переносить от одной точки крепления внутри молекулы к другой, тем самым превращая одну марку тротила в другую. Примеры такого рода очень распространены в химии, и чем больше та или иная молекула, тем большее число разновидностей (*изомерных форм*) можно таким образом получить.

Если мы рассматриваем ген как одну гигантскую молекулу, построенную из миллиона атомов, количество возможностей для расположения разнообразных атомных групп в разных местах внутри молекулы становится неизмеримо большим.

Мы можем представить ген как длинную цепь, состоящую из периодически повторяющихся атомных групп, к которым присоединены, подобно подвескам, прикрепленным к браслету, разнообразные группы других атомов; собственно, последние достижения в области биохимии позволяют нам изобразить точную схему такого наследственного «брраслета с подвесками». Известный как рибонуклеиновая кислота, он состоит из атомов углерода, азота, фосфора, кислорода и водорода. На рис. 101 мы даем несколько сюрреалистическую картину (атомы азота и водорода опущены) части наследственного браслета, которая определила цвет глаз новорожденного ребенка. Четыре имеющиеся подвески заявляют, что глаза у ребенка серые.

Перенося разнообразные подвески с одного «крючка» на другой, мы можем получить практически бесконечные вариации различных распределений.

Так, например, имея браслет с 10 разными подвесками, мы можем распределить их $1 \times 2 \times 3 \times 4 \times 5 \times 6 \times 7 \times 8 \times 9 \times 10 = 3628\,800$ различными способами.

Если некоторые из подвесок идентичны, количество возможных расположений будет меньше. Так, обладая лишь 5 видами подвесок (по 2 каждого вида), мы имеем всего лишь 113 400 различных возможностей.

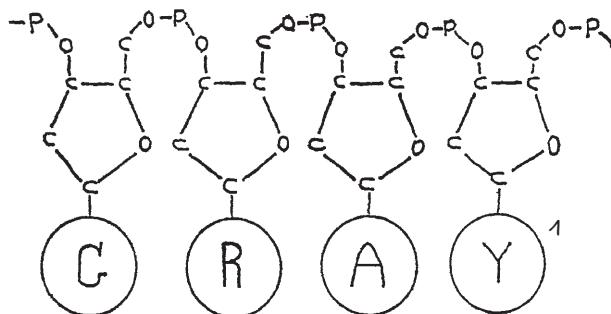


Рис. 101. Часть наследственного «браслета с подвесками», которая определяет цвет глаз. (Крайне схематично!)

Количество возможностей, однако, очень быстро увеличивается с увеличением общего количества подвесок, и если у нас есть, например, 25 подвесок, по 5 каждого вида, количество возможных распределений составит примерно 62 330 000 000 000!

Итак, мы видим, что количество комбинаций, которые можно получить перераспределением различных «подвесок» между различными точками крепления в длинных органических молекулах, без сомнений, достаточно большое, чтобы охватить не только все известные живые формы, но также и самые фантастические несуществующие формы животных и растений, которые только может создать наше воображение.

Очень важный момент, касающийся распределения подвесок, характеризующих свойства, по волокнообразной молекуле гена, заключается в том, что это распределение подвержено спонтанным изменениям, приводящим в результате к соответствующим макроскопическим изменениям во всем организме. Наиболее распространенная причина таких изменений заключается в обычном тепловом движении, которое заставляет все тело молекулы гнуться и скручиваться, как ветки дерева при сильном ветре. При довольно высоких температурах это колебательное движение молекулярных тел становится достаточно сильным, чтобы разбить их на отдельные части, — процесс, известный как термическая диссоциация (см. главу VIII). Но даже при более низких температурах, когда молекула как таковая сохраняет свою целостность, тепловые колебания могут привести к некоторым внутренним изменениям

¹ gray (англ.) — серый.

молекулярной структуры. Мы можем представить, например, что молекула скрутится таким образом, что какая-нибудь подвеска, прикрепленная к одному месту, окажется рядом с другим местом тела молекулы. В таком случае может легко произойти следующее: подвеска отсоединится от своего прежнего местоположения и прикрепится к новому.

Такие явления, называемые *изомерными превращениями**^{*}, хорошо известны в обычной химии в случаях сравнительно простых молекулярных структур и наряду со всеми другими химическими реакциями следуют основному закону химической кинетики, согласно которому скорость реакции увеличивается приблизительно в 2 раза, когда температура повышается на 10 °С.

В случае *молекул генов*, структура которых так сложна, что, вероятно, будет бросать вызов органическим химикам, обеспечивая приложение для их усилий, в течение еще очень долгого времени, в наши дни нет возможности подтвердить изомерные изменения методами прямого химического анализа. Однако здесь, с определенной точки зрения, мы имеем нечто гораздо лучшее, нежели многотрудный химический анализ. Если такое изомерное изменение имеет место в одном из генов внутри мужской или женской гаметы, союз которых порождает новый живой организм, оно станет в точности воспроизводиться в последовательных процессах расщепления генов и деления клеток и повлияет на некоторые легко наблюдаемые макроскопические особенности появившихся таким образом на свет животных или растений.

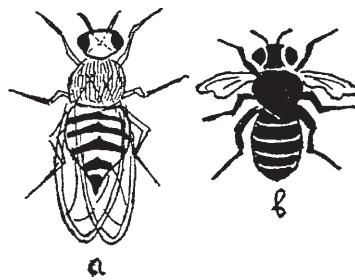


Рис. 102. Спонтанная мутация плодовой мухи.

(a) *Обыкновенный тип: серое тело, длинные крылья.*

(b) *Мутантный тип: черное тело, короткие (зачаточные) крылья.*

* Термин «изомерный», как уже объяснялось ранее, относится к молекулам, которые построены из одних и тех же атомов, но организованы, однако, по-иному.

Воистину одним из важнейших результатов генетического исследования является открытие (сделано в 1902 году голландским биологом де Фризом), что спонтанные наследственные изменения в живом организме всегда происходят в виде дискретных скачков известных как мутации.

В качестве примера давайте рассмотрим эксперименты по разведению уже упомянутых плодовых мух (*Drosophila melanogaster*). Дикая разновидность плодовых мух имеет серые тела и длинные крылья; и когда бы вы ни ловили такую муху в саду, вы можете быть уверены почти полностью, что, когда поймаете, она будет соответствовать этим характеристикам. Однако, размножая этих мух поколение за поколением в лабораторных условиях, экспериментаторы время от времени получают своеобразного «уродца» — муху с ненормально короткими крыльями и почти черным телом (рис. 102).

Важным моментом является то, что вы, вероятно, не найдете одновременно с короткокрылой черной мухой других мух разных оттенков серого цвета и с крыльями различной длины, которые составляли бы последовательность все более и более видоизменяющихся поколений, представляя собой вариации между крайней степенью исключения (почти черное тело и очень короткие крылья) и «нормальными» предками. Как правило, все члены нового поколения (а их могут быть сотни!) примерно одинаково серые с одинаково длинными крыльями и лишь один (или несколько) отличается *полностью*. Либо нет никаких существенных изменений вообще, либо имеется довольно сильное изменение (мутация). Эта ситуация наблюдалась в сотнях других случаев. Так, например, дальтонизм не всегда передается по наследству, и должны быть примеры, когда ребенок страдает от дальтонизма без какой-либо «вины» со стороны его предков. В этом случае дальтонизм у людей, точно так же, как и в случае коротких крыльев у плодовой мухи, мы имеем тот же принцип «все или ничего»: вопрос не в том, лучше или хуже человек различает два цвета, вопрос в другом — различает или нет вообще.

Как все, кто когда-либо слышали имя Чарльза Дарвина, знают, эти изменения в свойствах новых поколений, вместе с борьбой за существование и выживанием сильнейшего, приводят

к постоянному процессу эволюции видов* и ответственны за то, что простой моллюск, который был царем природы пару миллиардов лет назад, развился в высокоинтеллектуальное живое существо, подобное вам, кто способен прочесть и понять даже такую мудреную книгу, как эта.

Как обсуждалось выше, скачкообразные вариации в наследственных свойствах абсолютно понятны с точки зрения изомерных изменений в молекулах генов. Собственно, если подвеска, определяющая свойство, меняет в молекуле гена свое место, она не может сделать это наполовину: она либо остается на старом месте, либо прикрепляется к новому, вызывая тем самым дискретное изменение свойств организма.

Точка зрения, согласно которой «мутации» обусловлены изомерными сдвигами в молекулах генов, получила сильную поддержку, когда была открыта зависимость скорости мутаций от температуры среды, в которой животные или растения разводятся. Собственно, экспериментальная работа Тимофеева и Циммера по изучению влияния температуры на скорость мутаций указывает на то, что (не считая некоторые дополнительные сложности, вызванные окружающей средой и другими факторами), они следуют тому же физико-химическому закону, что и любая другая молекулярная реакция. Это важное открытие побудило Макса Дельбрюка (в прошлом физик-теоретик, а ныне¹ генетик-экспериментатор) усовершенствовать свои взгляды (которые имели поистине эпохальное значение) касательно эквивалентности биологического феномена мутаций чисто физико-химическому процессу изомерных изменений в молекуле.

Мы могли бы обсуждать бесконечно физическую основу теории гена, в частности, важные данные, которые нам дает изучение мутаций, вызванных рентгеновскими лучами и другими излучениями, но и того, что уже было сказано, кажется, достаточно, чтобы убедить читателя: в настоящее время наука переступает порог, за которым находится чисто физическое объяснение «загадочного» феномена жизни.

* Единственное отличие, которое открытие мутаций внесло в классическую теорию Дарвина, состоит в том, что эволюция происходит благодаря дискретному скачкообразному изменению, а не благодаря постоянным маленьким изменениям, какие имел в виду Дарвин.

¹ Здравствовавший на момент первого и второго издания этой книги, но ныне уже покойный.

Мы не можем закончить эту главу, не упомянув биологические объекты известные как *вирусы*, которые, похоже, представляют собой *свободные гены* без клетки. До сравнительно недавнего времени биологи считали, что самыми простыми формами жизни являются различные типы *бактерий* — одноклеточные микроорганизмы, которые растут и размножаются в живых тканях животных и растений, иногда вызывая различные виды заболеваний. Микроскопические методы исследования показали, например, что брюшной тиф вызывается особым типом бактерий, имеющих сильно вытянутые тела, около 3 микрон (μ) в длину и $1/2 \mu$ в ширину, а бактерии скарлатины представляют собой клетки сферической формы диаметром около 2 микрон. Был, однако, ряд заболеваний, таких как, например, грипп у человека или так называемая мозаичная болезнь у табачных растений, где обычные микроскопические наблюдения не выявили никаких бактерий нормального размера. Поскольку, однако, было известно, что эти специфические «безбактерийные» заболевания переносятся из организма больных индивидов в организм здоровых тем же «инфекционным» способом, как и все другие подобные заболевания, и поскольку «инфекция», полученная таким образом, быстро распространялась по всему телу зараженного индивида, — настойчиво напрашивалось предположение, что их вызывали какие-то биологические переносчики; они получили название *вирусы*.

Но лишь сравнительно недавно развитие *ультрамикроскопической техники* (с использованием ультрафиолета) и, в частности, изобретение *электронного микроскопа* (в котором использование электронных пучков вместо обычных световых лучей позволяет добиться гораздо большего увеличения) впервые предоставило микробиологам возможность увидеть скрытое ранее строение вирусов.

Выяснилось, что различные вирусы представляют собой наборы большого количества отдельных частиц в точности одного и того же размера и намного меньше, чем обычные бактерии (рис. 103). Так, частицы вируса гриппа — маленькие сферы $0,1 \mu$ в диаметре, тогда как тонкие палочковидные частицы табачного вируса — $0,280 \mu$ в длину и $0,15 \mu$ в ширину.

Иллюстрация VI «Вклейки» представляет собой весьма впечатляющую фотографию (сделана с помощью электронного микроскопа) частиц вируса табачной мозаики, которые являются мельчайшими из известных живых организмов, существующих

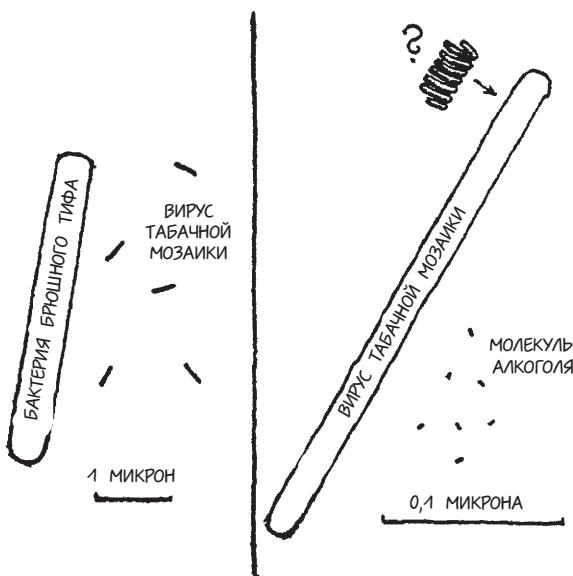


Рис. 103. Сравнение бактерий, вирусов и молекул.

сейчас. Помня, что диаметр одного атома составляет около $0,0003\text{ }\mu$, мы заключаем, что в частице вируса табачной мозаики — лишь около пятидесяти атомов в ширину и около тысячи атомов в длину. Всего — не более пары миллионов отдельных атомов!*

Эта цифра сразу же наводит на мысль об аналогичной цифре — количестве атомов в одном гене — и делает еще возможным рассмотрение частиц вируса в качестве «свободных генов», которые просто не удосужились объединиться в длинные колонии — хромосомы — и окружить себя более или менее увесистой массой клеточной протоплазмы.

* Количество атомов, образующих вирусную частицу, может быть значительно меньше указанного, так как, вполне возможно, что они «пусты внутри», будучи образованными спирально свернутыми молекулярными цепями типа показанной на рис. 101. Если предположить, что вирус табачной мозаики действительно имеет такую структуру (схематично показана на рис. 103), так что различные атомные группы расположены только на поверхности «цилиндра», общее количество атомов в частице уменьшится до нескольких сотен тысяч. Тот же аргумент применим, безусловно, и к количеству атомов в одном гене.

В самом деле, процесс размножения вирусных частиц проходит, похоже, точно так же, как удвоение хромосом в процессе деления клеток: весь их организм расщепляется вдоль своей оси, давая начало двум новым полноразмерным частицам вируса. По-видимому, мы наблюдаем здесь основной репродуктивный процесс (показан на рис. 91 в виде вымыщенного случая воспроизведения алкоголя), в котором различные атомные группы, расположенные вдоль сложной молекулы, притягивают из окружающей среды подобные себе атомные группы и организуют их в том же порядке, что и в исходной молекуле. Когда такая организация завершена, новая молекула, вполне развитая, отщепляется от исходной. Собственно, в случае этих примитивных живых организмов, обычный процесс «роста», видимо, не происходит, а новые организмы просто собираются «по частям» бок о бок со старыми. Ситуацию можно проиллюстрировать, представив человеческого ребенка, который развивается снаружи, будучи прикрепленным к телу матери, и который отсоединяется, когда становится полностью сформированным мужчиной или женщиной. (Автор не будет рисовать иллюстрацию для такой ситуации — несмотря на сильный соблазн сделать это.) Само собой разумеется, чтобы такой процесс размножения стал возможным, развитие должно проходить в особой, частично организованной среде, а в отличие от бактерий, которые имеют свою протоплазму, вирусные частицы могут размножаться, собственно, только в живой протоплазме других организмов, будучи, вообще говоря, очень разборчивыми в «еде».

Другие распространенные характеристики вирусов — *их подверженность мутациям* и передача мутантными особями своему потомству новообретенных признаков, согласно всем уже знакомым нам законам генетики. На самом деле биологи смогли распознать несколько наследственных штаммов одного и того же вируса и проследить «развитие расы». Когда новая эпидемия гриппа охватывает те или иные сообщества, можно быть уверенным, что она вызвана каким-то новым мутантным типом вируса гриппа, обладающим некоторыми новыми вредными свойства, против которых человеческий организм еще не имел возможности выработать надлежащий иммунитет.

На предыдущих страницах, показывая, что *вирусные частицы должны рассматриваться как живые организмы*, мы привели ряд сильных аргументов. Сейчас же мы можем заявить с не меньшей

решительностью, что эти частицы также должны рассматриваться как обычновенные химические молекулы, которые подчиняются всем законам и правилам физики и химии. На самом деле чисто химические исследования вирусного материала устанавливают: данный вирус может рассматриваться как определенное химическое соединение, и к нему можно относиться как к сложному органическому (но не живому) соединению, а они подвержены различным типам реакций замещения. Собственно, похоже, это лишь вопрос времени, когда биохимик сможет написать для каждого вируса структурную химическую формулу так же легко, как он сейчас пишет формулы для алкоголя, глицерина или сахара. Еще более поразительным является тот факт, что вирусные частицы данного типа оказываются *в точности одного и того же размера*, до последнего своего атома.

На самом деле было показано, что вирусные частицы, лишенные питательной среды, в которой они живут, организуются в порядке, присущем обычным кристаллам. Например, так называемый вирус *кустистой карликовости томатов* кристаллизуется в виде больших и красивых ромбододекаэдров! Вы можете хранить этот кристалл в минералогическом кабинете вместе с полевым шпатом и каменной солью, но поместите его обратно на растение томата, и он превратится в рой живых организмов.

Первый важный шаг на пути к синтезу живых организмов из неорганического материала сделали Хайнц Френкель-Конрат и Робли Уильямс в Институте вирусологии Калифорнийского университета. Работая с вирусом табачной мозаики, они сумели разделить вирусные частицы на две части, каждая из которых представляла собой неживую, хотя и довольно сложную органическую молекулу. Давно известно, что этот вирус, имеющий форму длинных палочек (иллюстрация VI «Вклейки»), образуется группами длинных прямых молекул, которые состоят из организующего вещества (известного как *рибонуклеиновая кислота*) и длинных белковых молекул, обвивающих его, как проволока железный сердечник в электромагните. Используя различные химические реагенты, Френкель-Конрат и Уильямс сумели расщепить, не повредив, эти вирусные частицы и отделили рибонуклеиновую кислоту от молекул белка. Таким образом, они получили в одной пробирке водный раствор рибонуклеиновой кислоты, а в другой — раствор белковых молекул. Фотографии, сделанные с помощью электронного микроскопа, показали, что пробирки не

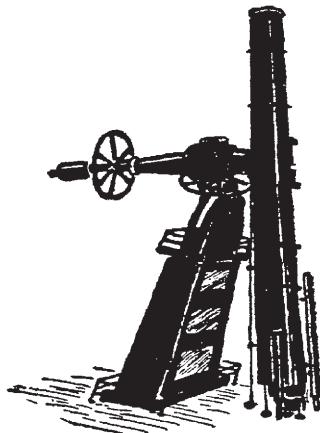
410 ГЕОРГИЙ ГАМОВ. ОДИН, ДВА, ТРИ... БЕСКОНЕЧНОСТЬ

содержат ничего, кроме молекул этих двух веществ, и они были полностью лишены каких-либо признаков жизни.

Но когда оба раствора соединили, молекулы рибонуклеиновой кислоты начали собираться в группы по 24 молекулы, а молекулы белка — обматываться вокруг них, образуя точные копии вирусных частиц, с которых эксперимент начался. Нанесенные на листья табака, эти разделенные-и-вновь-соединенные-вместе вирусы вызвали у растения мозаичную болезнь — как будто их никогда и не разделяли. Конечно, в этом случае два химических компонента в пробирках были получены путем расщепления живого вируса. Дело, однако, в том, что биохимики уже сейчас обладают методами, которые позволяют синтезировать из обычных химических элементов как молекулы рибонуклеиновой кислоты, так и молекулы белка. Хотя в настоящее время (1960 год) можно синтезировать только сравнительно короткие молекулы обоих веществ, нет оснований сомневаться в том, что с течением времени из простых элементов будут собирать молекулы столь же длинные, как и в вирусах. И результатом такой сборки станет вирусная частица, созданная руками человека.

Часть IV

Макрокосмос



Глава X

Расширяя горизонты

1. ЗЕМЛЯ И ЕЕ ОКРЕСТНОСТИ

ИТАК, вернувшись с экскурсии в царство молекул, атомов и ядер назад к объектам более привычного размера, мы готовы начать новое путешествие, на этот раз в противоположном направлении — к Солнцу, звездам, далеким звездным облакам и самым дальним пределам нашей Вселенной. Здесь, как и в случае с микрокосмосом, развитие науки уводит нас все дальше и дальше от хорошо знакомых повседневных объектов, постепенно открывая новые и все более широкие горизонты.

На ранних этапах человеческой цивилизации, то, что мы называем Вселенной, представлялось смехотворно маленьким. Земля считалась большим плоским диском, который плавал на поверхности окружающего ее Мирового океана. Внизу была одна вода, настолько глубокая, насколько только можно себе вообразить, вверху — небо, обитель богов. Диск был достаточно большим, чтобы вместить все земли известные географии того времени, которые включали берега Средиземного моря с прилегающи-

ми частями Европы, Африки и немного Азии. Северный край диска Земли ограничивался грядой высоких гор, за которыми пряталось Солнце, отдыхая в ночное время на поверхности Мирового океана. Иллюстрация ниже (рис. 104) дает довольно верное представление о том, как выглядел мир для людей древности. Но в третьем веке до нашей эры жил человек, который не соглашался с этой простой и общепринятой картиной мира. Это был известный греческий философ (так они называли ученых в то время) по имени Аристотель.

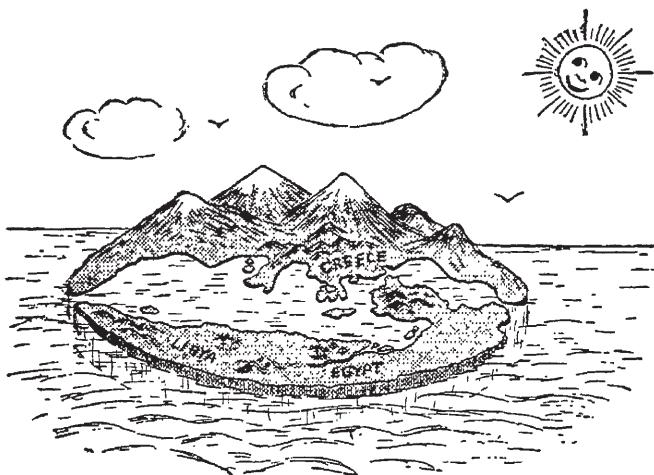


Рис. 104. Мир древних.

В своей книге «*О небе*» Аристотель высказал теорию о том, что наша Земля на самом деле сфера, частично покрытая сушей, частично водой и окруженная воздухом. Он подкреплял свою точку зрения многими хорошо знакомыми современному человеку аргументами, которые кажутся нам сейчас тривиальными. Он указывал: то, как скрываются корабли за горизонтом, когда корпус исчезает первым, а мачты торчат словно прямо из воды, доказывает, что поверхность океана искривленная, а не плоская. Он утверждал, что затмения Луны происходят из-за тени Земли, проходящей по поверхности нашего спутника, и, поскольку эта тень круглая, сама Земля должна быть круглой тоже. Но в то время мало кто верил ему. Люди не могли понять, как — если то, что он говорил, было правдой — обитатели противоположной стороны

земного шара (так называемые антиподы, австралийцы для вас¹) могли ходить вверх ногами и не сваливаться с Земли, или почему вода в этих частях света не утекла в то, что они назвали голубым небом (рис. 105).

Люди в то время, видите ли, не понимали, что вещи падают, потому что они притягиваются телом Земли. Для них «верх» и «низ» являлись абсолютными направлениями в пространстве, которые везде были одинаковыми. Идея, что, если вы проедете половину Земли, «верх» может стать «низом», а «низ» стать «верхом», казалась им, должно быть, столь же сумасшедшей, сколь кажутся сумасшедшими множеству людей сегодня многие утверждения теории относительности Эйнштейна.

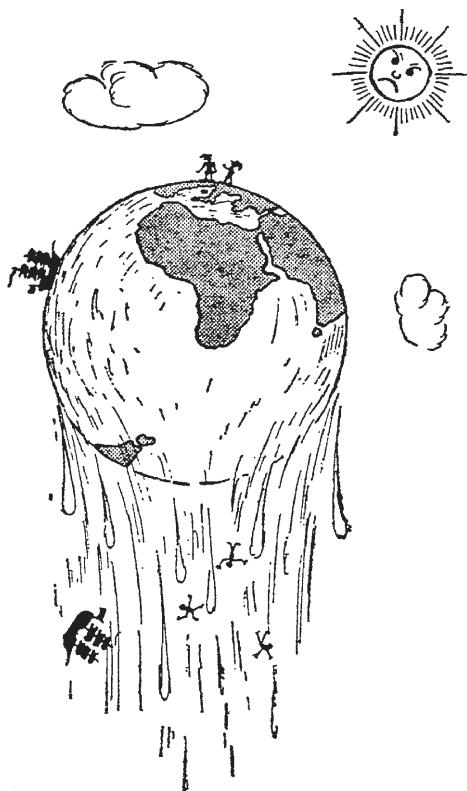


Рис. 105. Аргумент против сферической формы Земли.

¹ Автор ориентировался на жителей Америки.

Падение тяжелых тел объяснялось не притяжением Земли, как мы объясняем это сейчас, а «естественной склонностью» всех вещей двигаться вниз, поэтому вы упадете вниз в голубое небо, если рискнете ступить на нижнюю часть земного шара! Настолько сильны были возражения и так сложно оказалось приспособиться к новым идеям, что во многих книгах, опубликованных уже в пятнадцатом веке, спустя почти две тысячи лет с тех времен, когда жил Аристотель, можно было увидеть иллюстрации, которые высмеивали идею сферической формы Земли, изображая антиподов стоящими головой вниз на «нижней» ее поверхности. Вероятно, сам великий Колумб, отправляясь в путешествие, чтобы открыть «путь-наоборот» в Индию, не был полностью уверен в состоятельности своего плана, и, между прочим, он так и не осуществил его, потому что на пути у него встал Американский континент.

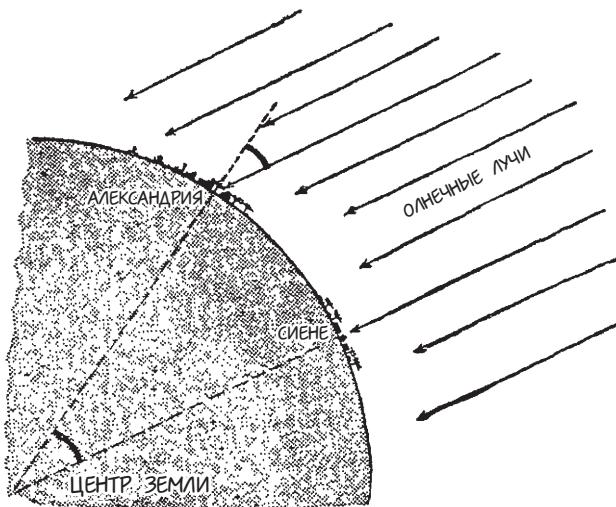


Рис. 106.

Последнее сомнение в сферической форме Земли окончательно исчезло лишь после знаменитого кругосветного плавания Фернандо де Магальянша (более известного как Магеллан).

Когда впервые стало понято, что Земля имеет форму гигантской сферы, возник естественный вопрос, насколько велика эта сфера в сравнении с частями мира, известными в то время. Но как бы вы измерили размер Земли, не совершая кругосветного путе-

шествия, о котором для философов Древней Греции не могло быть, конечно же, и речи?

Что ж, способ есть, и его впервые увидел знаменитый ученый того времени по имени Эратосфен, который жил в греческой колонии Александрия в Египте в третьем веке до нашей эры. Он услышал от жителей Сиене¹, города на Верхнем Ниле, расположенным примерно в 5000 египетских стадиев² к югу от Александрии*, что в этом городе во время равноденствия, в полдень, Солнце стояло прямо над головой, так что вертикальные объекты не отбрасывали никакой тени. С другой стороны, Эратосфен знал, что в Александрии ничего подобного никогда не случалось и что в ней, в тот же самый день, Солнце отходит от зенита (точки прямо над головой) на 7 градусов, или на одну пятидесятую полного круга. Предполагая, что Земля круглая, Эратосфен дал этому факту очень простое объяснение — объяснение, которое вы можете легко понять, посмотрев на рис. 106. В самом деле, поскольку поверхность земли между двумя городами искривляется, лучи Солнца, падающие вертикально в Сиене, в Александрии, находящейся севернее, неизбежно упадут на Землю под определенным углом. Вы также можете видеть на этом рисунке, что, если провести две прямые линии из центра Земли, чтобы одна проходила через Александрию, а другая — через Сиене, угол, который образуется при их схождении, идентичен углу, образованному схождением линии, идущей от центра земли к Александрии (то есть в направлении зенита в Александрии) и направлением солнечных лучей в тот момент, когда Солнце находится прямо над Сиене.

Поскольку этот угол составляет одну пятидесятую часть полного круга, общая окружность Земли должна быть в пятьдесят раз больше расстояния между двумя городами, или 250 000 стадий. Одна египетская стадия равна около $\frac{1}{10}$ мили, так что результат, полученный Эратосфеном, эквивалентен 25 000 милям, или 40 000 км, — и это действительно очень близко к самым современным оценкам.

Однако суть первого измерения Земли заключается не в точности полученного числа, а в осознании того факта, что Земля

¹ Ныне Асуан (Египет).

² В Древнем Египте разделяли несколько видов стадий: обычный и стадий фараонов. Автор предлагает считать 1 стадий за 170 м (стадий обычный). — Примеч. ред.

* Рядом с нынешним местоположением Асуанской плотины.

настолько велика. Ого, да ее общая поверхность, должно быть, в несколько сотен раз больше площади всех известных земель! Могло ли это быть правдой и если да, то что находилось за пределами известных границ?

Говоря об астрономических расстояниях, мы должны познакомиться сначала с тем, что известно как *параллактическое смещение*, или просто как *параллакс*. Слово, возможно, звучит немножко пугающее, но на самом деле параллакс — штука весьма незамысловатая и очень полезная.

Мы можем начать наше знакомство с параллаксом, попытавшись продеть нить в игольное ушко. Попробуйте сделать это, закрыв один глаз, и вы тут же обнаружите, что не получается: вы будете либо заводить конец нити слишком далеко за иглу, либо останавливаться прямо перед ушком. С помощью лишь одного глаза вы не можете судить о расстояниях до иглы и до нити. Но когда оба глаза открыты, вы можете с легкостью сделать это, или, по крайней мере, легко научиться делать это. Когда вы смотрите на объект обоими глазами, вы автоматически фокусируете их оба на объекте. Чем ближе объект, тем ближе вы должны повернуть глаза друг к другу, и мышечное ощущение, возникающее в результате такой настройки, дает вам довольно верное представление о расстоянии.

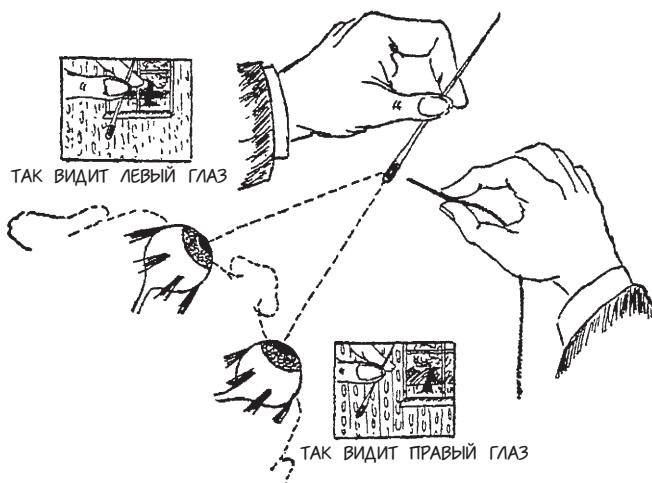


Рис. 107.

Далее, если, вместо того чтобы смотреть обоими глазами, вы закроете один, а потом другой, вы заметите, что положение объекта (иглы в данном случае) относительно дальнего фона (скажем, окна в противоположном конце комнаты) изменилось. Этот эффект известен как *параллактическое смещение* и, безусловно, знаком каждому; если вы никогда не слышали об этом, просто попробуйте сами или посмотрите на рис. 107, который показывает иглу и окно так, как их видят правый и левый глаз. Чем дальше от объекта, тем меньше будет его *параллактическое смещение*, поэтому мы можем его использовать для измерения расстояний. Поскольку *параллактическое смещение* можно точно измерить в градусах дуги, этот метод является более надежным, чем суждение о расстоянии на основе всего лишь мышечного ощущения в глазных яблоках. Но поскольку глаза в нашей голове отделяют друг от друга расстояние лишь около трех дюймов, они не подходят для оценки расстояния, которое больше нескольких футов: в случае более удаленных объектов оси обоих глаз становятся почти параллельными, а параллактическое смещение делается неизмеримо малым. Для того чтобы судить о больших расстояниях, нам нужно отодвинуть оба глаза дальше друг от друга, тем самым увеличивая угол параллактического смещения.

Нет, никакая хирургическая операция не понадобится, этот фокус можно проделать с зеркалами.

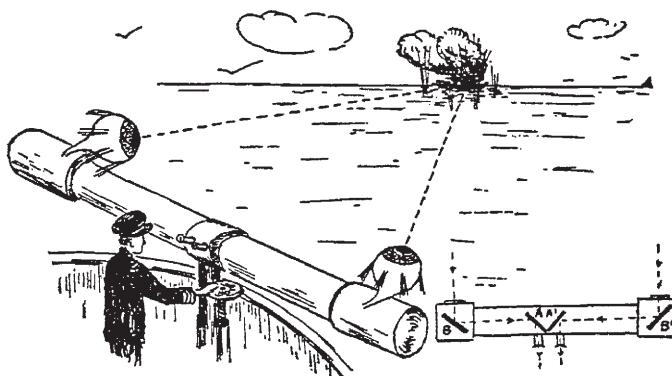


Рис. 108.

На рис. 108 мы видим устройство, которое использовалось в военно-морском флоте (до изобретения радара) для измерения расстояния до военных кораблей противника во время боя. Это длинная труба с двумя зеркалами (A, A'), помещенными перед каждым глазом, и двумя другими зеркалами (B, B'), расположенными в противоположных концах трубы. Глядя через такой дальномер вы на самом деле смотрите одним глазом через конец B , а другим — через конец B' . Расстояние между глазами, или так называемая оптическая база, фактически становится значительно больше, и вы можете оценивать гораздо большие расстояния. Военные моряки, в своей оценке расстояний, не полагаются, конечно же, только на ощущение, которое возникает в мышцах глазных яблок. Дальномеры оснащены специальными приспособлениями и шкалами, измеряющими параллактическое смещение с максимальной точностью.

Однако морские дальномеры, которые прекрасно работают, даже когда вражеский корабль находится почти за горизонтом, не справляются, если попытаться измерить расстояние даже до такого сравнительно близко расположенного небесного тела, как Луна. Собственно, для того чтобы заметить параллактическое смещение Луны относительно фона далеких звезд, оптическая база, то есть расстояние между глазами, должна быть, как минимум, несколько сотен миль в длину. Конечно же, нет никакой необходимости создавать оптическую систему, которая позволила бы нам смотреть одним глазом, скажем, из Вашингтона, а другим — из Нью-Йорка, так как все, что нужно, — это сфотографировать в этих двух городах Луну на фоне окружающих звезд в одно и то же время. Если вы поместите такое двойное изображение в обычный стереоскоп, то увидите Луну, висящую в пространстве на фоне звезд. Сделав измерения на фотографиях Луны и окружающих звезд, снятых в один и тот же момент в двух разных местах на поверхности Земли (рис. 109), астрономы нашли, что параллактическое смещение Луны, наблюдаемое из двух диаметрально противоположных точек Земли равно $1^{\circ} 24' 5''$. Отсюда следует, что расстояние до Луны равно 30,14 диаметров Земли, то есть 384 403 км, или 238 857 миль.

По этому расстоянию и наблюдаемому угловому диаметру находим, что диаметр нашего спутника составляет около одной четвертой диаметра Земли. Общая поверхность Луны составляет всего одну шестнадцатую поверхности Земли, то есть размером она примерно с Африканский континент.

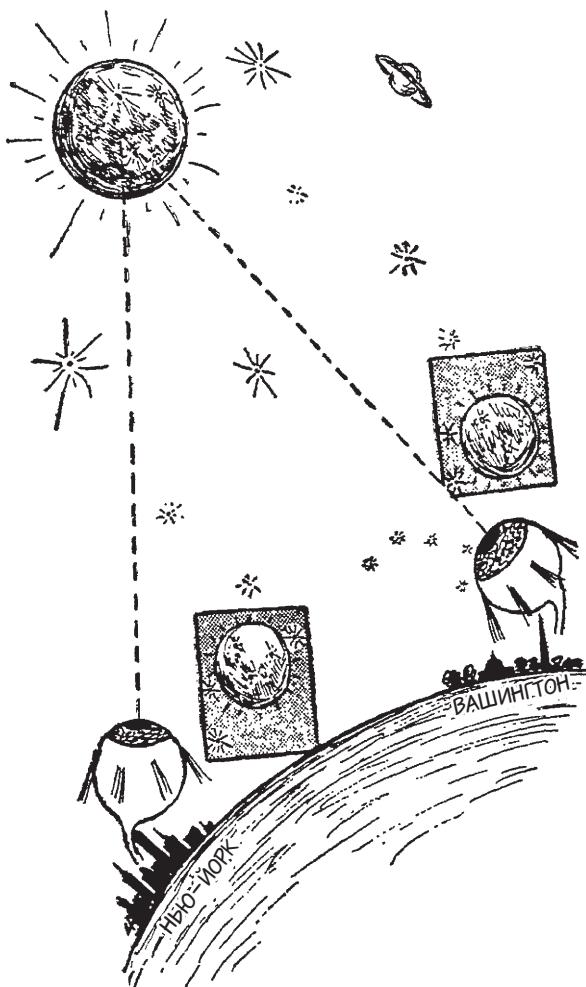


Рис. 109.

Аналогичным образом можно измерить расстояние до Солнца, хотя, так как Солнце намного дальше, измерения значительно сложнее. Астрономы нашли, что это расстояние составляет 149 450 000 км (92 870 000 миль), или 385 расстояний до Луны. Лишь из-за этого огромного расстояния Солнце и выглядит примерно такого же размера, как Луна; на самом деле оно намного больше, его диаметр в 109 раз превышает диаметр Земли.

Если бы Солнце было большой тыквой, то Земля была бы горошиной, Луна — маковым зернышком, а Эмпайр Стейт Билдинг в Нью-Йорке — размером с мельчайшую из всех бактерий, которую мы только можем увидеть через микроскоп. Здесь стоит вспомнить, что во времена Древней Греции прогрессивного философа по имени Анаксагор наказали изгнанием и угрожали смертью за то, что он учил, что Солнце — огненный шар, столь же большой, возможно, как Греция!

Аналогичным образом астрономы могут оценить расстояние до любой из планет нашей системы. Самая дальняя из них, открытая совсем недавно и названная Плутон¹, приблизительно в сорок раз дальше от Солнца, чем Земля; если быть точным, то это расстояние равно 3 668 000 000 миль.

2. ГАЛАКТИКА ЗВЕЗД

Наш следующий прыжок в пространстве — от планет к звездам, и здесь мы снова можем использовать метод параллакса. Мы находим, однако, что даже ближайшие звезды находятся столь далеко, что в самых удаленных друг от друга точках наблюдения, какие только доступны на Земле (в противоположных сторонах земного шара), они не демонстрируют какого-либо заметного параллактического сдвига относительно общего звездного фона. Но у нас все же есть способ измерить эти колоссальные расстояния.

Если мы используем размеры Земли, чтобы определить величину орбиты Земли, по которой она вращается вокруг Солнца, почему мы не используем эту орбиту, чтобы получить расстояния до звезд? Иными словами, невозможно заметить относительные смещения, по крайней мере, некоторых звезд, наблюдая их с противоположных концов земной орбиты. Это, конечно же, означает, что нам придется подождать, пока пройдет полгода между первым и вторым наблюдениями, — но почему бы и нет?

С этой мыслью на уме немецкий астроном Бессель в 1838 году начал сравнение относительного положения звезд, которые он наблюдал ночами, разделенными полугодием. Сначала ему не везло: звезды, которые он выбирал, были, очевидно, слишком

¹ Был открыт в 1930 году. До 2006 года назывался «планетой» Солнечной системы, затем его признали «карликовой планетой». До сих пор ведутся споры о статусе Плутона, так как он не отвечает признакам планеты. — Примеч. ред.

далеко, чтобы демонстрировать любое заметное параллактическое смещение, даже основываясь на диаметре орбиты Земли. Как вдруг — звезда, включенная в астрономические каталоги как 61 Лебедя (61-я слабая звезда в созвездии Лебедя), сдвинулась, казалось, немного в сторону по сравнению с ее положением полгода назад (рис. 110).

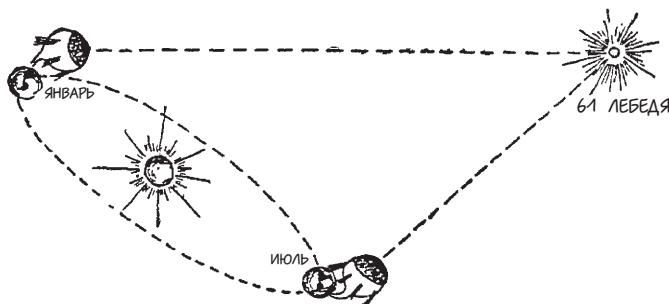


Рис. 110.

Прошло еще полгода, и звезда снова вернулась на прежнее место. Все-таки параллактический эффект был, и Бессель стал первым человеком, который вошел с линейкой в межзвездное пространство за пределами нашей планетной системы.

Наблюдаемое ежегодное смещение 61 Лебедя было на самом деле очень маленьким — лишь 0,6 угловых секунд*, то есть угол, под которым вы бы увидели человека на расстоянии 500 миль от себя, если бы вообще могли видеть настолько далеко! Но астрономические инструменты очень точны, и даже такие углы можно измерить с высокой степенью точности. Взяв наблюдаемый параллакс и известный диаметр орбиты Земли, Бессель вычислил, что его звезда находилась на расстоянии в 103 000 000 000 000 км, то есть в 690 000 раз дальше Солнца! Значительность этой цифры довольно трудно осознать. В нашем примере, в котором Солнце — тыква, а Земля — горошина, которая вращается вокруг тыквы на расстоянии 200 футов, расстояние до этой звезды соответствовало бы 30 000 милям!

В астрономии принято говорить об очень больших расстояниях, используя время, за которое их может покрыть свет, распространяющийся с огромной скоростью 300 000 км в секунду. У света за-

* Точнее $0,600'' \pm 0,006''$.

няло бы всего $\frac{1}{7}$ секунды, чтобы обежать вокруг Земли, чуть больше 1 секунды, чтобы добраться до нас от Луны и около 8 минут от Солнца. От звезды 61 Лебедя, которая является одной из наших ближайших космических соседок, свет путешествует до Земли около 11 лет. Если какая-нибудь космическая катастрофа погасила свет, идущий от 61 Лебедя, или (что часто случается со звездами) она взорвалась, нам придется подождать 11 долгих лет, пока вспышка от взрыва и ее последний меркнущий луч, промчавшись через межзвездное пространство, не принесут на Землю самые свежие космические новости о том, что звезда прекратила свое существование.

По измеренному расстоянию, отделяющему нас от 61 Лебедя, Бессель вычислил, что эта звезда, кажущаяся нам крошечной светящейся точкой, тихо мерцающей на темном фоне ночного неба, на самом деле гигантское сияющее тело, которое только на 30 процентов меньше и чуть менее яркое, чем наше собственное великолепное Солнце. Это было первое прямое доказательство революционной идеи, которую первым высказал Коперник, — что наше Солнце является лишь одной из множества звезд, рассыпанных на огромных расстояниях по всему бесконечному пространству.

С момента открытия, сделанного Бесселем, было измерено множество звездных параллаксов. Несколько звезд оказались ближе к нам, чем 61 Лебедя, ближайшая из них — Альфа Центавра (самая яркая звезда в созвездии Центавра), которая находится всего в 4,3 световых года от нас. По своим размерам и светимости она очень похожа на наше Солнце. Большинство звезд намного дальше, настолько, что даже диаметр орбиты Земли становится слишком мал, чтобы использовать его в качестве основы для измерения расстояний.

Оказалось также, что звезды сильно отличаются размерами и светимостями: от сияющих гигантов, таких как Бетельгейзе (300 световых лет от нас), которая примерно в 400 раз больше и в 3600 раз ярче нашего Солнца, до столь тусклых карликов, как так называемая звезда ван Маанена (13 световых лет от нас), которая меньше нашей Земли (ее диаметр составляет 75 процентов от диаметра Земли) и приблизительно в 10 000 раз тусклее Солнца.

Теперь мы подошли к важной проблеме подсчета всех существующих звезд. Есть распространенное мнение, под которым вы, вероятно, тоже подписались бы, — что никто не может сосчитать

звезды на небе. Однако, как и многие другие распространенные представления, это — совершенно неверное, по крайней мере, что касается звезд, видимых невооруженным глазом. Собственно, общее количество звезд, которые замечены в обоих полушариях, — всего лишь между 6000 и 7000, и, так как только половина из них находится над горизонтом в любое взятое время, и так как видимость звезд, близких к горизонту, значительно снижена из-за атмосферного поглощения, количество звезд, которые обычно видны невооруженным глазом в ясную безлунную ночь, — лишь около 2000. Следовательно, усердно считая со скоростью, скажем, 1 звезда в секунду, вы сосчитали бы их все примерно за $1\frac{1}{2}$ ч!

Если, однако, вы используете полевой бинокль, то сможете увидеть дополнительно около 50 000 звезд, а $2\frac{1}{2}$ дюймовый телескоп откроет еще около 1 000 000. Использовав знаменитый 100-дюймовый телескоп Маунт-Уилсонской обсерватории в Калифорнии, вы бы увидели около полутора миллиарда звезд. Считая их от заката до рассвета каждый день со скоростью 1 звезда в секунду, астрономам пришлось бы потратить около века, чтобы сосчитать их все!

Но, конечно же, никто никогда не пытался сосчитать все звезды, которые видны через большие телескопы, считая их одну за другой. Общее количество вычисляется путем подсчета фактических звезд, видимых в ряде областей на разных участках неба, с применением среднего к общей площади.

Более века назад известный британский астроном Уильям Гершель, наблюдая звездное небо через свой большой самодельный телескоп, был поражен тем, что внутри пересекающего ночное небо слабо светящегося пояса, известного как Млечный Путь, стали просматриваться звезды, большинство из которых обычно не видны невооруженным глазом. И именно ему наука астрономии обязана признанием того факта, что Млечный Путь не является обычной туманностью или просто поясом газовых облаков, простирающихся в космосе, а образуется на самом деле множеством звезд, которые настолько далеко и поэтому настолько тусклы, что наш глаз не может различить их по отдельности.

Используя все более и более сильные телескопы, мы смогли увидеть все большее и большее количество отдельных звезд Млечного Пути, но основная их масса по-прежнему остается в размытом фоне. Однако было бы ошибочно думать, что в области Млечного Пути звезды распределены более густо, чем на любом другом участке неба. Собственно, думать, что в данном пространстве

количество звезд больше, чем где-либо еще на небе, нас заставляет большая глубина звездного распределения в этом направлении, а не большая их густота. В направлении Млечного Пути звезды простираются настолько далеко, насколько может видеть глаз, усиленный телескопом, тогда как в любом другом направлении распределение звезд не достигает даже конца области видимости, а позади звезд мы наталкиваемся там на почти пустое пространство.

Глядя в направлении Млечного Пути, мы как будто смотрим вглубь леса, где ветви многочисленных деревьев перекрывают друг друга, образуя сплошной фон, а в других направлениях мы видим между звездами клочки пустого пространства, как мы видим клочки голубого неба в кроне над головой.

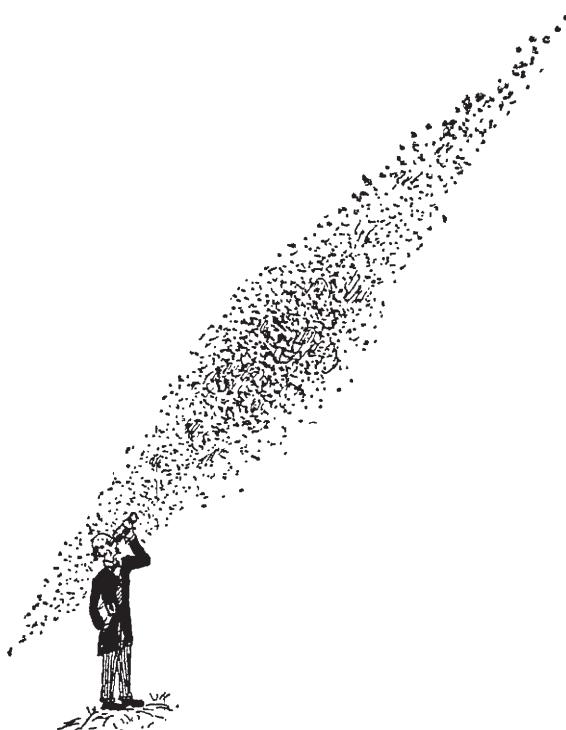


Рис. 111. Астроном смотрит на звездную систему Млечного Пути, уменьшенную в 100 000 000 000 000 000 раз. Голова астронома находится примерно в том месте, которое занимает наше Солнце.

Таким образом, звездная Вселенная, к которой принадлежит наше Солнце в качестве одного из незначительных членов, занимает в космосе уплощенную область, простирающуюся на большие расстояния в плоскости Млечного Пути, будучи сравнительно тонкой в направлении, перпендикулярном к ней.

Более детальное исследование, проведенное поколениями и поколениями астрономов, привело к выводу о том, что наша звездная система включает около 40 000 000 000 отдельных звезд, распределенных в линзообразной области размером примерно 100 000 световых лет в диаметре и от 5000 до 10 000 световых лет в поперечнике. И один из результатов этого исследования — как пощечина человеческой гордости — осознание того, что наше Солнце находится отнюдь не в центре этого гигантского звездного сообщества, а довольно близко к его наружному краю.

На рис. 111 мы пытаемся передать нашим читателям, как в действительности выглядит гигантский улей звезд. Кстати, мы еще не упоминали, что научным языком система Млечного Пути называется *Галактика* (на латыни конечно!). Размер Галактики уменьшен на коэффициент сто миллиардов миллиардов, хотя количество точек, которые представляют отдельные звезды, значительно меньше сорока миллиардов по, как говорится, типографским причинам.

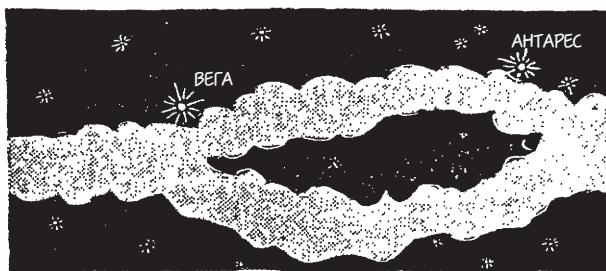


Рис. 112. Если мы посмотрим в направлении галактического центра, то сначала может показаться, что мифическая небесная дорога разветвляется на две полосы с односторонним движением.

Одно из самых характерных свойств гигантского роя звезд, образующих галактическую систему, состоит в том, что он находится в состоянии быстрого вращения, подобного тому, которое происходит в нашей Солнечной системе. Точно так же, как Вене-

ра, Земля, Юпитер и другие планеты вращаются по почти круговым орбитам вокруг Солнца, миллиарды звезд, образующих систему Млечного Пути, движутся вокруг того, что известно как галактический центр. Этот центр галактического вращения находится в направлении созвездия Стрельца, и, если вы пробежитесь глазами по напоминающему туман Млечному Пути, вы заметите, что при приближении к этому созвездию он становится гораздо шире, указывая на то, что вы смотрите на центральную, более толстую часть линзообразного скопления звезд. (Наш астроном на рис. 111 смотрит именно в этом направлении.)

Как выглядит центр Галактики? Мы этого не знаем, так как, к сожалению, он скрыт от наших глаз тяжелыми облаками темного межзвездного вещества, висящего в космосе. Собственно, глядя на широкую часть Млечного Пути в районе Стрельца*, сначала вы бы подумали, что мифическая небесная дорога разветвляется здесь на две «полосы с односторонним движением». Но это ненастоящее разветвление, создается просто такое впечатление — из-за темного облака межзвездной пыли и газов, висящего в космосе между нами и галактическим центром, прямо напротив середины расширения. Таким образом, в то время как темнота по обе стороны от Млечного Пути обусловлена пустым темным пространством, чернота в середине образована темным непрозрачным облаком. Несколько звезд в центральном темном участке находятся на самом деле на переднем плане, между нами и облаком. (Рис. 112.)

Жаль, конечно, что мы не можем увидеть таинственный галактический центр, вокруг которого, вместе с миллиардами других звезд, вращается наше Солнце. Но мы знаем, в некотором смысле, как он должен выглядеть, — из наблюдений за другими звездными системами, или галактиками, разбросанными в космосе далеко за самыми дальними пределами нашего Млечного Пути. Нет, это не какая-нибудь сверхгигантская звезда, держащая в подчинении всех других членов звездной системы, как Солнце, которое правит семейством планет. Исследование центральных частей других галактик (которые мы обсудим чуть позже) указывает на то, что они тоже состоят из большого количества звезд, с той лишь разницей, что здесь звезды толпятся, а на окраинах, к которым принадлежит наше Солнце, их плотность гораздо меньше. Если мы представим планетную систему как самодержавное государство, в котором

* Это можно хорошо наблюдать ясной ночью в начале весны.

Солнце управляет планетами, Галактику звезд можно уподобить некой демократии, в которой одни члены занимают влиятельные центральные места, в то время как другие должны довольствоваться более скромными позициями на периферии общества.

Как было сказано выше, все звезды, включая наше Солнце, вращаются по гигантским кругам вокруг центра галактической системы. Как это можно доказать, насколько велики радиусы этих звездных орбит и сколько времени занимает полное обращение?

На все эти вопросы несколько десятилетий назад ответил голландский астроном Оорт, который применил к системе звезд, известной как Млечный Путь, методы наблюдения, очень похожие на те, какие использовал Коперник, рассматривая планетную систему.

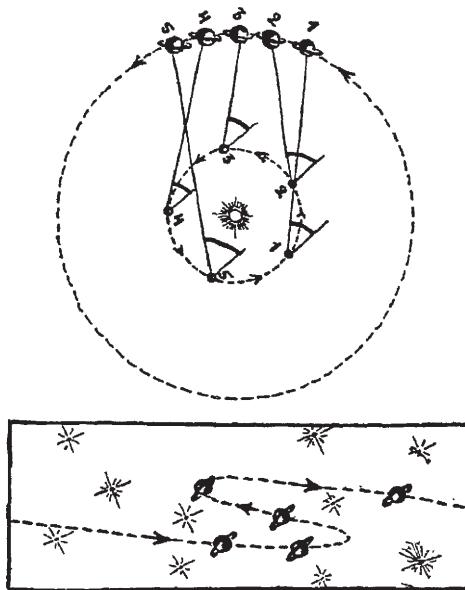


Рис. 113.

Давайте вспомним первый аргумент Коперника. Древние — вавилоняне, египтяне и другие — наблюдали, что большие планеты, такие как Сатурн или Юпитер, двигались по небу, как им представлялось, довольно своеобразным способом. Они, казалось, перемещались по эллипсу, как это делает Солнце, затем

внезапно останавливались, отходили назад и, снова изменив направление движения на противоположное, продолжали свой путь в первоначальном направлении. В нижней части рис. 113 мы схематично показываем описанный выше тип движения, на него у Сатурна уходит приблизительно два года. (Период полного обращения Сатурна — $29\frac{1}{2}$ лет.) Поскольку из-за религиозных предрассудков, которые предписывали утверждать, что наша Земля является центром Вселенной, считалось, что все планеты и само Солнце движутся вокруг Земли, описанные выше особенности следовало объяснять предположением, что планетарные орбиты имеют весьма своеобразную форму — с некоторым количеством петель в них.

Но Коперник в порыве гениального озарения объяснил загадочный феномен петлеобразования вращением Земли, и всех других планет, вокруг Солнца. Объяснение эффекта петли можно легко понять после изучения схемы в верхней части рис. 113.

Солнце расположено в центре, Земля (маленькая сфера) движется по меньшему кругу, а Сатурн (с кольцом) движется по большему кругу в том же направлении, что и Земля. Цифры 1, 2, 3, 4, 5 представляют разные положения Земли в течение года и соответствующие положения Сатурна, который, как мы помним, движется гораздо медленнее. Короткие отрезки вертикальных линий, идущие от Земли из разных ее положений, представляют направление к некой неподвижной звезде. Проведя линии от Земли из разных ее положений к соответствующим положениям Сатурна, мы видим, что угол, образованный двумя направлениями (к Сатурну и к неподвижной звезде) сначала увеличивается, затем уменьшается, а затем снова увеличивается. Следовательно, кажущийся феномен петлеобразования не представляет движение собственно Сатурна, а является следствием того, что мы наблюдаем это движение под разными углами, находясь на Земле, которая и сама движется.

Аргумент Оорта касательно вращения Галактики становится понятным, если изучить рис. 114. Здесь в нижней части иллюстрации мы видим галактический центр (с темными облаками и всем прочим!), а вокруг него, по всему полю рисунка, множество звезд. Три круга представляют орбиты звезд, находящихся на разных расстояниях от центра, средний круг — орбита нашего Солнца.

Давайте рассмотрим, глядя на рисунок, восемь звезд (изображены с лучиками, чтобы отличать их от других точек), две из ко-

торых движутся по той же орбите, что и Солнце, но одна чуть впереди, а другая немного позади него, остальные расположены на несколько большей и несколько меньшей орбитах. Мы должны помнить, что из-за законов гравитации (см. главу V) внешние звезды имеют более низкую, а внутренние — более высокую скорость, чем звезды на солнечной орбите (на рисунке они обозначены стрелками разной длины).

Как будет выглядеть движение этих восьми звезд, если наблюдать за ними с Солнца или, что, конечно же, то же самое, с Земли? Мы говорим здесь о движении вдоль линии визирования, которое наиболее удобно наблюдать посредством так называемого эффекта Доплера*. Прежде всего ясно, что две звезды (отмечены как *D* и *E*), которые движутся по одной и той же орбите и с одной и той же скоростью, что и Солнце, будут казаться неподвижными солнечному (или земному) наблюдателю. То же самое верно и для двух других звезд (*B* и *G*), расположенных вдоль по радиусу: поскольку они движутся параллельно Солнцу, никакого компонента скорости, направленной по линии визирования, нет.

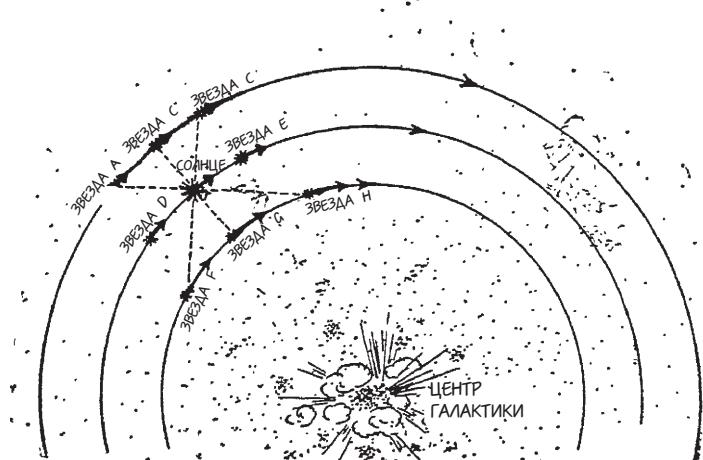


Рис. 114.

* См. обсуждение эффекта Доплера на с. 472.

А что насчет звезд *A* и *C* на внешнем круге? Поскольку они обе движутся медленнее, чем Солнце, мы должны заключить, и это ясно видно на рисунке, что звезда *A* отстает, тогда как звезду *C* Солнцу приходится догонять.

Расстояние до звезды *A* будет увеличиваться, в то время как расстояние до *C* — уменьшаться, а свет, идущий от двух звезд, должен показать, соответственно, красное и фиолетовое смещение Доплера. Для звезд *F* и *H* на внутреннем круге ситуация обратная — фиолетовое смещение Доплера у *F* и красное у *H*.

Предполагается, что описанный феномен вызывается лишь круговым движением звезд, а существование этого кругового движения позволяет нам не только доказать это предположение, но также оценить радиус звездных орбит и скорость движения звезд. Собрав материал, путем наблюдения видимого движения звезд по всему небу, Оорт смог доказать, что предполагаемый феномен красного и фиолетового смещения Доплера действительно существует, и тем самым доказал, не оставив никаких сомнений, вращение Галактики.

Аналогичным образом можно продемонстрировать, что галактическое вращение будет влиять на скорости видимых звезд, расположенных перпендикулярно линии визирования. Хотя этот компонент скорости представляет гораздо большие трудности для точного измерения (поскольку даже очень большие линейные скорости далеких звезд соответствуют чрезвычайно малым угловым смещениям на небесной сфере), Оорт и другие наблюдали тот же эффект.

Теперь точные измерения эффекта Оорта в звездном движении позволяют нам измерять орбиты звезд и определять период их обращения. С помощью этого метода вычислений выяснили, что радиус солнечной орбиты, имеющий центр в Стрельце, составляет 30 000 световых лет, то есть около двух третей радиуса самой удаленной орбиты всей галактической системы. Время, необходимое Солнцу, чтобы сделать полный оборот вокруг галактического центра, — около 200 миллионов лет. Это долго, конечно, но, памятуя, что нашей звездной системе около 5 миллиардов лет, мы находим, что в течение всей своей жизни наше Солнце и его семейство планет совершило около 20 полных обращений. Если, следуя терминологии земного года, мы называем период солнечного обращения «солнечный год», можно сказать, что нашей

Вселенной всего 20 лет. В мире звезд, где все происходит исключительно медленно, солнечный год — довольно удобная единица измерения времени в истории Вселенной!

3. ДВИГАЯСЬ К ГРАНИЦАМ НЕИЗВЕСТНОГО

Как уже упоминалось выше, наша Галактика не единственное изолированное сообщество звезд, плывущее в грандиозном пространстве Вселенной. Телескопические исследования обнаруживают существование далеко в космосе многих других гигантских групп звезд, очень похожих на ту, к которой принадлежит наше Солнце. Ближайшая из них, знаменитая туманность Андромеды, видна даже невооруженным глазом. Она кажется нам маленькой, тусклой, довольно вытянутой туманностью. На фотографиях VII_A и V (см. «Вклейку»), сделанных с помощью большого телескопа в обсерватории Маунт-Уилсон, запечатлены два таких небесных объекта. Эти два объекта — туманность в Волосах Вероники (вид сбоку) и туманность в Большой Медведице (вид сверху). Бросается в глаза, что эти туманности обладают, кроме характерной формы линзы, приписываемой нашей Галактике, типичной спиральной структурой — отсюда и название «спиральные туманности». Многое указывает на то, что структура нашей собственной звездной системы представляет собой точно такую же спираль, но очень трудно определить форму структуры, когда вы находитесь внутри нее. Собственно, наше Солнце, скорее всего, находится, в самом конце одного из спиральных рукавов «великой туманности Млечного Пути».

Долгое время астрономы не осознавали, что спиральные туманности — это гигантские звездные системы, похожие на наш Млечный Путь, и путали их с обычными диффузными туманностями, подобными той, что находится в созвездии Ориона, которые представляют собой большие облака пыли, плывущие между звездами внутри нашей Галактики. Позже, однако, выяснилось, что эти туманные спиралевидные объекты не туман вообще, они состоят из отдельных звезд, которые, если даже использовать самое большое увеличение, видны как крошечные точки. Но они находятся так далеко, что никакие параллактические измерения не могут определить фактические расстояния до них.

Таким образом, на первый взгляд может показаться, что средства измерения астрономических расстояний у нас закончились.

Но нет! Когда наука сталкивается с непреодолимой трудностью, задержка обычно лишь времenna: всегда происходит нечто, что позволяет идти дальше. В этом случае совершенно новую «измерительную рейку» нашел гарвардский астроном Харлоу Шепли — в виде так называемых пульсирующих звезд, или цефеид*.

Есть множество звезд. Хотя большинство из них светят ровно, на небе есть и такие, которые с регулярной периодичностью меняют свою светимость от яркой до тусклой и от тусклой до яркой. Гигантские тела этих звезд пульсируют так же исправно, как бьется сердце, и вместе с этой пульсацией происходит и периодическое изменение их яркости**. Чем больше звезда, тем дольше период ее пульсации, так же как длинному маятнику, чтобы завершить свое движение, требуется больше времени, чем короткому. Очень маленькие звезды (в смысле, маленькие для звезд) завершают свой период в течение нескольких часов, в то время как у настоящих гигантов на одну пульсацию уходят годы и годы. Далее, поскольку большие звезды являются также и более яркими, существует очевидная взаимосвязь между периодом звездной пульсации и средней яркостью звезды. Эту связь можно установить путем наблюдения за цефеидами, которые находятся достаточно близко к нам, поэтому и расстояние до них и, следовательно, фактическую яркость можно измерить напрямую.

Если сейчас вы найдете пульсирующую звезду, которая лежит за пределами параллактических измерений, все, что вам нужно сделать, — это наблюдать за этой звездой в телескоп и засечь время, которое у нее уйдет на период пульсации. Зная период, вы узнаете фактическую яркость звезды и, сравнивая это значение с ее видимой яркостью, сразу сможете сказать, как далеко она находится. Этот остроумный метод и использовал Шепли для измерения, в частности, больших расстояний в пределах Млечного Пути; метод также оказался самым полезным в оценке общих размеров нашей звездной системы.

Когда Шепли применил тот же метод для измерения расстояния до нескольких пульсирующих звезд, найденных в гигантском теле туманности Андромеды, он пришел в большое удивление.

* Названы так в честь звезды β -Цефея, у которой феномен пульсации был обнаружен впервые.

** Не следует путать эти пульсирующие звезды с так называемыми затменно-ми переменными, которые на самом деле представляют собой системы из двух звезд, вращающихся одна вокруг другой, периодически затмевая друг друга.

Расстояние от Земли до этих звезд, которому, безусловно, следовало быть таким же, как расстояние до самой туманности Андромеды, оказалось 1 700 000 световых лет, что намного больше, чем рассчитанный диаметр звездной системы Млечного Пути. Размер же туманности Андромеды получился лишь чуть меньше, чем размер всей нашей Галактики. Две спиральные туманности, показанные на фотографиях «Вклейки», находятся еще дальше, а их диаметры сравнимы с диаметром туманности Андромеды.

Это открытие нанесло смертельный удар по более ранним предположениям, что спиральные туманности — это сравнительная «мелочь», расположенная в пределах нашей Галактики, и определило их в качестве независимых галактик звезд, очень похожих на нашу собственную систему Млечный Путь. Ни один астроном не усомнится теперь, что для наблюдателя, находящегося на некой маленькой планете, вращающейся вокруг одной из миллиардов звезд, которые образуют великую туманность Андромеды, наш Млечный Путь будет выглядеть весьма близко к тому, как туманность Андромеды выглядит для нас.

Дальнейшее изучение этих далеких звездных сообществ, за которое мы обязаны, главным образом, доктору Э. Хабблу, выдающемуся наблюдателю галактик из обсерватории Маунт-Уилсон, открывает множество фактов, представляющих большой интерес и важность. В первую очередь выяснилось, что не все галактики — а они оказываются даже более многочисленными, если смотреть в хороший телескоп, чем отдельные звезды, если смотреть невооруженным глазом — имеют непременно спиральную форму, напротив, они демонстрируют большое разнообразие типов. Существуют *сферические галактики*, которые выглядят как обычные диски с размытыми границами, и существуют *эллиптические галактики* с разной степенью вытянутости. Собственно спиральные отличаются друг от друга тем, «насколько туго они закручены». Есть также галактики весьма своеобразной формы известные как «веретенообразные спирали».



Рис. 115. Различные стадии обычной эволюции галактики.

Крайне важно, что все разновидности наблюдаемых галактических форм можно расположить в регулярной последовательности (рис. 115), которая предположительно соответствует различным этапам эволюции этих гигантских звездных сообществ.

Хотя мы все еще далеки от понимания деталей галактической эволюции, кажется весьма вероятным, что она связана с процессом прогрессивного сжатия. Хорошо известно, что, когда медленно вращающееся сферическое тело газа подвергается постоянному сжатию, скорость его вращения увеличивается и оно принимает форму сплюснутого эллипсоида. На определенном этапе сжатия, когда отношение полярного радиуса к экваториальному становится равным $\frac{7}{10}$, вращающееся тело принимает, по-видимому, линзообразную форму и обретает четкую границу по своему экватору. Дальнейшее сжатие сохраняет эту линзообразную форму неизменной, но газы, образующие вращающееся тело, начинают истекать в окружающее пространство по всей длине экваториальной границы, что приводит к образованию тонкой газообразной пелены в экваториальной плоскости.

Все приведенные выше утверждения, касающиеся вращающейся газовой сферы, доказал математически выдающийся английский физик и астроном сэр Джеймс Джинс, но их также можно применить, без каких-либо изменений, к гигантским звездным облакам, которые мы называем галактиками. Собственно, мы можем рассматривать такие кластеры миллиардов звезд как скопления газа, в котором роль молекул играют отдельные звезды.

Сравнивая теоретические расчеты Джинса с эмпирической классификацией галактик Хаббла, мы находим, что эти гигантские звездные сообщества точно следуют курсу эволюции, описанному теорией. В частности, мы находим, что наиболее вытянутая форма эллиптических туманностей соответствует отношению радиусов $\frac{7}{10}$ (E7) и что это первый случай, когда мы замечаем четкую экваториальную границу. Спирали, которые развиваются на более поздних стадиях эволюции, образуются, по-видимому, из вещества, выброшенного быстрым вращением, хотя до настоящего времени у нас нет вполне удовлетворительного объяснения, почему и как эти спирали образовались и что вызывает разницу между простыми и веретенообразными спиральями.

Из дальнейшего изучения структуры, движения и звездного содержания в разных частях галактических сообществ звезд еще предстоит узнать многое. Очень интересный результат был, на-

пример, получен астрономом из обсерватории Маунт-Уилсон Бааде, который смог показать, что, в то время как центральные тела (ядра) спиральных туманностей образованы однотипными звездами как в сферических, так и в эллиптических галактиках, сами рукава демонстрируют иной тип звездного населения. «Сpirальнорукавный» тип звездного населения отличается от населения центральной области наличием очень горячих и ярких звезд, так называемых голубых гигантов, которые отсутствуют в центральных областях как в сферических, так и в эллиптических галактиках. Поскольку, как мы увидим позже (глава XI), голубые гиганты, наиболее вероятно, представляют собой недавно образовавшиеся звезды, разумно предположить, что спиральные рукава являются, так сказать, питательной средой для новых звездных населений. Можно допустить, что большая часть вещества, выброшенного из экваториального утолщения сжимающейся эллиптической галактики, образуется первобытными газами, которые выходят в холодное межгалактическое пространство и конденсируются в отдельные большие массы материи, которые при последующем сжатии становятся очень горячими и очень яркими.

Мы снова вернемся к проблемам рождения и жизни звезд в главе XI, а сейчас мы должны рассмотреть, в общих чертах, расположение отдельных галактик в безбрежном пространстве Вселенной.

Прежде всего мы должны сказать, что метод измерения расстояний, основанный на пульсирующих звездах, хотя и дает превосходные результаты, когда применяется к целому ряду галактик, которые лежат по соседству с нашим Млечным Путем, не срабатывает, когда мы углубляемся в космос, так как мы быстро достигаем расстояний, на которых, даже глядя в самые сильные телескопы, нельзя различить ни одной отдельной звезды, а галактики выглядят как крошечные вытянутые туманности. За этими пределами мы можем полагаться только на видимый размер, так как достаточно точно установлено, что, в отличие от звезд, все галактики данного типа примерно одинакового размера. Если вы знаете, что все люди одинакового роста и не существует гигантов или гномов, вы всегда можете определить, как далеко от вас находится человек, посмотрев на его размеры.

Используя этот метод оценки расстояний в широко раскинувшемся царстве галактик, доктор Хаббл смог доказать, что, настолько, насколько глаз (усиленный самым мощным телескопом)

может видеть, галактики распределены в космосе более или менее равномерно. Мы говорим «более или менее», потому что есть много случаев, когда галактики собираются в большие группы, содержащие иногда многие тысячи членов, подобно тому, как отдельные звезды собираются в галактики.

Наша собственная Галактика, Млечный Путь, является, по-видимому, одним из членов сравнительно небольшой группы галактик, насчитывающей в своем составе три спиральные (включая нашу и туманность Андромеды), шесть эллиптических и четыре неправильных туманности (две из которых Магеллановы облака).

Однако, за исключением случаев подобных кластеров, галактики, если смотреть в 200-дюймовый телескоп Паломарской обсерватории, вплоть до расстояния в один миллиард световых лет, рассредоточены в космосе довольно равномерно. Среднее расстояние между двумя соседними галактиками — около 5 000 000 световых лет, а видимые горизонты Вселенной содержат около нескольких миллиардов отдельных звездных миров!

В нашем сравнении, в котором Эмпайр Стейт Билдинг символизировала бактерия, Землю — горошина, а Солнце — тыква, галактики можно представить гигантскими роями многих миллиардов тыкв, распределенных примерно в пределах орбиты Юпитера, с отдельными скоплениями тыкв внутри сферического объема с радиусом лишь немного меньшим, чем расстояние до ближайшей звезды. О да, очень сложно найти правильный масштаб для космических расстояний, поэтому, даже когда мы представляем Землю горошиной, размер известной Вселенной доходит до астрономических чисел! На рис. 116 мы пытаемся дать вам представление, как астрономы, шаг за шагом, продвигались в своем исследовании космических расстояний. От Земли до Луны, затем до Солнца, потом до звезд, далее к далеким галактикам — и к границам неизвестного.

Теперь мы готовы ответить на фундаментальный вопрос о размере нашей Вселенной. *Должны ли мы рассматривать Вселенную как простирающуюся до бесконечности и заключить, что большие и лучшие телескопы всегда будут открывать для пытливых глаз астрономов новые и ранее не исследованные области космоса. Или, напротив, должны верить, что Вселенная занимает некий очень большой, но тем не менее конечный объем, который можно, по крайней мере в принципе, исследовать до последней звезды?*

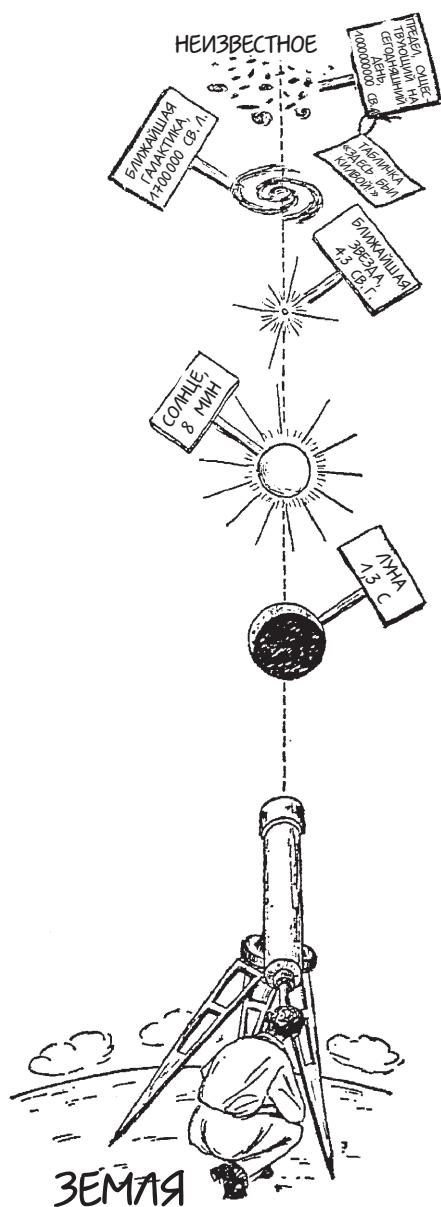


Рис. 116. Вехи изучения космоса, расстояния выражены в световых годах.

Когда мы говорим о вероятности того, что наша Вселенная «конечного размера», мы, безусловно, не имеем в виду, что где-то на расстоянии в несколько миллиардов световых лет исследователь космоса упрется в глухую стену, на которой висит табличка «Вход воспрещен».

Собственно, в главе III мы видели, что *пространство может быть конечным, не имея при этом границ*. Оно может просто изгибаться по кругу и в итоге «замкнуться само на себя», поэтому гипотетический исследователь космоса, пытаясь направить свой космический корабль как можно более прямо, опишет в космосе геодезическую линию и вернется туда же, откуда начал.

Ситуация, безусловно, очень походила бы на ту, в которой древнегреческий исследователь, двигавшийся на запад от своего родного города Афины, после долгого путешествия обнаружил бы, что входит в восточные ворота Афин.

И точно так же как кривизну поверхности Земли можно установить, не отправляясь в путешествие вокруг света, а просто изучив геометрию сравнительно небольшой ее части, на вопрос об искривлении трехмерного пространства Вселенной можно ответить с помощью аналогичных измерений, сделанных в диапазоне, доступном нашим телескопам. Мы видели в главе V, что необходимо различать два вида искривления: положительное, соответствующее замкнутому пространству конечного объема, и отрицательное, соответствующее седлообразному открытому бесконечному пространству (см. рис. 42). Разница между этими двумя типами пространства заключается в том, что, в то время как в *замкнутом пространстве* количество равномерно распределенных на данном расстоянии от наблюдателя объектов увеличивается медленнее, чем куб этого расстояния, для *открытого пространства* верно обратное.

В нашей Вселенной роль «равномерно распределенных объектов» играют отдельные галактики, поэтому все, что мы должны сделать, чтобы решить задачу о вселенской кривизне, — это сосчитать количество отдельных галактик, расположенных на разных расстояниях от нас.

Доктор Хаббл сделал такой подсчет в реальности и обнаружил, что *количество галактик увеличивается, как кажется, несколько медленнее, чем куб расстояния, тем самым указывая на положительную кривизну и конечность пространства*. Нужно заметить, однако, что эффект, который наблюдал Хаббл, был очень мал и становил-

ся заметным только вблизи самого предела расстояния, на которое можно видеть через 100-дюймовый Маунт-Уилсоновский телескоп, а последние наблюдения через новый 200-дюймовый Паломарский телескоп-рефлектор не пролили пока больше света на эту важную проблему.

Еще один момент, который вносит неопределенность в ответ о конечности Вселенной, заключается в том, что расстояния до далеких галактик вынужденно оцениваются исключительно на основе их видимой светимости (закон обратных квадратов). Этот метод, который предполагает, что все галактики обладают одним и тем же средним значением светимости, может, однако, привести к ошибочным результатам, если окажется, что со временем светимость отдельных галактик меняется, тем самым указывая на то, что светимость зависит от возраста. Собственно, следует помнить, что самые отдаленные галактики, наблюдаемые через Паломарский телескоп, находятся на расстоянии одного миллиарда световых лет, и поэтому мы видим их в том состоянии, в котором они были миллиард лет назад. Если галактики, старея, становятся более тусклыми (возможно, вследствие уменьшения числа активных звездных тел по мере угасания отдельных членов), выводы, сделанные Хабблом, придется скорректировать.

На самом деле изменение галактической светимости лишь на небольшой процент в течение одного миллиарда лет (это только около одной седьмой от их полного возраста) изменило бы нынешний вывод, что Вселенная конечна, на прямо противоположный.

Итак, мы видим, что предстоит еще сделать довольно много работы, прежде чем мы сможем точно сказать, является ли наша Вселенная конечной или бесконечной.

Глава XI

Дни творения

1. РОЖДЕНИЕ ПЛАНЕТ

Для нас, людей, живущих в семи частях света (считая адмирала Бёрда в Антарктике) выражение «твердая почва» является практически синонимом идеи стабильности и постоянства. И нам может казаться, что все хорошо знакомые черты поверхности Земли, ее материки и океаны, ее горы и реки существовали от начала времен. Правда, данные исторической геологии указывают на то, что облик Земли постепенно меняется и большие площади континентов могут погрузиться в воды океанов, тогда как подводные пространства — выйти на поверхность.

Мы также знаем, что старые горы постепенно размываются дождями и что новые горные хребты время от времени поднимаются в результате тектонической активности, но все эти изменения — всего лишь изменения твердой коры нашего земного шара.

Нетрудно увидеть, однако, что было время, когда никакой твердой коры вообще не существовало, а наша Земля была раскаленным шаром расплавленных камней. Собственно, изучение недр Земли указывает на то, что большая часть ее тела все еще находится в расплавленном состоянии и что «твердая почва», о которой мы говорим, не задумываясь, на самом деле только сравнительно тонкий слой на поверхности расплавленной магмы.

Самый простой способ прийти к этому заключению — помнить, что температура, измеренная на разных глубинах под поверхностью Земли, увеличивается со скоростью приблизительно 30 °С на километр (или 16 °F на тысячу футов), так что, например, в самой глубокой шахте в мире (золотой рудник «Робинсон Дип», Южная Африка) стены настолько горячие, что была установлена

система кондиционирования воздуха, чтобы шахтеры не изжарились заживо.

При такой скорости увеличения температура Земли должна достичь точки плавления горных пород (между 1200 °С и 1800 °С) на глубине всего лишь 50 км ниже поверхности, то есть менее 1% от общего расстояния от центра. Все вещество, которое находится ниже, образуя более 97 процентов тела Земли, должно пребывать полностью в расплавленном состоянии.

Ясно, что такая ситуация не могла существовать вечно и что мы все еще наблюдаем определенный этап в процессе постепенного охлаждения, которое началось, когда Земля еще была полностью расплавленным телом, и завершится в отдаленном будущем ее полным, вплоть до самого центра, затвердением. Приблизительная оценка скорости охлаждения и наращивания твердой коры указывает на то, что процесс охлаждения должен был начаться несколько миллиардов лет назад.

Такую же цифру можно получить, оценив возраст горных пород, образующих земную кору. Хотя на первый взгляд горные породы не демонстрируют никаких меняющихся свойств, дав тем самым жизнь выражению «надежен как скала», многие из них на самом деле содержат своего рода природные часы, которые указывают опытному глазу геолога промежуток времени, прошедший с момента их затвердения начиная с полностью расплавленного состояния.

Эти выдающие возраст геологические часы представлены незначительным количеством урана и тория, которые часто встречаются в различных породах, взятых и с поверхности, и на разной глубине внутри Земли. Как мы видели в главе VII, атомы этих элементов подвержены медленному самопроизвольному радиоактивному распаду, завершающемуся образованием стабильного элемента свинец.

Чтобы определить возраст породы, содержащей эти радиоактивные элементы, нам нужно только измерить количество свинца, которое накопилось на протяжении веков в результате радиоактивного распада.

Собственно, пока вещество породы находилось в расплавленном состоянии, продукты радиоактивного распада могли постоянно удаляться с места своего происхождения в процессах диффузии и конвекции, шедших в расплавленном веществе. Но как только вещество затвердевало до каменного состояния, должно

было начаться накопление радиоактивного элемента и свинца, и количество последнего может дать нам точное представление о том, как долго это продолжалось, точно так же как сопоставление количеств пустых пивных банок, разбросанных между пальмами на двух островах Тихого океана, могло бы дать вражескому шпиону представление о том, как долго гарнизон морских пехотинцев оставался на каждом острове.

Недавние исследования с применением усовершенствованных методов точного измерения накоплений в породах изотопов свинца и продуктов распада других нестабильных химических изотопов, таких как рубидий-87 и калий-40, позволили подсчитать, что максимальный возраст самых старых из известных пород составляет около четырех с половиной миллиардов лет. Отсюда мы заключаем, что *твёрдая кора Земли, должно быть, образовалась из ранее расплавленного вещества около пяти миллиардов лет назад*.

Итак, мы можем представить Землю пять миллиардов лет назад как полностью расплавленный сферионд, окруженный густой атмосферой воздуха, водяных паров и, возможно, других чрезвычайно летучих веществ.

Как появилась на свет эта горячая масса космической материи, какие силы были ответственны за ее образование и кто поставщик материалов для ее строительства? Эти вопросы, касающиеся происхождения нашего земного шара, а также происхождения любой другой планеты Солнечной системы, представляя загадки, которые занимали умы астрономов в течение многих веков, были основными предметами изучения научной *космогонии* (теория происхождения Вселенной).

Первую попытку ответить на эти вопросы научными средствами предпринял в 1749 году выдающийся французский натуралист Жорж Луи Леклерк, граф де Бюффон, в одном из сорока четырех томов своей «*Естественной истории*». Бюффон видел происхождение планетной системы как результат столкновения между Солнцем и кометой, которая явилась из глубин межзвездного пространства. Его воображение нарисовало красочную картину «*comète fatale*¹ с длинным сверкающим хвостом, который прошелся по поверхности нашего одинокого в то время Солнца и смел с его гигантского тела несколько маленьких «капель», улетевших, крутясь, под действием силы удара, в космос (рис. 117а).

¹ Роковая комета (*фр.*).

Несколько десятилетий спустя совершенно иные взгляды относительно происхождения нашей планетной системы высказал знаменитый немецкий философ Иммануил Кант, который был более склонен считать, что Солнце создало свою планетную систему собственными силами, без вмешательства какого-либо другого небесного тела. Кант представлял раннее состояние Солнца как гигантскую, относительно холодную массу газа, которая занимала весь объем нынешней планетной системы и медленно вращалась вокруг своей оси. Постоянное охлаждение сферы путем излучения газа в окружающее пустое пространство, привело, должно быть, к ее постепенному сжатию и соответственному увеличению скорости ее вращения. Увеличивавшаяся в результате такого вращения центробежная сила, привела, надо полагать, к прогрессивному уплощению газообразного тела первобытного Солнца и в итоге к выбросу ряда газовых колец на уровне его вытянутого экватора (рис. 117б). Образование подобных колец из вращающихся масс можно продемонстрировать классическим опытом Плато, в котором большой шар масла (не газообразный, как в случае Солнца), взвешенный в какой-либо другой жидкости с равной плотностью, приводят в быстрое вращение неким вспомогательным механическим устройством; когда скорость вращения превышает определенный предел, шар масла начинает образовывать вокруг себя масляные кольца. Кольца, образованные таким образом, позже должны были распасться и, сгустившись до твердого состояния, превратиться в планеты, вращающиеся вокруг Солнца на различных расстояниях.

Поднее эти взгляды перенял и развил французский математик Пьер Симон, маркиз де Лаплас, который представил их публике в своей книге «*Exposition du système du monde*¹», опубликованной в 1796 году. Являясь великим математиком, Лаплас тем не менее даже не попытался выполнить математическую обработку этих идей, а ограничился лишь качественным обсуждением теории в научно-популярной манере.

Когда шестьдесят лет спустя английский физик Клерк Максвелл все же сделал такую математическую обработку, космогонические взгляды Канта и Лапласа натолкнулись, казалось, на стену непреодолимого противоречия.

¹ «Изложение системы мира» (*фр.*).

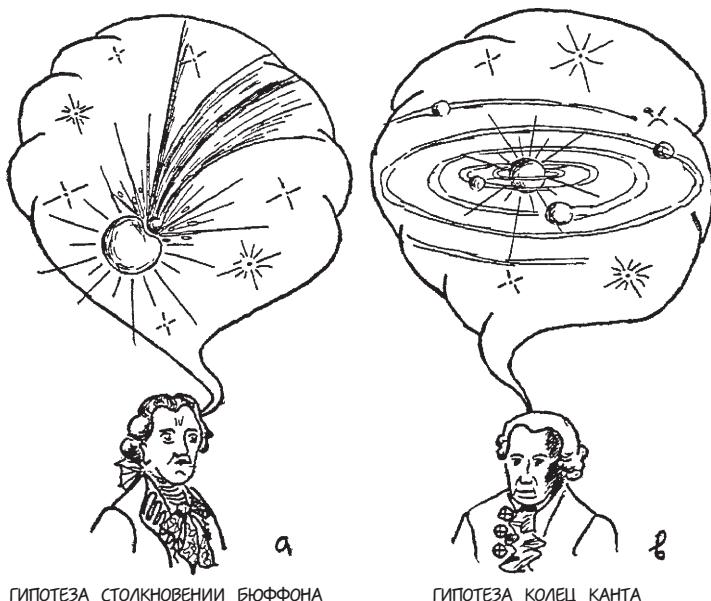


Рис. 117. Две школы мысли в космогонии.

Собственно, было показано, что, если бы вещество, сконцентрированное в настоящее время в различных планетах Солнечной системы, равномерно распределялось по всему пространству, сейчас занятому ею, слой материи был бы столь тонким и столь разреженным, что силы тяжести оказались бы абсолютно не в состоянии собрать ее в отдельные планеты. Следовательно, кольца, выброшенные из сжимавшегося Солнца, навсегда остались бы кольцами, подобными кольцам Сатурна, которые, как известно, образованы бесчисленным количеством маленьких частиц, бегущих по круговым орбитам вокруг этой планеты, не проявляя ни малейшего желания «слиться» в один твердый спутник.

Единственный выход из этого затруднения состоял бы в предположении, что первозданная оболочка Солнца содержала много больше материи (по крайней мере, в 100 раз), чем ее сейчас находится в планетах, и что большая часть этой материи упала на Солнце, оставив только около 1% на формирование планетарных тел.

Такое предположение привело бы, однако, к другому, не менее серьезному противоречию. Действительно, если бы такое большое количество вещества, которое изначально должно было бы вращаться с той же скоростью, с какой врачаются планеты, упало бы на Солнце, это неизбежно сообщило бы светилу угловую скорость в 5000 раз больше той, которую оно имеет на самом деле. Случись так, Солнце вращалось бы со скоростью 7 оборотов в час вместо 1 оборота примерно за 4 недели.

Эти соображения, казалось, поставили крест на воззрениях Канта — Лапласа, и взоры астрономов обратились с надеждой к точке зрения Бюффона: труды американских ученых Т. К. Чемберлина и Ф. Р. Мультона, а также известного английского ученика сэра Джеймса Джинса вернули к жизни теорию столкновения. Конечно, изначальные воззрения Бюффона были значительно осовременены определенными знаниями, полученными с тех пор, как его теория была сформулирована. Предположение, что небесное тело, которое столкнулось с Солнцем, было кометой, отбросили, так как к тому времени стало известно, что масса кометы ничтожно мала даже по сравнению с массой Луны. Поэтому стали считать, что атаковавшее светило тело — другая звезда, сравнимая с Солнцем по своим размерам и массе.

Однако возрожденная теория столкновения, которая в то время представляла, похоже, единственный выход из фундаментальных затруднений гипотезы Канта — Лапласа, тоже увязла в болоте. Очень трудно было понять, почему осколки Солнца, выброшенные в результате мощного удара, нанесенного другой звездой, стали двигаться по почти круговым орбитам, по которым ныне следуют все планеты, вместо того чтобы описывать вытянутые эллиптические траектории.

Чтобы спасти ситуацию, следовало предположить, что в то время, когда Солнце получило удар от проходившей мимо звезды, в результате которого образовались планеты, наше светило окружала равномерно вращавшаяся газовая оболочка, которая и помогла превратить изначально вытянутые планетарные орбиты в правильные круги. Поскольку о существовании такой среды в области, занятой сейчас планетами, ничего не известно, предполагалось, что позже она постепенно рассеялась в межзвездном пространстве и что слабое свечение, известное как зодиакальный свет, исходящее от Солнца и распространяющееся в плоскости эклиптики, — это все, что осталось от былой славы. Но эта карти-

на, представляющая собой своего рода гибрид из предположений Канта — Лапласа об изначальной газовой оболочке Солнца и гипотезы Бюффона, была весьма неудовлетворительной.

Однако, как советует пословица, следует выбрать меньшее из двух зол, и гипотезу столкновения в качестве причины происхождения планетной системы приняли как верную и до недавнего времени использовали во всех научных трудах, учебниках и популярной литературе (в том числе она приводится и в двух книгах автора «Рождение и смерть Солнца», 1940 год, и «Биография Земли», пересмотренное издание, 1959 год; впервые опубликована в 1941 году).

Лишь осенью 1943 года молодой немецкий физик К. Вайцзеккер разрубил гордиев узел планетной теории. Используя новые сведения, собранные в результате самых современных астрофизических исследований, он смог показать, что все старые возражения против гипотезы Канта — Лапласа можно легко устраниć и, продолжая двигаться в том же направлении, выстроить обстоятельную теорию происхождения планет и объяснить многие важные особенности планетной системы, которые ни одной из старых теорий даже не затрагивались.

Основная суть работы Вайцзеккера заключается в том, что в течение последних нескольких десятилетий астрофизики полностью изменили свое мнение о химическом составе материи во Вселенной. До этого было принято считать, что Солнце и все другие звезды были образованы такими же химическими элементами, с тем же процентным содержанием, о которых мы узнали, изучая нашу Землю. Геохимический анализ учит нас, что тело Земли состоит в основном из кислорода (в виде разнообразных оксидов), кремния, железа и в гораздо меньшей степени других более тяжелых элементов. Легкие газы, такие как водород и гелий (наряду с прочими так называемыми редкими газами¹, как, например, неон, аргон и так далее), присутствуют на Земле в очень малых количествах*.

В отсутствие каких-либо более убедительных доказательств астрономы предположили, что эти газы были также очень редки

¹ Имеются в виду инертные газы.

* Водород находится на нашей планете в основном в воде, в соединении с кислородом. Но все знают, что, хотя вода покрывает три четверти поверхности Земли, общая масса воды очень мала по сравнению с массой всего тела Земли.

в телах Солнца и других звезд. Однако более подробное теоретическое исследование звездного строения привело датского астрофизика Б. Стрёмгрена к выводу, что такое предположение совершенно неверно и на самом деле как минимум 35 процентов вещества нашего Солнца должен составлять чистый водород.

Позже эта оценка увеличилась до свыше 50 процентов, и было также установлено, что значительный процент других солнечных составляющих — чистый гелий. Оба теоретических исследования внутреннего солнечного строения (которые недавно достигли своего завершения в важной работе М. Шварцшильда) и более сложный спектральный анализ его поверхности привели физиков к поразительному выводу: *широко распространенные химические элементы, которые образуют тело Земли, составляют только около 1% солнечной массы, остальное почти поровну поделено между водородом и гелием с небольшим перевесом первого*. По-видимому, этот анализ также соответствует составу и других звезд.

Кроме того, теперь известно, что *межзвездное пространство не совсем пустое*, оно заполнено смесью газа и мелкой пыли со средней плотностью около 1 мг вещества на 1 000 000 куб. миль пространства, и этот рассеянный и сильно разреженный материал, очевидно, имеет такой же химический состав, как у Солнца и других звезд.

Несмотря на невероятно низкую плотность этого межзвездного вещества, его присутствие можно легко доказать, так как он производит заметное избирательное поглощение света звезд настолько далеких, что ему приходится пробегать в космосе сотни тысяч световых лет, прежде чем он попадает в наши телескопы. Интенсивность и местоположение этих «межзвездных линий поглощения» позволяют нам получить верные оценки плотности этого рассеянного вещества, а также показать, что состоит оно почти исключительно из водорода и, вероятно, гелия. Собственно, пыль, образованная мелкими частицами (около 0,001 мм в диаметре) различных «земных» веществ, составляет не более 1% от его общей массы.

Возвращаясь к основной идеи теории Вайцзеккера, можно сказать, что новое знание о химическом составе материи во Вселенной, играет на руку гипотезе Канта — Лапласа. Собственно, если первозданную газовую оболочку Солнца изначально образовывал такой материал, *лишь малая доля его, представляющая более тяжелые земные элементы, могла быть использована для построения*

нашей Земли и других планет. Остальная же его часть, представленная неконденсирующимися водородом и гелием, должна была устраниться — либо упав на Солнце, либо рассеявшись в окружающем межзвездном пространстве. Поскольку первая возможность привела бы, как объяснялось выше, к слишком быстрому осевому вращению Солнца, мы должны принять ее альтернативу, а именно, что «избыточный» газовый материал рассеялся в космосе вскоре после формирования планет из «земных» соединений.

Это подводит нас к следующей картине образования планетной системы. Когда путем конденсации межзвездного вещества сначала образовалось наше Солнце (см. следующий параграф), большая часть его — наверное, раз в сто больше нынешней совокупной массы планет — осталась снаружи в виде гигантской вращающейся оболочки. (Причину такого поведения легко найти в различиях ротационных состояний разных частей межзвездного газа, сконденсировавшегося в процессе формирования первобытного Солнца.) Эту быстро вращающуюся оболочку следует представлять как состоящую из *неконденсирующихся газов* (водорода, гелия и в меньшей степени других газов) и *частиц пыли* из различных земных материалов (таких как оксиды железа, соединения кремния, капельки воды и кристаллы льда), которые плавали внутри газа, увлекаемые его вращательным движением. Образование больших масс «земного» вещества, которые мы теперь называем планетами, явилось, надо полагать, результатом столкновений между частицами пыли и их постепенным объединением во все большие и большие тела. На рис. 118 мы иллюстрируем результаты таких взаимных столкновений, которые должны были происходить со скоростями, сравнимыми с метеоритными.

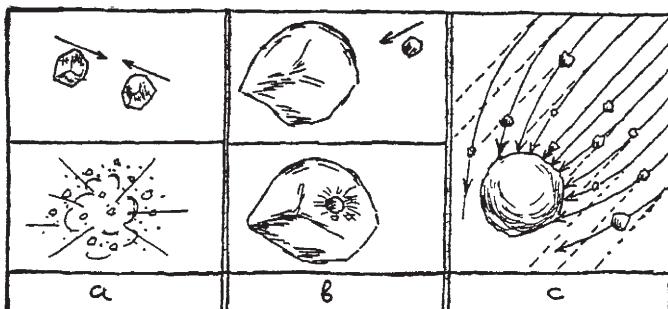


Рис. 118.

Рассуждая логически, мы должны прийти к выводу, что при таких скоростях столкновение двух частиц примерно равной массы приведет к их взаимному распылению (рис. 118a) — процессу, ведущему не к росту, а, скорее, к разрушению больших масс материи. С другой стороны, когда небольшая частица сталкивается с гораздо большей (рис. 118b), кажется очевидным, что она похоронит себя в теле последней, образуя тем самым новую, несколько большую массу.

Очевидно, что эти два процесса привели бы к постепенному исчезновению мелких частиц и объединению их вещества в более крупные тела. На более поздних этапах процесс ускорится благодаря тому, что большие массы вещества будут гравитационно притягивать мелкие частицы, проходящие мимо, и добавлять их к своим растущим телам. Это иллюстрирует рис. 118c, показывая, что большие массы материи демонстрируют значительно более высокую эффективность в захвате частиц.

Вайцзеккер смог показать следующее: чтобы сформировать планеты, мелкая пыль, изначально рассеянная по всей области, которую сейчас занимает планетная система, должна была объединиться в несколько больших масс в течение периода примерно в сто миллионов лет.

Название планеты	Расстояние от Солнца до планеты, выраженное в расстояниях от Солнца до Земли	Соотношение расстояния от Солнца до планеты и расстояния от Солнца до той планеты, которая указана в списке выше
Меркурий	0,387	
Венера	0,723	1,86
Земля	1,000	1,38
Марс	1,524	1,52
Астероиды	около 2,7	1,77
Юпитер	5,203	1,92
Сатурн	9,539	1,83
Уран	19,191	2,001
Нептун	30,07	1,56
Плутон	39,52	1,31

Пока планеты увеличивались, прирастая на своем пути вокруг Солнца различного размера фрагментами космической материи, постоянная бомбардировка их поверхностей новосозданным веществом поддерживала, надо полагать, температуру их тел очень горячей. Как только, однако, запас звездной пыли, мелких и чуть более крупных камней истощился, процесс дальнейшего роста остановился, а излучение в межзвездное пространство, должно быть, быстро охладило внешние слои новообразованных небесных тел и привело к формированию твердой коры, которая утолщается и утолщается до сих пор, так как внутреннее охлаждение, хоть и медленно, но продолжается.

Следующий важный момент, который штурмует любая теория планетного происхождения, — объяснение своеобразного правила (известного как правило *Тициуса — Боде*), регулирующего расстояния от Солнца до различных планет. В таблице ниже эти расстояния перечислены для девяти планет Солнечной системы, а также для пояса *астероидов*, который, по-видимому, соответствует случаю, представляющему собой исключение — когда отдельным частям не удалось собраться в единую большую массу.

Особый интерес представляют цифры в последнем столбце. Несмотря на некоторые вариации, очевидно, что ни одна не уходит далеко от цифры 2, и это позволяет сформулировать примерно такое правило: *радиус каждой планетарной орбиты приблизительно в два раза больше, чем радиус орбиты, ближайшей к ней в направлении Солнца*.

Название спутника	Расстояние, выраженное в радиусах Сатурна	Коэффициент увеличения каждого следующего расстояния по сравнению с предыдущим
Мимас	3,11	
Энцелад	3,99	1,28
Тетис	4,94	1,24
Диона	6,33	1,28
Рея	8,84	1,39
Титан	20,48	2,31
Гиперион	24,82	1,21
Япет	59,68	2,40
Феба	216,8	3,63

Интересно, что аналогичное правило справедливо и для спутников отдельных планет, и это демонстрирует, например, приведенная выше таблица, дающая относительные расстояния девяти спутников Сатурна.

Как и в случае самих планет, мы сталкиваемся здесь с довольно большими отклонениями (особенно у Фебы!), но, опять же, вряд ли есть сомнения в том, что существует определенная тенденция к закономерности того же типа.

Как мы можем объяснить тот факт, что процесс агрегации, который имел место в изначальном пылевом облаке, окружавшем Солнце, не привел в результате к образованию в первую очередь одной огромной планеты, почему сформировалось несколько очень больших масс и именно на таких расстояниях от Солнца?

Чтобы ответить на эти вопросы, мы должны несколько более подробно изучить движение, имевшее место в изначальном пылевом облаке. Прежде всего мы должны помнить, что каждое материальное тело — будь то крошечная частица пыли, маленький метеорит или большая планета, — которое движется вокруг Солнца по ньютоновскому закону всемирного тяготения, обязано описывать вокруг Солнца, находящегося в центре, эллиптическую орбиту. Если вещество, сформировавшее планеты, пребывало ранее в виде отдельных частиц, скажем, 0,0001 см в диаметре*, имелось, должно быть, около 10^{45} частиц, двигавшихся по эллиптическим орбитам любых размеров и вытянутости. Ясно, что при таком интенсивном движении между отдельными частицами происходило, надо полагать, множество столкновений и что в результате таких столкновений движение всего роя упорядочилось до определенной степени. Собственно, нетрудно понять, что такие столкновения служили для того, чтобы либо распылить «нарушителей движения», либо заставить их «съехать» на менее загруженные «полосы движения». Что за законы регулировали бы такое упорядоченное или хотя бы частично упорядоченное «дорожное движение»?

Чтобы как-то подойти к проблеме, давайте для начала выберем группу частиц, которые имели *одинаковый период обращения* вокруг Солнца.

* Приблизительный размер частиц пыли, образующих межзвездное вещество.

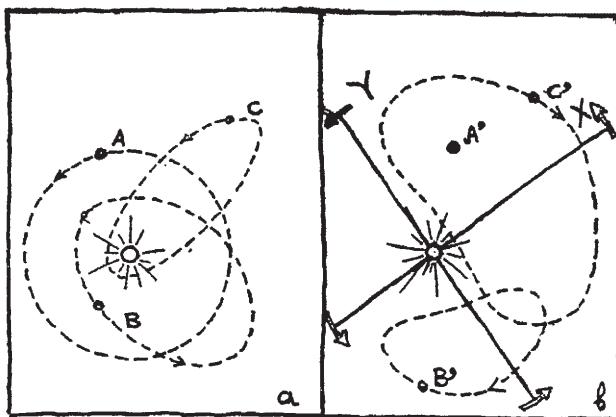


Рис. 119. Круговое и эллиптическое движение с точки зрения покоящейся и вращающейся систем координат.

Одни из них двигались по круговой орбите с соответствующим радиусом, в то время как другие описывали различные более или менее вытянутые эллиптические орбиты (рис. 119 a). Давайте теперь попробуем описать движение этих различных частиц с точки зрения системы координат (X , Y), вращающейся вокруг центра Солнца с тем же периодом, что и частицы.

Прежде всего ясно, что с точки зрения такой вращающейся системы координат частица, которая движется по круговой орбите (A), кажется совершенно неподвижной в некой точке A' . Частица B , которая движется вокруг Солнца, следуя по эллиптической траектории, то подходит ближе, то отходит дальше от Солнца, а ее угловая скорость вокруг центра больше в первом случае и меньше во втором, следовательно, иногда она будет опережать равномерно вращающуюся систему координат (X , Y), а иногда — отставать от нее. Нетрудно видеть, что с точки зрения этой системы окажется, что частица описывает замкнутую фасолеобразную траекторию, обозначенную B' на рис. 119. Еще одна частица, C , которая движется по более вытянутому эллипсу, будет рассматриваться в системе (X , Y) как описывающая похожую, но несколько большую фасолеобразную траекторию C' .

Теперь становится ясно: если мы хотим упорядочить движение всего роя частиц так, чтобы они никогда не сталкивались друг с другом, это следует сделать таким образом, чтобы фасолеобраз-

ные траектории, описываемые этими частицами в равномерно врашающейся системе координат (X, Y), не пересекались.

Памятуя, что частицы, имеющие *общий период обращения* вокруг Солнца, сохраняют одинаковое *среднее расстояние* до него, мы находим, что непересекающаяся модель их траекторий в системе (X, Y) должна выглядеть как «фасолевое ожерелье», окружающее Солнце.

Цель приведенного выше анализа, который, возможно, немного сложен для читателя, но который представляет, в принципе, довольно простую организацию, — это показать *непересекающуюся модель правил дорожного движения* для отдельных групп частиц, движущихся на одинаковом среднем расстоянии от Солнца и, следовательно, обладающих одинаковым периодом обращения. Поскольку от частиц изначального облака пыли, опоясывавшего первобытное Солнце, следует ожидать всевозможных средних расстояний и, соответственно, всевозможных периодов обращения, надо полагать, что в реальности ситуация была более сложной. Вместо одного «фасолевого ожерелья» имелось, по-видимому, большое количество таких «ожерелий», которые вращались друг относительно друга с различными скоростями. Тщательно проанализировав ситуацию, Вайцзеккер смог показать, что для устойчивости такой системы необходимо, чтобы каждое «ожерелье» содержало пять отдельных «систем-джакузи», и полная картина движения походила бы на рис. 120. Подобная организация обеспечила бы «безопасное дорожное движение» в каждом отдельном кольце, но, так как эти кольца вращались с разными периодами, когда одно кольцо соприкасалось с другим, случались, надо полагать, «дорожно-транспортные происшествия». Большое количество взаимных столкновений, происходивших в этих пограничных областях между частицами, которые принадлежали одному кольцу, и частицами, которые принадлежали соседним кольцам, — и ответственно, должно быть, за процессы объединения и роста все больших и больших масс материи на этих, в частности, расстояниях от Солнца. Итак, в итоге планеты сформировались в процессах постепенного прореживания материи внутри каждого кольца и ее накопления в пограничных между кольцами областях.

Вышеописанная картина образования планетной системы дает нам простое объяснение правила, регулирующего радиусы планетных орбит. Собственно, чисто геометрическое рассмотре-

ние показывает, что в модели, типа изображенной на рис. 120, радиусы следующих друг за другом пограничных линий соседних колец образуют простую геометрическую прогрессию: каждый из них в два раза больше, чем предыдущий. Мы также видим, почему от этого правила нельзя ожидать полной точности. На самом деле оно не есть результат некого строгого закона, регулирующего движение частиц в изначальном пылевом облаке, оно должно рассматриваться скорее как выражение определенной тенденции в процессе движения пыли, в ином случае неупорядоченном.

Тот факт, что это же правило также справедливо для спутников различных планет нашей системы, указывает на то, что процесс образования спутников шел примерно по тому же типу. Когда изначальное облако пыли вокруг Солнца разбралось на отдельные группы частиц, которым суждено было образовать планеты, из большей части вещества, сконцентрированного в центре, формировалось тело планеты, а остальная часть, что кружила вокруг, постепенно собиралась в то или иное количество спутников, и этот процесс повторялся в случае каждой планеты.

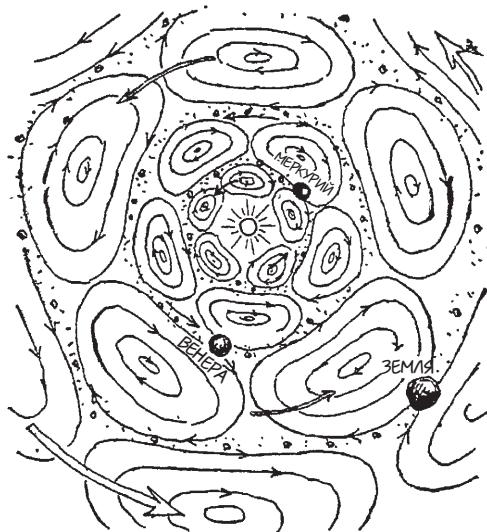


Рис. 120. «Дорожное движение» пыли в изначальной солнечной оболочке.

Обсуждая взаимные столкновения и рост частиц пыли, мы забыли рассказать, что случилось с газообразной частью первозданной солнечной оболочки, которая, если помните, составляла изначально около 99 процентов всей ее массы. Ответ на этот вопрос сравнительно прост.

В то время как частицы пыли сталкивались, образуя все большие и большие массы вещества, газы, которые не могли участвовать в этом процессе, постепенно рассеялись в межзвездном пространстве. С помощью относительно простых расчетов можно показать, что время, необходимое для такого рассеяния, составило около 100 000 000 лет, то есть примерно столько же, сколько занял период планетарного роста. Таким образом, к тому времени, когда планеты окончательно сформировались, большая часть водорода и гелия, которые образовывали изначальную солнечную оболочку, покинула, должно быть, Солнечную систему, оставив лишь ничтожно малый след, упомянутый выше как зодиакальный свет.

Одним из важных следствий теории Вайцзеккера является вывод о том, что *формирование планетной системы не было исключительным событием, оно, похоже, происходило в процессе образования практически каждой звезды*. Это утверждение прямо противоречит выводам теории столкновения, которая рассматривала процесс формирования планет в космической истории как исключительный. На самом деле, было подсчитано, что столкновения звезд, которые, возможно, породили бы планетные системы, — крайне редкие события и что среди 40 000 000 000 звезд, которые образуют нашу звездную систему Млечный Путь, в течение нескольких миллиардов лет ее существования, могли произойти лишь единицы таких столкновений.

Если, как это представляется в настоящее время, *каждая звезда обладает системой планет*, в пределах только нашей Галактики должны быть миллионы планет, физические условия на которых практически идентичны земным. И было бы как минимум странно, если бы жизнь, вплоть до своих наивысших форм, не сумела бы развиться в этих «пригодных для обитания» мирах.

Собственно, как мы видели в главе IX, простейшие формы жизни, такие как различные виды вирусов, на самом деле всего лишь сложные молекулы, состоящие в основном из атомов углерода, водорода, кислорода и азота.

Поскольку эти элементы должны находиться в изобилии на поверхности любой новообразованной планеты, можно полагать, что рано или поздно после формирования твердой земной коры и выпадения из атмосферных паров осадков, которые дали начало обширным водоемам, несколько молекул такого типа возникли вследствие случайного соединения необходимых атомов в необходимом порядке. Безусловно, сложность живых молекул делает вероятность их случайного образования крайне малой, и мы можем сравнить ее с вероятностью того, что пазл сложится правильно сам, если мы будем встраивать коробку с его фрагментами, просто надеясь, что это случится. Но, с другой стороны, мы не должны забывать, что для достижения необходимого результата имелось огромное количество атомов, непрерывно сталкивавшихся друг с другом — и много времени. То, что жизнь появилась на нашей Земле довольно скоро после образования коры, указывает на то, что, каким бы невероятным это ни казалось, для случайного образования сложной органической молекулы потребовалось, видимо, всего несколько сотен миллионов лет. Стоило самым простым формам жизни появиться на поверхности новообразованной планеты, процесс органического размножения и постепенная эволюция привели бы к образованию все более и более сложных форм живых организмов*. Двигалась ли эволюция жизни на разных «пригодных для обитания» планетах по тому же пути, по которому она шла на нашей Земле — сказать нельзя. Изучение жизни разнообразных миров внесло бы существенный вклад в наше понимание эволюционного процесса.

Но, в то время как формы жизни, которые, возможно, развились на Марсе и Венере (самые подходящие из «пригодных для обитания» планет Солнечной системы), мы сможем изучить не в таком уж и далеком будущем, совершив дерзкое путешествие на эти планеты на «космическом корабле с ядерным двигателем», вопросы о возможном существовании жизни и о ее формах в звездных мирах в сотнях и тысячах световых лет от нас, вероятно, навсегда останутся неразрешимыми для науки.

* Более подробное обсуждение происхождения и эволюции жизни на нашей планете можно найти в книге автора «Биография Земли» (New York, The Viking Press, rev. ed. 1959; first published 1941).

2. ЧАСТНАЯ ЖИЗНЬ ЗВЕЗД

Обладая более или менее полной картиной того, как звезды дают жизнь своей семье планет, теперь мы можем спросить себя о самих звездах. Какова история жизни звезды? Каковы детали ее рождения, каковы изменения, которые она претерпевает в течение своей долгой жизни, и каков финал ее существования?

Мы можем начать изучение этого вопроса, посмотрев для начала на наше собственное Солнце, которое является довольно типичным членом среди миллиардов звезд, образующих систему Млечного Пути. Прежде всего мы знаем, что наше Солнце — довольно старая звезда, так как, по данным палеонтологии, она сияла несколько миллиардов лет с неизменной интенсивностью, поддерживая развитие жизни на Земле. Ни один обычный источник не смог бы поставлять так много энергии в течение столь длительного периода времени, и проблема солнечного излучения оставалась одной из самых головоломных загадок науки, пока открытия радиоактивных превращений и искусственного превращения элементов не указали на колоссальные источники энергии, скрытые в глубинах атомных ядер. Мы уже видели в главе VII, что практически каждый химический элемент представляет собой алхимическое топливо с огромным потенциалом энергии и что эту энергию можно высвободить путем нагревания этих веществ до миллионов градусов.

В то время как столь высокие температуры практически невозможно воспроизвести в земных лабораториях, они довольно распространены в звездных мирах. Температура Солнца, например, будучи на поверхности лишь 6000 °С, по мере углубления внутрь постепенно увеличивается, достигая в центре чудовищной величины в 20 миллионов градусов. Эту цифру без труда можно рассчитать по наблюдаемой температуре на поверхности солнечного тела и по известным теплопроводным свойствам газов, из которых оно образовано. Аналогично мы можем рассчитать температуру внутри горячей картофелины, не разрезая ее, если знаем, насколько горяча она на поверхности и какова теплопроводность ее вещества.

Объединив информацию о температуре в центре Солнца с известными фактами о скоростях реакций различных ядерных превращений, можно выяснить, какая именно реакция ответственна за производство энергии на Солнце. Этот важный ядерный про-

цесс, известный как «углеродный цикл», одновременно, независимо друг от друга, открыли два физика-ядерщика, которых заинтересовали астрофизические проблемы, — Х. Бете и К. Вайцзеккер.

Термоядерный процесс, который, главным образом, и ответственен за производство энергии Солнца, не ограничивается одним ядерным превращением, а состоит из целой последовательности связанных друг с другом превращений, которые в совокупности образуют, как мы говорим, *цепную реакцию*. Одной из наиболее интересных особенностей этой последовательности реакций является то, что она *циклична*, так как через каждые шесть шагов возвращается назад к отправной точке. Из рис. 121, представляющего схему солнечной цепной реакции, мы видим, что основные участники этой последовательности — ядра углерода и азота, а также тепловые протоны, с которыми они сталкиваются.

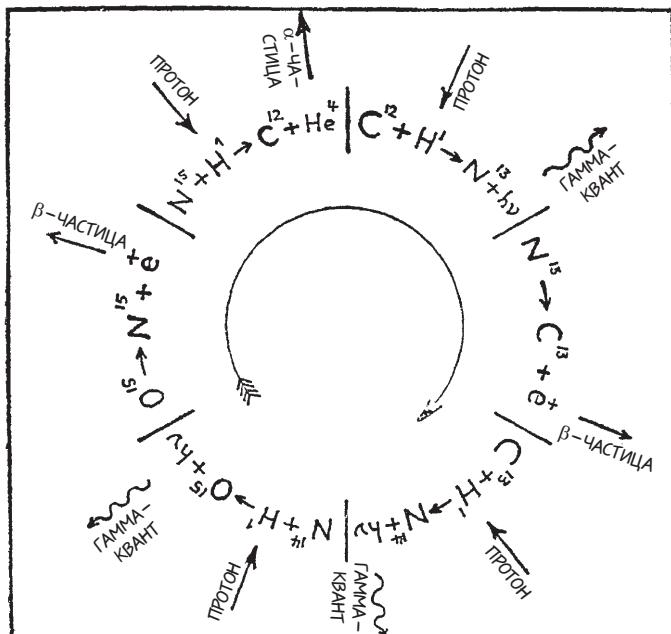


Рис. 121. Циклическая цепная ядерная реакция, ответственная за производство энергии на Солнце.

Если реакция начинается, например, с обычного углерода (C^{12}), мы видим, что результатом его столкновения с протоном является образование более легкого изотопа азота (N^{13}) и освобождение некоторого количества субатомной энергии в виде γ -кванта. В частности эта реакция хорошо известна физикам-ядерщикам, ее получили в лабораторных условиях посредством использования искусственно ускоренных высокогенеретических протонов.

Будучи нестабильным, ядро N^{13} стабилизирует себя, испустив положительный электрон или положительную β -частицу, и становится стабильным ядром более тяжелого изотопа углерода (C^{13}), который, как известно, присутствует в малых количествах в обычном угле. Получив удар от другого теплового протона, этот изотоп углерода превращается в обычный азот (N^{14}), и это сопровождается дополнительным интенсивным гамма-излучением. Далее ядро N^{14} (с которого тоже можно было начать описание цикла) соударяется с еще одним (третьим) тепловым протоном и порождает нестабильный изотоп кислорода (O^{15}), который очень быстро переходит в стабильный N^{15} , испустив положительный электрон. В итоге N^{15} , получив удар от четвертого протона, расщепляется на две неравные части: одна из них — ядро C^{12} , с которого мы начали, а другая — ядро гелия, или α -частица.

Итак, мы видим, что ядра углерода и азота в циклической цепной реакции вечно регенерируются и действуют только как катализаторы — как сказали бы химики. Конечный результат цепной реакции — образование одного ядра гелия из четырех протонов, которые последовательно вошли в цикл, так что мы можем описать весь процесс как превращение водорода в гелий, вызванное высокими температурами и каталитическим действием углерода и азота.

Бете удалось показать, что количество энергии, высвобожденное в «его» цепной реакции при температуре 20 миллионов градусов, совпадает с фактическим количеством энергии, излучаемым нашим Солнцем. Поскольку все другие возможные реакции приводят к результатам, противоречащим астрофизическим данным, определенно, следует признать, что углеродно-азотный цикл и представляет собой процесс главным образом ответственный за производство солнечной энергии. Также следует заметить, что при температуре, в которой пребывают недра Солнца, полный цикл, пока-

занный на рис. 121, требует около 5 миллионов лет, и в конце этого периода каждое углеродное (или азотное) ядро, которое первоначально вступило в реакцию, выходит из нее таким же целым и невредимым, каким было вначале.

В связи с основной ролью, которую играет в этом процессе углерод, есть кое-что, что нужно сказать по поводу примитивного взгляда, будто из угля исходит солнечное тепло: теперь мы знаем, что «уголь», вместо того чтобы быть настоящим топливом, играет скорее роль легендарного Феникса.

Следует особо отметить, что, в то время как скорость реакции по производству энергии на Солнце существенно зависит от температуры и плотности, достигаемых в его центральных областях, она также в некоторой степени должна зависеть от содержания водорода, углерода и азота в веществе, образующем солнечное тело. Этот вывод влечет за собой и метод, с помощью которого мы можем проанализировать состав солнечных газов: метод предполагает скорректировать концентрации участвующих реагентов (то есть реагирующих веществ) так, чтобы они точно соответствовали наблюдаемой светимости Солнца. М. Шварцшильд сделал основанные на этом методе расчеты, за которыми последовало открытие, что свыше половины солнечного вещества составляет чистый водород, немногим меньше половины — чистый гелий и совсем уже маленький остаток — все другие элементы.

Объяснение производства энергии на Солнце можно легко распространить на большинство других звезд и заключить, что звезды с разными массами имеют разные температуры в своем центре и, следовательно, разные скорости производства энергии. Так, звезда известная как O_2 Эридана С, примерно в пять раз легче, чем Солнце, и, соответственно, светит с интенсивностью, которая составляет лишь около 1 процента от солнечной. С другой стороны, X Большого Пса А, широко известная как Сириус, приблизительно в два с половиной раза тяжелее Солнца и в сорок раз ярче. Существуют также такие гигантские звезды, как, например, Y 380 Лебедя, которая примерно в сорок раз тяжелее и в несколько сотен тысяч раз ярче Солнца. Во всех этих случаях связь между большей звездной массой и ее гораздо большей светимостью можно весьма уловительно объяснить увеличением скорости реакции «углеродного цикла», которое было вызвано более высокой температурой в центре звезды. Следуя так называемой главной

последовательности звезд, мы также находим, что увеличение массы приводит к увеличению радиуса звезды (от 0,43 солнечного радиуса у O_2 Эридана С до 29 солнечных радиусов у Y380 Лебедя) и уменьшению ее средней плотности (от 2,5 у O_2 Эридана С и 1,4 у Солнца до 0,002 у Y380 Лебедя), некоторые данные о звездах главной последовательности приведены на схеме, показанной на рис. 122.

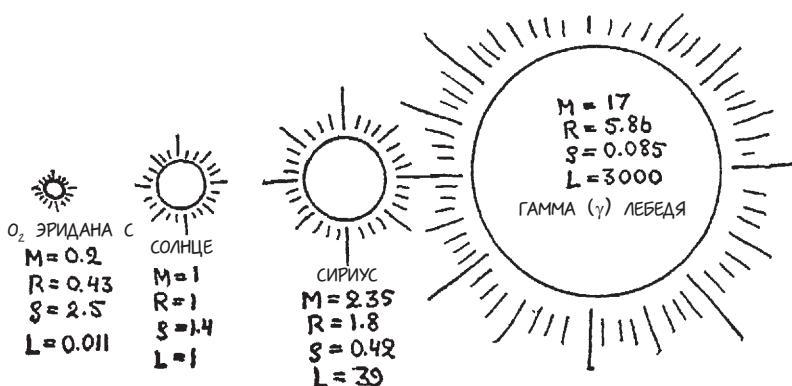


Рис. 122. Главная последовательность звезд.

Помимо «нормальных» звезд, у которых радиус, плотность и светимость определяются их массами, астрономы находят на небе некоторые типы звезд, определенно выпадающие из этой простой системы.

Прежде всего это так называемые красные гиганты и сверхгиганты, которые, хотя и имеют такое же количество вещества, как и «нормальные» звезды одинаковой с ними светимости, обладают, однако, гораздо большими линейными размерами. На рис. 123 мы даем схематическое изображение этой аномальной группы звезд, к которым относятся такие знаменитости, как *Капелла*, *Шеат*, *Альдебаран*, *Бетельгейзе*, *Рас Альгети* и *Е Возничего*.

Очевидно, что тела этих звезд разнесло до невероятно больших размеров под действием внутренних сил, которые мы пока не можем объяснить, в результате чего их средние плотности упали значительно ниже плотностей любых нормальных звезд.

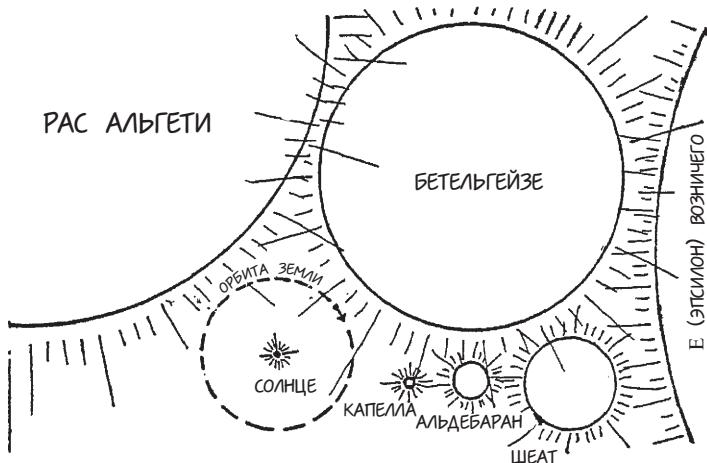


Рис. 123. Звезды-гиганты и сверхгиганты по сравнению с размером нашей планетной системы.

В противовес этим «распухшим» звездам есть другая группа звезд, которые сжались до очень маленьких диаметров. Одна из звезд этого класса, известного как «белые карлики»*, показана на рис. 124, на котором, для сравнения, изображена и Земля. «Компаньон Сириуса» состоит из массы, почти равной массе Солнца, а по размеру он всего в три раза больше Земли; его средняя плотность должна быть примерно в 500 000 больше, чем у воды! Вряд ли есть сомнения, что звезды — белые карлики представляют собой конечную стадию в эволюции звезды, соответствующую фазе, в которой звезда уже израсходовала все имевшееся у нее водородное топливо.

Как мы видели выше, источники жизни звезд лежат в алхимических реакциях, медленно превращающих водород в гелий. Поскольку в молодой звезде, которая только-только образовалась путем конденсации вещества, рассеянного в межзвездном пространстве, содержание водорода превышает 50 процентов всей ее массы, можно ожидать, что продолжительность жизни звезды

* Термины «красные гиганты» и «белые карлики» происходят из отношения их светимости к их поверхности. Поскольку разреженные звезды имеют очень большую поверхность, чтобы излучать энергию, произведенную в недрах, температура их поверхности — сравнительно низкая, что придает им красный цвет. С другой стороны, поверхность сильно сконденсированных звезд, должна быть непременно очень горячей, или раскаленной добела.

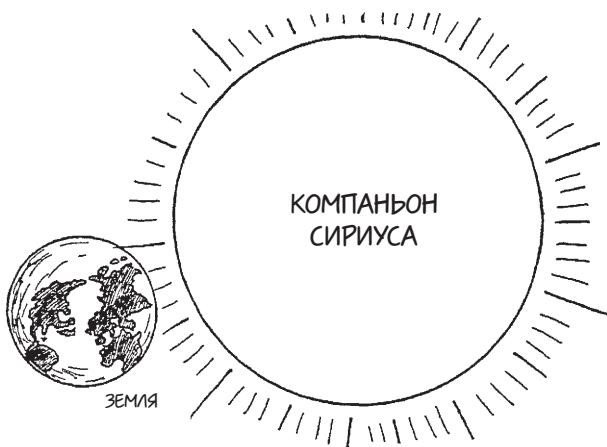


Рис. 124. Белый карлик в сравнении с Землей.

очень высокая. Так, например, по наблюдаемой светимости нашего Солнца, можно рассчитать, что оно потребляет около 660 миллионов тонн водорода в секунду. Поскольку общая масса Солнца 2×10^{27} тонн, половина из которых водород, мы находим, что продолжительность жизни Солнца должна составить $15 \cdot 10^{18}$ секунд, или около 50 миллиардов лет! Памятуя, что нашему Солнцу сейчас всего около 3 или 4 миллиардов лет*, мы видим, что его следует считать очень молодым и что ему предстоит сиять, приблизительно с нынешней интенсивностью, еще миллиарды и миллиарды лет.

Но более массивные и, следовательно, более яркие звезды тратят свой изначальный запас водорода с гораздо большей скоростью. Так, например, Сириус, будучи в 2,3 раза тяжелее Солнца, и, соответственно, первоначально имея в 2,3 раза больше водородного топлива, в 39 раз ярче Солнца. Расходя в 39 раз больше топлива за данное время, чем Солнце, и обладая изначальным запасом, который больше всего в 2,3 раза, Сириус использует его весь за 3 000 000 000 лет. У еще более яких звезд, таких как, например, Y Лебедя (в 17 раз больше Солнца по массе и в 30 000 раз ярче), первоначального запаса водорода хватит не более чем на 100 000 000 лет.

* Поскольку, согласно теории Вайцзеккера, Солнце образовалось незадолго до формирования планетной системы, возраст нашей Земли — величина того же порядка.

Что происходит со звездой, когда ее запас водорода истощается в конце концов?

Поскольку источник ядерной энергии, который более или менее поддерживал *статус-кво* звезды в течение ее долгой жизни, иссяк, тело звезды должно начать сжиматься, проходя последовательные этапы все большей и большей плотности.

Астрономические наблюдения открывают существование большого числа таких «усохших звезд», средняя плотность которых превышает плотность воды на коэффициент несколько сотен тысяч. Эти звезды все еще очень горячие, и вследствие высокой температуры их поверхности сияют ярким белым светом, составляя резкий контраст с обычными желтоватыми или красноватыми звездами главной последовательности. Поскольку, однако, размер этих звезд очень мал, их полная светимость довольно низкая — в тысячи раз ниже, чем у Солнца. Астрономы называют эту конечную стадию эволюции звезд «белый карлик», последний термин используется как в значении геометрических размеров, так и в значении полной светимости. С течением времени раскаленные добела тела «белых карликов» будут постепенно терять свою яркость и превратятся в итоге в «черных карликов» — большие холодные массы материи, недоступные для обычных астрономических наблюдений.

Однако здесь следует отметить, что процесс сжатия и постепенного охлаждения старых звезд, которые израсходовали все свое жизненно важное водородное топливо, не всегда протекает спокойно и гладко и что, проходя свою «последнюю милю», умирающие звезды часто сотрясают титанические конвульсии — они словно бунтуют против своей участи.

Эти катастрофические события, известные как *взрывы новых и сверхновых*, представляют одну из самых захватывающих тем в изучении звезд. В течение нескольких дней звезда, которая раньше, казалось, мало отличалась от любой другой звезды на небе, увеличивает свою светимость на коэффициент несколько сотен тысяч, а ее поверхность становится, очевидно, чрезвычайно горячей. Изучение изменений в спектре, сопровождающих это внезапное увеличение светимости, указывает на то, что тело звезды быстро раздувается и что ее внешние слои расширяются со скоростью около 2000 км в секунду. Увеличение светимости, однако, явление временное, и, достигнув максимума, звезда начинает

медленно успокаиваться. Обычно требуется около года, чтобы светимость взорвавшейся звезды вернулась к своему первоначальному значению, хотя небольшие колебания в звездном излучении наблюдаются и после гораздо более продолжительных временных интервалов. Хотя светимость звезды снова приходит в норму, нельзя сказать то же самое о других ее свойствах. Часть звездной атмосферы звезды, участвовавшая в быстром расширении во время фазы взрыва, продолжает движение наружу, и звезду окружает светящаяся газовая оболочка, постепенно увеличивающаяся в диаметре. Собственно, данные, касающиеся постоянных изменений звезды, пока еще не окончательны, поскольку имеется лишь один случай, когда спектр звезды сфотографировали до взрыва (*Nova Aurigae 1918¹*). Но даже эта фотография кажется настолько несовершенной на вид, что выводы о температуре поверхности и радиусе на этапе, предшествовавшем вспышке новой, следуют рассматривать как весьма ненадежные.

Несколько более качественные данные о результатах взрыва в теле звезды можно получить из наблюдений за взрывами так называемых сверхновых. Эти колоссальные звездные взрывы, которые случаются в нашей звездной системе только один раз в несколько столетий (в отличие от обычных новых, которые происходят со скоростью около 40 в год), превышают светимость обычных новых в несколько тысяч раз. В период максимума свет, излучаемый такой взрывающейся звездой, сопоставим со светом, испускаемым всей звездной системой. Звезда, за которой наблюдал Тихо Браге в 1572 году, видимая даже при ярком дневном свете, звезда, зарегистрированная китайскими астрономами в 1054 году, и, вероятно, Вифлеемская звезда представляют собой типичные примеры таких сверхновых в пределах нашей звездной системы Млечный Путь.

Первая внегалактическая сверхновая наблюдалась в 1885 году в соседней звездной системе, известной как великая туманность Андромеды, ее светимость превышала на коэффициент одна тысяча светимости всех новых, когда-либо наблюдавшихся в этой системе. Несмотря на сравнительную редкость этих грандиозных взрывов, изучение их свойств достигло значительного прогресса в последние годы — благодаря наблюдениям Бааде и Цикки, которые были первыми, кто признали существование большой

¹ Новая Возничего 1918 года.

разницы между двумя типами взрывов и начали систематическое изучение сверхновых, возникавших в различных далеких звездных системах.

Несмотря на огромную разницу в светимости, феномены взрывов сверхновых демонстрируют многие черты, свойственные взрывам обычных новых. Быстрый рост светимости и ее последующее медленное снижение в обоих случаях (без учета размеров) представлены практически идентичными кривыми. Как и в случае с обычной новой, взрыв сверхновой приводит к быстрому расширению газовой оболочки, которая, однако, составляет значительно большую долю массы звезды. Собственно, в то время как газовые оболочки, испускаемые новыми, становятся все тоньше и тоньше и быстрее растворяются в окружающем пространстве, газовые массы, испускаемые сверхновыми, образуют обширные светящиеся туманности, окутывающие место взрыва. Например, можно считать определенно установленным, что так называемая Крабовидная туманность, видимая на месте сверхновой 1054 года, образовалась из газов, выброшенных в течение этого взрыва (см. иллюстрацию VIII «Вклейки»).

В случае этой сверхновой, в частности, у нас также есть некоторые данные о состоянии самой звезды после взрыва. Собственно, наблюдения показывают, что в самом центре Крабовидной туманности имеется тусклая звезда, которая, согласно наблюдаемым свойствам, должна быть классифицирована как очень плотный белый карлик.

Все это указывает на следующее: хотя все и происходит в гораздо больших масштабах, физические процессы взрыва сверхновой, должно быть, аналогичны таковым у обычных новых.

Применив «теорию коллапса» к новым и сверхновым, мы прежде всего должны спросить себя о причинах, которые могут привести к такому быстрому сжатию всего звездного тела. В настоящее время твердо установлено, что звезды представляют собой гигантские массы горячего газа и что состояние равновесия в теле звезды поддерживается исключительно высоким газовым давлением горячего вещества в ее недрах. Пока в центре звезды продолжается описанный выше «углеродный цикл», энергия, излучаемая с поверхности, восполняется субатомной энергией, производимой в недрах, и состояние звезды меняется очень мало. Как только, однако, содержание водорода полностью исчерпано, субатомная энергия больше недоступна и звезда должна начать сжиматься,

превращая таким образом свою потенциальную энергию гравитации в излучение.

Процесс такого гравитационного сжатия будет идти, однако, очень долго, так как из-за высокой непрозрачности звездного вещества перенос тепла из недр к поверхности происходит очень медленно. Например, легко подсчитать, что, для того чтобы сжаться до половины своего нынешнего радиуса, нашему Солнцу потребуется более десяти миллионов лет. Любая попытка более быстрого сжатия немедленно приведет к высвобождению дополнительной гравитационной энергии, которая увеличит температуру и давление газа в недрах и замедлит сжатие. Из приведенных выше соображений становится понятно, что единственный способ ускорить сжатие звезды и превратить его в быстрый коллапс, наблюдаемый в случаях новых и сверхновых, состоял бы в неком механизме, который удалял бы из недр звезды энергию, освободившуюся при сжатии. Если бы, например, непрозрачность звездного вещества можно было уменьшить на коэффициент несколько миллиардов, сжатие ускорилось бы в той же пропорции, и сжимающаяся звезда сколлапсировала бы в течение нескольких дней. Эта возможность, однако, совершенно исключена, так как современная теория излучения показывает, что непрозрачность звездного вещества совершенно определенно функция его плотности и температуры, и ее вряд ли можно уменьшить больше, чем на коэффициент десять или сто.

Автор и его коллега доктор Шёнберг предположили, что настоящая причина звездных коллапсов связана с массовым образованием *нейтрино*, крошечных ядерных частиц, которые подробно обсуждаются в главе VII этой книги. Из описания нейтрино ясно, что это как раз тот агент, который необходим для удаления лишней энергии из недр сжимающейся звезды, так как все тело звезды столь же прозрачно для нейтрино, как оконное стекло для обычного света. Осталось узнать, будут ли нейтрино производиться, и производиться в достаточно большом количестве, в горячих недрах сжимающейся звезды.

Реакции, которые непременно должны сопровождаться выбросом нейтрино, состоят в захвате быстро движущихся электронов ядрами различных элементов. Когда быстрый электрон проникает внутрь атомного ядра, в тот же миг испускается нейтрино высокой энергии, а электрон удерживается, превращая исходное ядро в нестабильное ядро с той же атомной массой. Будучи неста-

бильным, это новообразованное ядро может существовать только определенный период времени, после чего оно распадается, испустив электрон в компании с еще одним нейтрино. Затем процесс начинается с самого начала и приводит к выбросу нового нейтрино... (Рис. 125).

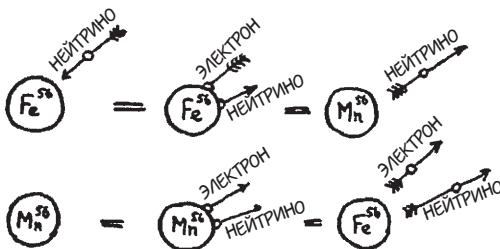


Рис. 125. Урка-процесс¹ в ядре железа, который приводит к неограниченному образованию нейтрино.

Если температура и плотность достаточно высоки, каковыми они и являются в недрах сжимающихся звезд, потери энергии посредством выбросов нейтрино будут чрезвычайно высокими. Так, например, захват и повторное испускание электронов ядрами атомов железа превратят в энергию нейтрино целых 10^{11} эрг на грамм в секунду. В случае кислорода (где нестабильный продукт — это радиоактивный азот с периодом распада 9 секунд) звезда может потерять даже целых 10^{17} эрг на грамм в секунду своего вещества. Потери энергии в этом последнем случае настолько высоки, что полный коллапс звезды происходит всего за двадцать пять минут.

Итак, мы видим, что причины звездных коллапсов можно прекрасно объяснить началом излучения нейтрино из горячих центральных областей сжимающихся звезд.

Следует отметить, однако, что, хотя скорость потери энергии посредством испускания нейтрино можно рассчитать сравнительно легко, изучение самого процесса коллапса представляет много математических трудностей, поэтому в настоящее время можно дать только качественное объяснение этих событий.

¹ Нейтринное охлаждение. Это процесс охлаждения звезды образующимися в ее недрах нейтрино.

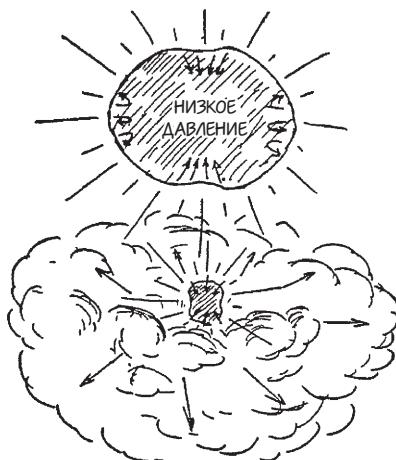


Рис. 126. Ранняя и конечная стадии взрыва сверхновой.

Вероятно, в результате недостатка давления газа в звездных недрах массы, которые образуют ее гигантское внешнее тело, движимые силами гравитации, начинают обваливаться по направлению к центру. Поскольку, однако, каждая звезда обычно находится в состоянии более или менее быстрого вращения, процесс коллапса протекает асимметрично, и полярные массы (то есть те, которые находятся вблизи от оси вращения) обрушаиваются первыми, выталкивая экваториальные массы наружу (рис. 126).

Это обнажает вещество, ранее скрытое глубоко в звездных недрах и нагретое до температуры в несколько тысяч миллионов градусов, — температуры, которая и приводит к внезапному увеличению светимости звезды. По мере того как процесс идет, коллапсирующее вещество старой звезды конденсируется в центре в плотный «белый карлик», тогда как выброшенные массы постепенно остывают и продолжают расширяться, образуя тот вид туманности, который наблюдается в Крабовидной туманности.

3. ПЕРВОЗДАННЫЙ ХАОС И РАСШИРЯЮЩАЯСЯ ВСЕЛЕННАЯ

Думая о Вселенной в целом, мы не можем не задаться вопросом, как она будет развиваться во времени. Должны ли мы предположить, что она всегда была и всегда будет примерно в том же

состоянии, какое мы наблюдаем сейчас? Или же Вселенная постоянно меняется, проходя через разные этапы эволюции?

Рассматривая этот вопрос на основе эмпирических фактов, собранных самыми разными отраслями науки, мы приходим к однозначному ответу. *Да, наша Вселенная постепенно меняется*, ее состояние в давно забытом прошлом, ее состояние в настоящем, и то, чем она станет в далеком будущем, — три очень разных состояния бытия. Более того, многочисленные факты, накопленные различными науками, указывают на то, что наша Вселенная имела определенное *начало*, из которого она пришла к своему нынешнему состоянию в процессе поэтапной эволюции. Как мы видели выше, возраст нашей планетной системы можно оценить в несколько миллиардов лет — цифра, которая упрямо появляется, кто бы, как много и с какой стороны ни штурмовал эту проблему. Формирование Луны, которую, по-видимому, оторвали от тела Земли мощные гравитационные силы, исходившие от Солнца, также произошло, должно быть, несколько миллиардов лет назад.

Изучение эволюции отдельных звезд (см. предыдущий параграф) указывает на то, что большинству звезд, которые мы видим сейчас на небе, тоже *несколько миллиардов лет*. Изучение движения звезд вообще и, в частности, относительного движения двойных и тройных звездных систем, а также систем, состоящих из более сложных звездных групп, известных как *галактические кластеры*, приводят астрономов к выводу, что такие конфигурации тоже не могли существовать дольше нескольких миллиардов лет.

Полностью независимые данные подкрепляются существованием относительного изобилия различных химических элементов и, в частности, радиоактивных элементов, таких как торий и уран, которые, как известно, постепенно распадаются. Если, несмотря на их прогрессивный распад, эти элементы все еще присутствуют во Вселенной, мы должны предположить, что они либо до сих пор постоянно воспроизводятся из других, более легких ядер, либо являются остатками запаса, созданного природой в далеком прошлом.

Наши нынешние знания о процессах ядерных превращений принуждают нас отказаться от первой возможности, так как даже в недрах самых горячих звезд температура никогда не поднимается до той чудовищной высоты, которая необходима для «приго-

тования» тяжелого радиоактивного ядра. Собственно, как мы видели в предыдущем параграфе, температура внутри звезд изменяется десятками миллионов градусов, а чтобы «приготовить» радиоактивные ядра из ядер более легких элементов, нужно несколько миллиардов градусов.

Следовательно, мы должны предположить, что ядра тяжелых элементов образовались в какой-то прошлой эпохе эволюции Вселенной и что именно в эту эпоху вся материя подверглась воздействию ужасающее высоких температур и, соответственно, высокого давления.

Мы также можем приблизительно оценить, когда Вселенная проходила через эту «чистилищную» стадию. Мы знаем, что торий и уран-238, со средней продолжительностью жизни $18 \frac{1}{2}$ миллиардов лет соответственно, с того времени как были созданы, существенного распада не претерпели, потому что в настоящее время они столь же многочисленны, сколь и некоторые другие стабильные тяжелые элементы. С другой стороны, урана-235, со средней продолжительностью жизни всего около полумиллиарда лет, в 140 раза меньше, чем урана-238. Нынешнее изобилие урана-238 и тория указывает на то, что образование элементов имело место не более нескольких миллиардов лет назад, а существование небольшого количества урана-235 позволяет оценить время еще точнее. Собственно, если количество этого элемента сокращалось вдвое каждые 500 миллионов лет, то его сокращение до одной 140-й (так как $\frac{1}{2} \times \frac{1}{2} \times \frac{1}{2} \times \frac{1}{2} \times \frac{1}{2} \times \frac{1}{2} = \frac{1}{128}$) должно было занять около семи таких периодов, то есть $3\frac{1}{2}$ миллиарда лет.

Эта оценка возраста химических элементов, полученная исключительно из данных ядерной физики, прекрасно согласуется с ориентировочным возрастом планет, звезд и звездных групп, полученным из чисто астрономических данных!

Но каким было состояние Вселенной в том раннем возрасте несколько миллиардов лет назад, когда, похоже, все и образовалось? И какие изменения, произошедшие с тех времен, привели Вселенную в ее нынешнее состояние?

Наиболее полный ответ на поставленные вопросы можно получить из изучения феномена «расширения Вселенной». Мы видели в предыдущей главе, что грандиозное пространство Вселенной заполнено большим количеством гигантских звездных

систем, или галактик, и что наше Солнце является лишь одной из многих миллиардов звезд в одной из таких галактик известной как Млечный Путь. Мы также видели, что, насколько хватает глаз (которым, конечно же, помогает 200-дюймовый телескоп), эти галактики распределены в космосе более или менее равномерно.

Изучая спектры света, идущего из этих далеких галактик, Э. Хаббл, астроном из обсерватории Маунт-Уилсон, заметил, что спектральные линии слегка смещены к красному концу спектра и что это так называемое красное смещение сильнее у более далеких галактик. Собственно, выяснилось, что красное смещение, наблюдаемое у разных галактиках, прямо пропорционально расстоянию, на котором они находятся от нас.

Наиболее естественный способ объяснить это явление — предположить, что все галактики удаляются от нас со скоростью, которая увеличивается по мере увеличения расстояния, на котором они находятся от нас. Это объяснение основано на так называемом эффекте Доплера, который заставляет свет, исходящий от источника, приближающегося к нам, менять свой цвет в направлении фиолетового конца спектра, а свет от удаляющегося источника — в направлении красного. Конечно, для получения заметного сдвига скорость источника относительно положения наблюдателя должна быть довольно большой. Когда профессора Р. У. Вуда арестовали в Балтиморе за проезд на красный сигнал светофора, он подшутил над судьей, сказав тому, что из-за этого феномена свет, который он видел, выглядел для него зеленым, так как он приближался к нему на машине. Знай судья больше о физике, он бы попросил профессора Вуда рассчитать скорость, с которой тот должен был бы ехать, чтобы увидеть вместо красного света зеленый, — а потом оштрафовал бы профессора за превышение скорости!

Возвращаясь к проблеме красного смещения, наблюдавшегося у галактик, мы приходим к довольно неловкому на первый взгляд выводу. Выглядит так, словно все галактики во Вселенной разбежались от нашего Млечного Пути, как если бы он был галактическим монстром Франкенштейна! Что же это за ужасные свойства у нашей звездной системы и почему она кажется столь непопулярной у других галактик? Если вы немного подумаете над этим, то легко придет к выводу, что нет ничего такого страшного в нашем Млечном Пути и что в действительности

другие галактики не убегают именно от него, а, скорее, все убегают друг от друга. Представьте себе надувной шарик с узором «в горошек», нанесенным на его поверхность (рис. 127). Если вы начнете его надувать, поверхность шарика станет постепенно растягиваться до все больших и больших размеров, а расстояния между отдельными точками будут постоянно увеличиваться, поэтому у насекомого, сидящего на одной из точек, сложилось бы впечатление, что все остальные точки «убегают» от него. Более того, скорости рецессии¹ разных точек на расширяющемся шарике будут прямо пропорциональны их расстоянию от точки наблюдения насекомого.

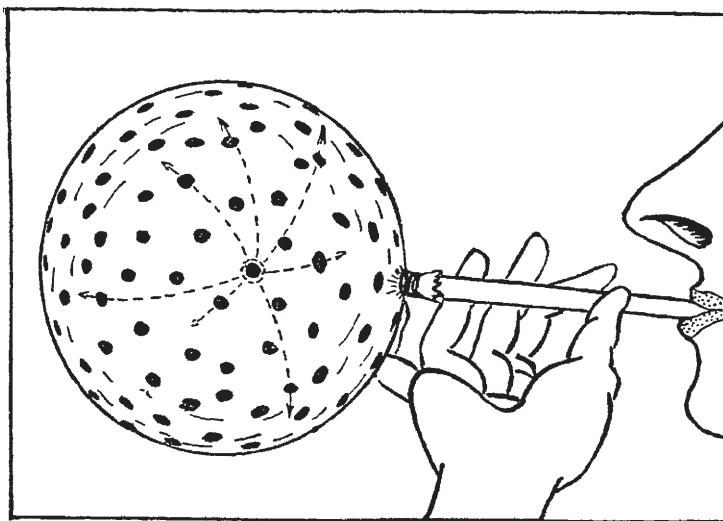


Рис. 127. Когда надувной шарик расширяется, точки разбегаются друг от друга.

Из этого примера становится полностью ясно, что рецессия галактик, которую наблюдал Хаббл, не имеет ничего общего со специфическими свойствами или положением нашей собственной галактики, а должна объясняться с точки зрения *общего равномерного расширения системы галактик, разбросанных по пространству Вселенной*.

¹ удаления.

По наблюдаемой скорости расширения и расстояниям между соседними галактиками, существующим в настоящее время, легко вычислить, что *это расширение должно было начаться более пяти миллиардов лет назад**.

До этого времени отдельные звездные облака, которые сейчас мы называем галактиками, составляли части звезд, равномерно распределенных по всему пространству Вселенной, а еще раньше сами звезды были спрессованы вместе, заполняя Вселенную постоянно распространявшимся горячим газом. Отойдя во времени дальше назад, мы находим, что этот газ был более плотным и более горячим, и речь идет, по-видимому, об эпохе, когда образовались разнообразные химические (и в частности радиоактивные) элементы. Еще один шаг назад во времени — и мы находим, что материя Вселенной была сжата в сверхплотную и сверхгорячую ядерную жидкость, которую мы обсуждали в главе VII.

Теперь мы можем собрать воедино эти наблюдения и выстроить в верной последовательности события, которые ознаменовали эволюционное развитие Вселенной.

История начинается с зачаточной стадии Вселенной, когда вся материя, которую теперь мы можем наблюдать рассеянной в космосе в пределах видимости Маунт-Уилсоновского телескопа (то есть в пределах радиуса в 500 000 000 световых лет), была втиснута в сферу с радиусом всего около восьми радиусов Солнца**. Однако это сверхплотное состояние длилось не очень долго, так как быстрое расширение в течение первых же двух секунд должно было снизить плотность Вселенной до плотности, которая больше, чем у воды, в миллион раз, а в течение нескольких часов — до

* Согласно исходным данным Хаббла, среднее расстояние между двумя соседними галактиками составляет около 1,7 миллиона световых лет (или $1 \cdot 6 \cdot 10^{19}$ км), а скорость их взаимной recession — около 300 км в секунду. Предполагая, что скорость расширения равномерна, мы получаем время расширения $\frac{1 \cdot 6 \cdot 10^{19}}{300} = 5 \cdot 10^{16}$ с = $1 \cdot 8 \cdot 10^9$ лет. Новейшая информация приводит, однако, к получению несколько более продолжительных периодов времени.

** Поскольку плотность ядерной материи составляет 10^{14} г/см³, а существующая ныне средняя плотность вещества в пространстве равна 10^{-30} г/см³, линейное сжатие было бы $\sqrt[3]{\frac{10^{14}}{10^{-30}}} \approx 5 \cdot 10^{14}$. Таким образом, нынешнее расстояние $5 \cdot 10^8$ световых лет в то время было всего $\frac{5 \cdot 10^8}{5 \cdot 10^{14}} = 10^{-6}$ световых лет = 10 000 000 км.

плотности воды. Примерно в это же время ранее цельная масса газа должна была разбиться на отдельные газовые сферы, ныне входящие в состав отдельных звезд. Эти звезды, которые уходили друг от друга все дальше и дальше, образовали позже отдельные звездные облака, называемые галактиками, которые продолжают удаляться друг от друга, двигаясь в неизвестные глубины Вселенной.

Теперь мы можем спросить себя, какие силы ответственны за расширение Вселенной, остановится ли это расширение когда-нибудь и не превратится ли оно, наоборот, в сжатие. Существует ли вероятность, что расширяющиеся массы Вселенной повернут назад и сожмут нашу звездную систему Млечный Путь, Солнце, Землю и человечество на Земле до состояния каши с ядерной плотностью?

Согласно выводам, основанным на самых достоверных из доступных нам сведений, этого не произойдет никогда. Давным-давно, на ранних стадиях своей эволюции, расширяющаяся Вселенная разорвала все узы, которые могли бы ее сдерживать, и теперь расширяется в бесконечность, послушная простому закону инерции. Упомянутые пути — это силы гравитации, которые противодействовали растаскиванию масс Вселенной в разные стороны.

В качестве простого пояснительного примера предположим, что мы пытаемся запустить ракету с поверхности Земли в межпланетное пространство. Мы знаем, что никакие из существующих ракет, даже знаменитая V-2¹, не имеют тяговой мощности достаточной, чтобы вырваться в открытый космос и что силы гравитации всегда останавливают их взлет и тянут назад на Землю. Однако, если бы мы были в состоянии придать ракете такую мощность, чтобы она стартовала с Земли с начальной скоростью, превышающей 11 км в секунду (что кажется целью, которую можно достичь, разработав ракеты с ядерным двигателем), она сможет преодолеть силу земной гравитации и вырваться в открытый космос, где будет двигаться уже без помех. Скорость 11 км в секунду известна как «скорость освобождения»² от гравитации Земли.

Представьте теперь, что артиллерийский снаряд взорвался в воздухе и его фрагменты разлетаются во всех направлениях (рис. 128а).

¹ Ракета «Фай-2».

² «вторая космическая скорость».

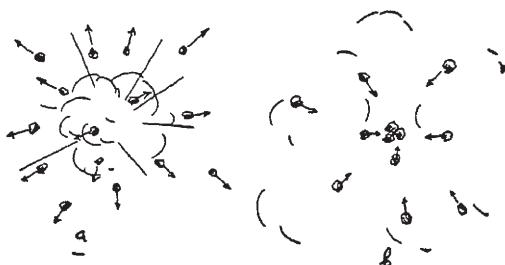


Рис. 128.

Осколки, отброшенные силой взрыва, разлетаются в разные стороны, действуя против гравитационных сил, которые стремятся притянуть их обратно к общему центру. Само собой разумеется, что в случае осколков снаряда эти силы взаимного гравитационного притяжения незначительны, то есть они настолько слабы, что не влияют на движение осколков в пространстве вообще. Если бы, однако, эти силы были больше, они могли бы остановить полет осколков и заставить их вернуться назад к общему центру гравитации (рис. 128б). Вопрос, вернутся ли фрагменты назад или улетят в бесконечность, решается относительными величинами кинетической энергии их движения и потенциальной энергии гравитационных сил между ними.

Замените осколки снаряда отдельными галактиками, и вы получите ту самую картину расширяющейся Вселенной, описание которой мы дали на предыдущих страницах. Здесь, однако, из-за очень больших масс отдельных галактик-осколков, потенциальная энергия гравитационных сил обретает большую важность по сравнению с их кинетической энергией*, поэтому каким будет будущее расширения, можно определить лишь путем тщательного изучения обеих величин.

Согласно самым достоверным сведениям о галактических массах, похоже на то, что в настоящее время кинетическая энергия удаляющихся галактик в несколько раз превышает их взаимную потенциальную гравитационную энергию, из чего следует, что *наша Вселенная расширяется в бесконечность и ее части не имеют никаких шансов на то, что силы гравитации когда-либо*

* В то время как кинетическая энергия движущихся частиц пропорциональна их массе, их взаимная потенциальная энергия увеличивается как квадрат их масс.

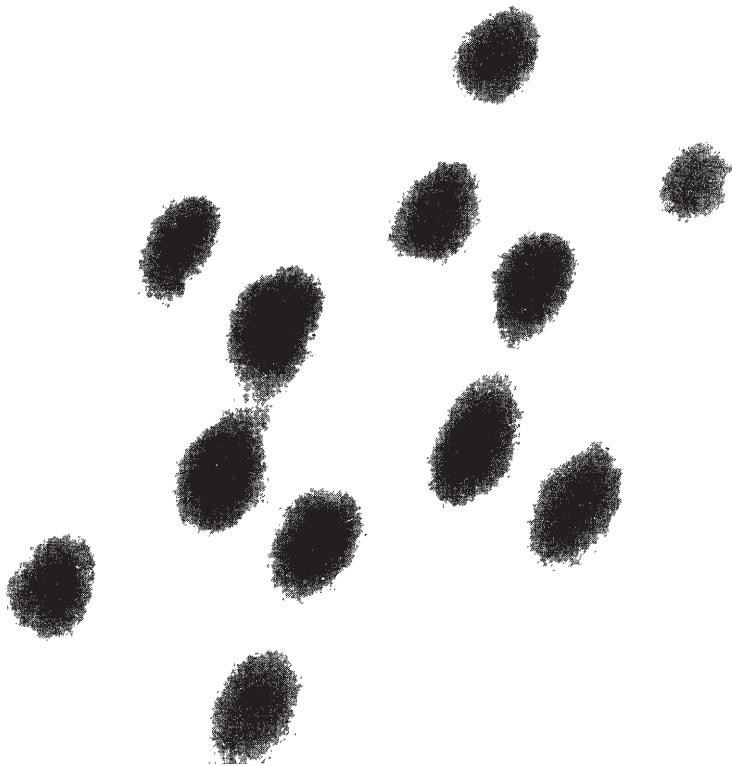
снова притянут их друг к другу. Следует помнить, однако, что большинство числовых данных, относящихся к Вселенной в целом, не очень точны, и вполне возможно, что будущие исследования изменят этот вывод на прямо противоположный. Но даже если расширяющаяся Вселенная вдруг действительно замрет и, повернув в своем движении назад, начнет сжиматься, пройдут миллиарды лет до того страшного дня, который рисовали спиритуэлс¹, — «когда звезды начнут падать» и нас раздавят коллапсирующие галактики!

Но что это было за вещество, из-за взрыва которого осколки Вселенной разлетелись на столь ужасной скорости? Ответ может несколько разочаровать: вероятно, не было никакого взрыва, в обычном смысле этого слова. Вселенная сейчас расширяется, потому что в какой-то предыдущий период своей истории (о котором, конечно же, никаких записей не сохранилось), она сжалась из бесконечности в очень плотное состояние, а затем снова разжалась, если можно так выразиться, под действием мощных сил упругости, присущих сжатой материи. Если бы вы вошли в игровую комнату и увидели мяч для пинг-понга, взлетающий с пола высоко в воздух, вы бы сделали вывод (даже не задумываясь), что за мгновение до того, как вы вошли в комнату, мяч упал на пол с сопоставимой высоты и снова подпрыгнул благодаря своей упругости.

Теперь давайте отпустим нашу фантазию в свободный полет и спросим себя об этапах, предшествовавших сжатию: происходило ли тогда все, что сейчас происходит во Вселенной, в обратном порядке?

Могло ли быть так, что восемь или десять миллиардов лет назад вы читали эту книгу с последней страницы до первой? А так — что люди в то время вынимали жареных цыплят изо рта, вдыхали в них жизнь на кухне и отправляли на ферму, где они вырастали из взрослых до детей, чтобы в итоге заполнить яичную скорлупу и после нескольких недель стать свежими яйцами? Какими бы интересными ни были эти вопросы — с чисто научной точки зрения на них ответить нельзя, так как максимальное сжатие Вселенной, которое превратило бы все вещество в однородную ядерную жидкость, полностью стерло бы все записи о более ранних этапах сжатия.

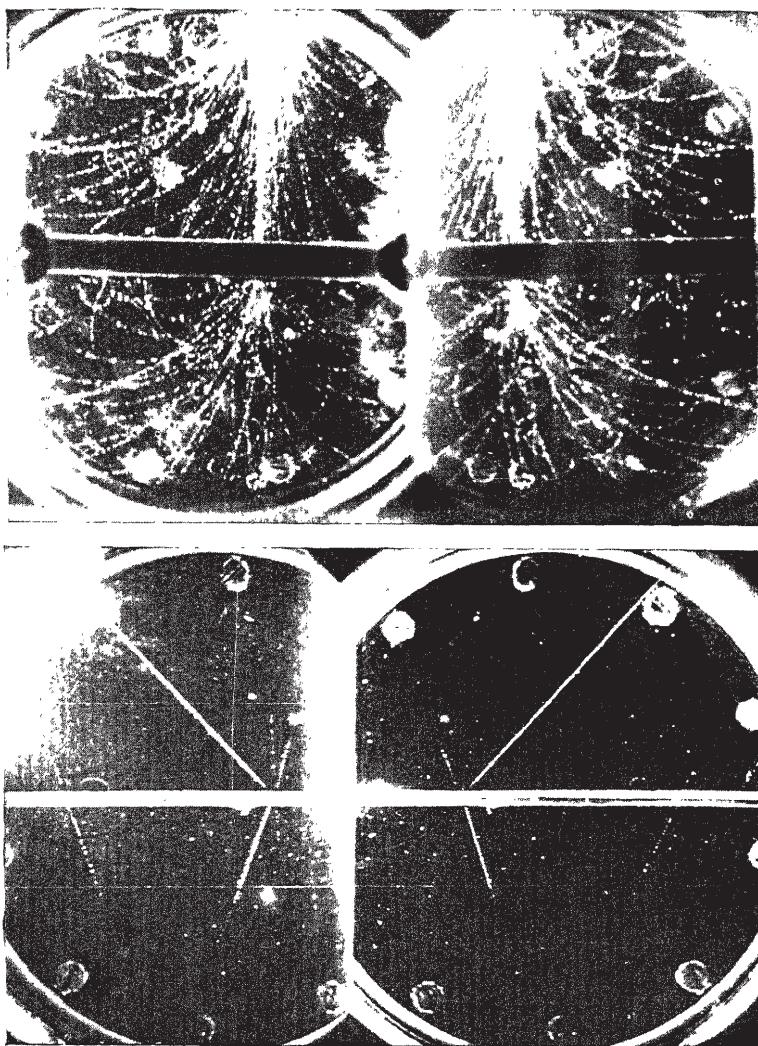
¹ Духовные песни афроамериканцев.



(Фотография любезно предоставлена доктором
М. Л. Хаггинсом. Лаборатория Истман Kodak).

ИЛЛЮСТРАЦИЯ I

Фотография молекулы гексаметилбензола, увеличение
в 175 000 000 раз.

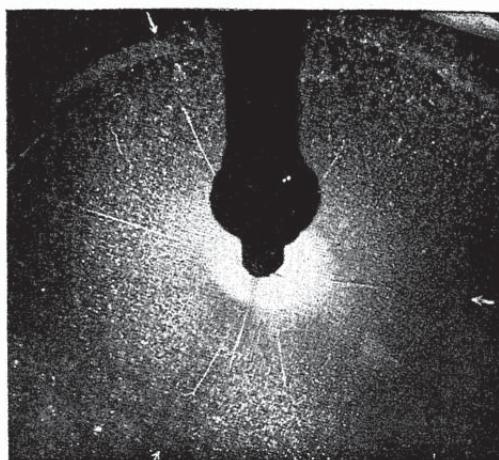
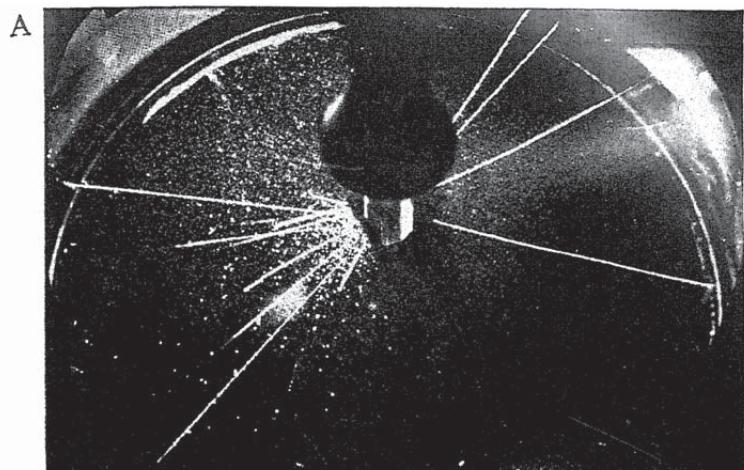


*(Снято Карлом Андерсоном,
Калифорнийский технологический институт.)*

ИЛЛЮСТРАЦИЯ II

А. Поток космического излучения попадает на внешнюю стенку камеры Вильсона и разделяющую ее пополам свинцовую пластину. Электроны с положительным и отрицательным зарядом из космического излучения отклоняются в противоположные стороны магнитным полем.

В. Ядерный распад в центральной пластине, вызванный частицей из потока космического излучения.



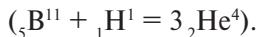
(Снято д-ром Ди и д-ром Фезером в Кембридже.)

ИЛЛЮСТРАЦИЯ III

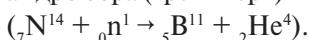
Превращения атомных ядер, вызванные искусственно ускоренными частицами.

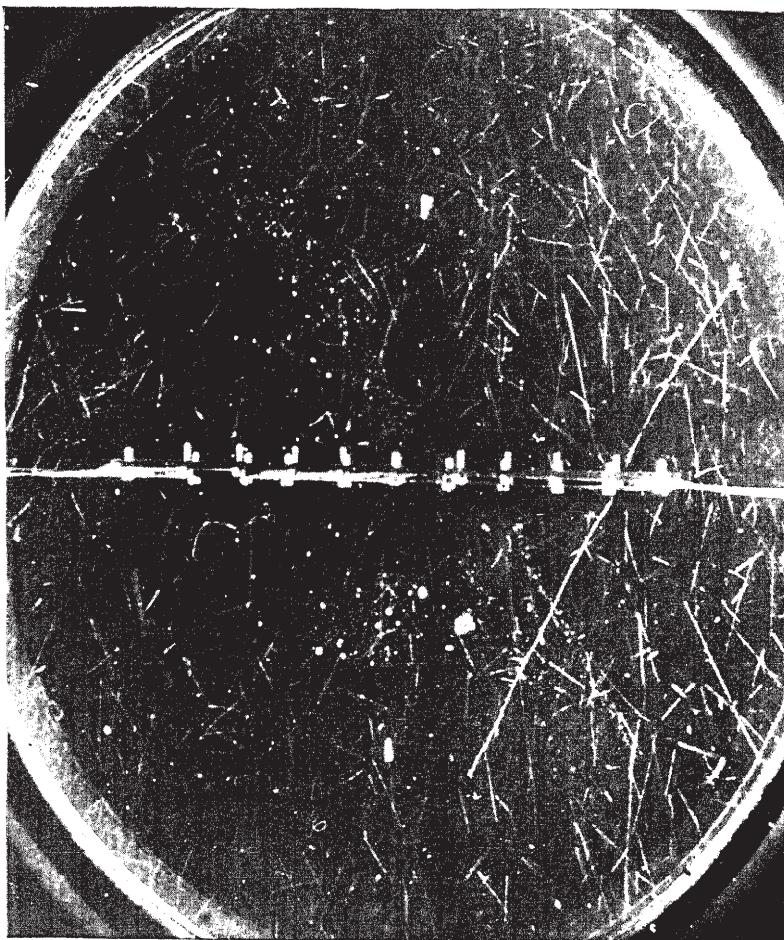
А. Быстрый дейтрон ударяет другой дейтрон из тяжелого газообразного водорода, которым наполнена камера, и производит ядра трития и обычного водорода ($_1D^2 + _1D^2 \rightarrow _1T^3 + _1H^1$).

Б. Быстрый протон ударяет ядро бора и разбивает его на три равные части



С. Невидимый на изображении нейтрон, прилетевший слева, разбивает ядро азота на ядро бора (трек вверх) и ядро гелия (трек вниз)



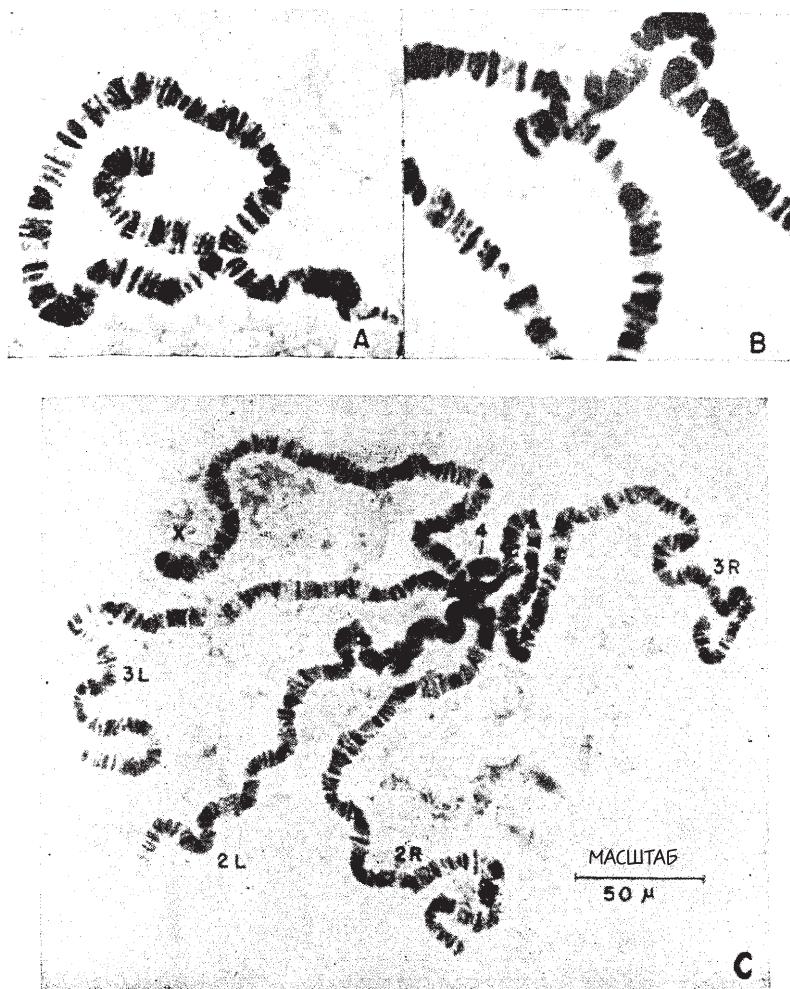


(Снято Т. К. Боггильдом, К. Т. Бростромом и Томом Лауритсеном
в Институте теоретической физики* в Копенгагене.)

ИЛЛЮСТРАЦИЯ IV

Фотография деления уранового ядра, сделанная в камере Вильсона. Нейtron (который на изображении, конечно же, не виден) ударяет одно из ядер урана в тонком слое этого вещества, помещенного поперек камеры. Два трека соответствуют двум осколкам деления, разлетающимся с энергией примерно в 100 МэВ каждый.

* Институт Нильса Бора, Копенгаген. — Примеч. пер.



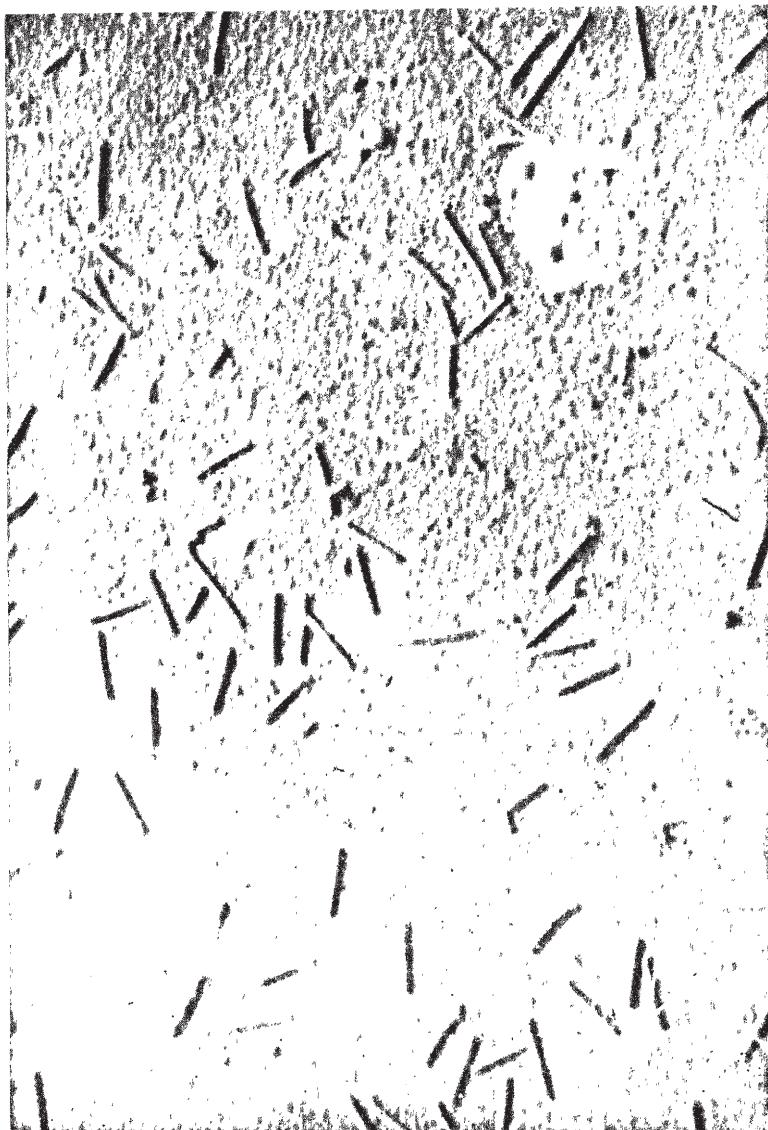
(Из «Справочника по дрозофилам», написанного М. Демерецем и Б. П. Кауфманом, Вашингтон, Фонд Карнеги в Вашингтоне, 1945 год.
 Используется с разрешения мистера Демереца.)

ИЛЛЮСТРАЦИЯ V

А и В. Микрофотографии хромосом слюнных желез *D. melanogaster**^{*}, показывающие инверсионную и реципрокную транслокации.

С. Микрофотография личинки самки *D. melanogaster*. X — тесто спаренные X-хромосомы; 2L и 2R — левое и правое плечо спаренных вторых хромосом; 3L и 3R — третий хромосомы; 4 — четвертые хромосомы.

* Дрозофила обыкновенная. — Примеч. пер.



(Снято д-ром Г. Остером и д-ром У. М. Стэнли.)

ИЛЛЮСТРАЦИЯ VI

Живые молекулы? Частицы вируса табачной мозаики, увеличенные в 34 800 раз. Эта фотография была сделана с помощью электронного микроскопа.

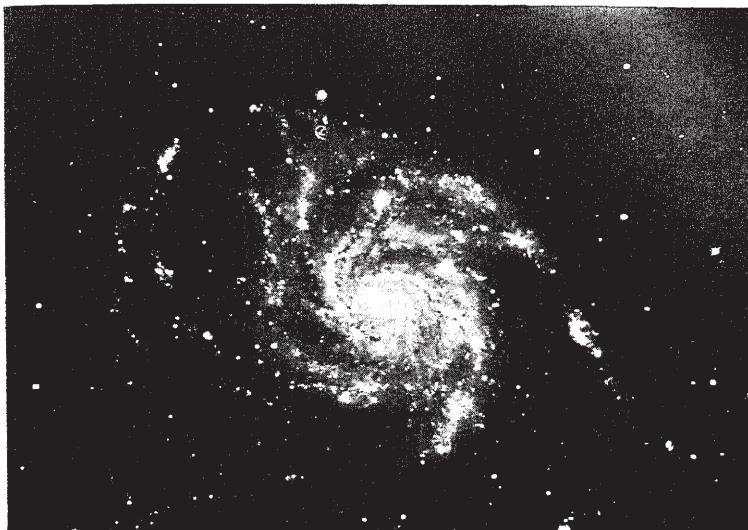
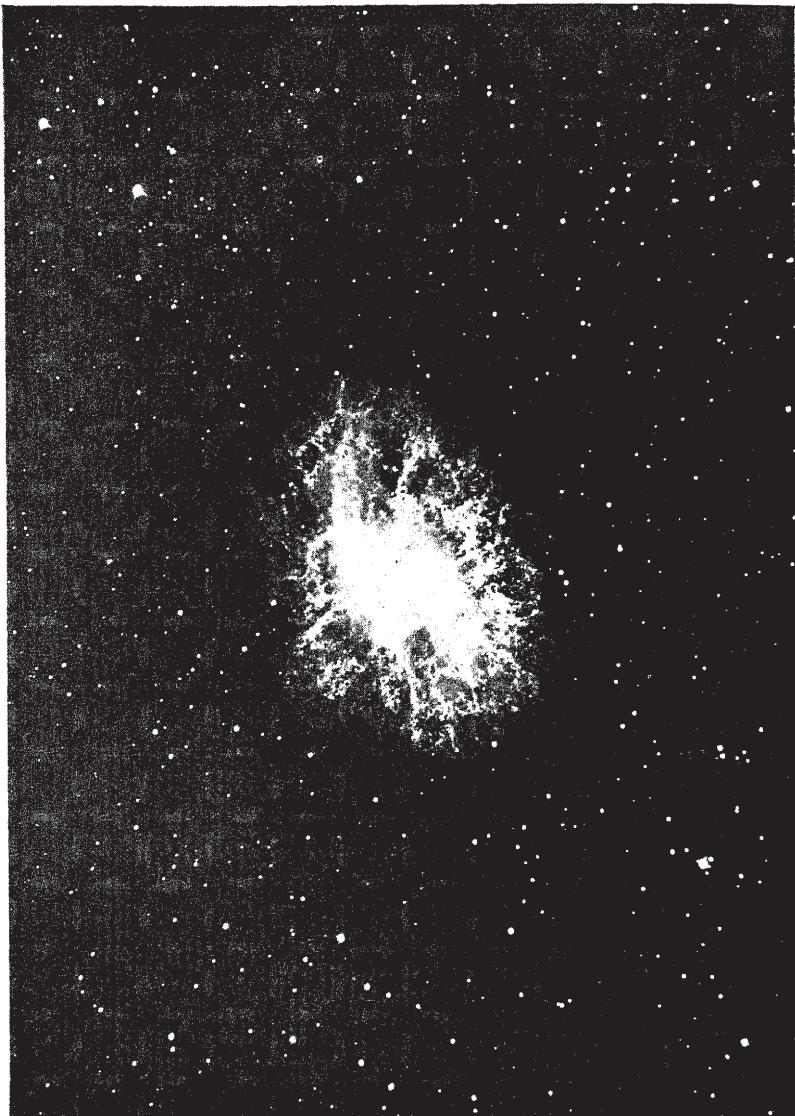


ИЛЛЮСТРАЦИЯ VII

- А. Спиральная туманность в созвездии Большая Медведица, далекая островная вселенная, вид сверху.
Б. Спиральная туманность в созвездии Волосы Вероники, еще одна далекая островная вселенная, вид сбоку.

(Фотографии из обсерватории Маунт-Уилсон.)





(Снято В. Бааде в обсерватории Маунт-Уилсон.)

ИЛЛЮСТРАЦИЯ VIII

Крабовидная туманность. Расширяющаяся оболочка газов, выброшенных сверхновой, которую в 1054 году наблюдали на этом участке неба китайские астрономы.

Содержание

ТРИДЦАТЬ ЛЕТ, КОТОРЫЕ ПОТРЯСЛИ ФИЗИКУ

Предисловие	7
Введение	9
<i>Глава 1.</i> Планк и световые кванты	13
<i>Глава 2.</i> Н. Бор и квантовые орбиты	33
<i>Глава 3.</i> В. Паули и его принцип исключения	61
<i>Глава 4.</i> Л. де Бройль и волны-пилоты	75
<i>Глава 5.</i> В. Гейзенберг и его принцип неопределенности	90
<i>Глава 6.</i> П. Дирак и античастицы	106
<i>Глава 7.</i> Э. Ферми и превращения частиц	124
<i>Глава 8.</i> Х. Юкава и мезоны	132
<i>Глава 9.</i> Ученые за работой	136

ОДИН, ДВА, ТРИ... БЕСКОНЕЧНОСТЬ

Предисловие	145
Предисловие к изданию 1961 года	147
Часть I. ИГРАЯ С ЧИСЛАМИ	149
<i>Глава I.</i> Большие числа	149
<i>Глава II.</i> Натуральные и ненатуральные числа	171
Часть II. ПРОСТРАНСТВО, ВРЕМЯ И ЭЙНШТЕЙН	186
<i>Глава III.</i> Необычные свойства пространства	186
<i>Глава IV.</i> Мир четырех измерений	209
<i>Глава V.</i> Относительность пространства и времени	230
Часть III. МИКРОКОСМОС	259
<i>Глава VI.</i> Лестница, ведущая вниз	259
<i>Глава VII.</i> Современная алхимия	293

<i>Глава VIII.</i> Закон беспорядка	336
<i>Глава IX.</i> Загадка жизни	375
Часть IV. МАКРОКОСМОС	411
<i>Глава X.</i> Расширяя горизонты	411
<i>Глава XI.</i> Дни творения	440

Исключительные права на публикацию книги
на русском языке принадлежат издательству AST Publishers.

Любое использование материала данной книги,
полностью или частично, без разрешения
 правообладателя запрещается.

Научно-популярное издание

Гамов Георгий Антонович

**Тридцать лет, которые потрясли физику
Один, два, три... бесконечность**

Сборник

Ответственный редактор *Г. Веснина*

Научный редактор *А. Шанин*

Художественный редактор *Е. Фрей*

Компьютерная верстка: *Р. Рыдалин*

Технический редактор *Т. Полонская*

Подписано в печать 18.11.2021. Формат 60x90¹/16.

Печать офсетная. Гарнитура Newton.

Усл. печ. л. 30. Тираж экз. Заказ

Общероссийский классификатор продукции ОК-034-2014 (КПЕС 2008);
58.11.1 – книги, брошюры печатные

Произведено в Российской Федерации

Изготовлено в 2022 г.

Изготовитель: ООО «Издательство АСТ»
129085, г. Москва, Звёздный бульвар, дом 21, строение 1, комната 705,
пом. I, 7 этаж.

Наш электронный адрес: www.ast.ru. Интернет-магазин: www.book24.ru.
E-mail: ask@ast.ru. ВКонтакте: vk.com/ast_neoclassic.
Инстаграм: instagram.com/ast_neoclassic

«Баспа Аста» деген ООО
129085, г. Мәскеу, Жүлдөздөй ғұлзар, д. 21, 1 күрүлым, 705 бөлме, пом. 1, 7-кабат
Біздің электрондық мекенжаймыз: www.ast.ru

Интернет-магазин: www.book24.kz Интернет-душен: www.book24.kz
Импортер в Республику Казахстан и Представитель по приему претензий
в Республике Казахстан — ТОО РДЦ Алматы, г. Алматы.

Казакстан Республикасына импорттаушы және Казакстан Республикасында
наразылықтарды қабылдау бойынша өкіл — «РДЦ-Алматы» ЖШС, Алматы
к., Домбровский көш., 3«а», Б. литер оғис 1. Тел.: 8(727) 2 51 59 90,91,
факс: 8 (727) 251 59 92 ішкі 107; E-mail: RDC-Almaty@eksmo.kz, www.book24.kz

Таяу белгісі: «АСТ» Өндірілген жылы: 2022
Өнімнің жарамдылық; мерзімі шектелмеген.



www.ast.ru

ISBN 978-5-17-119976-0



9 785171 199760 >