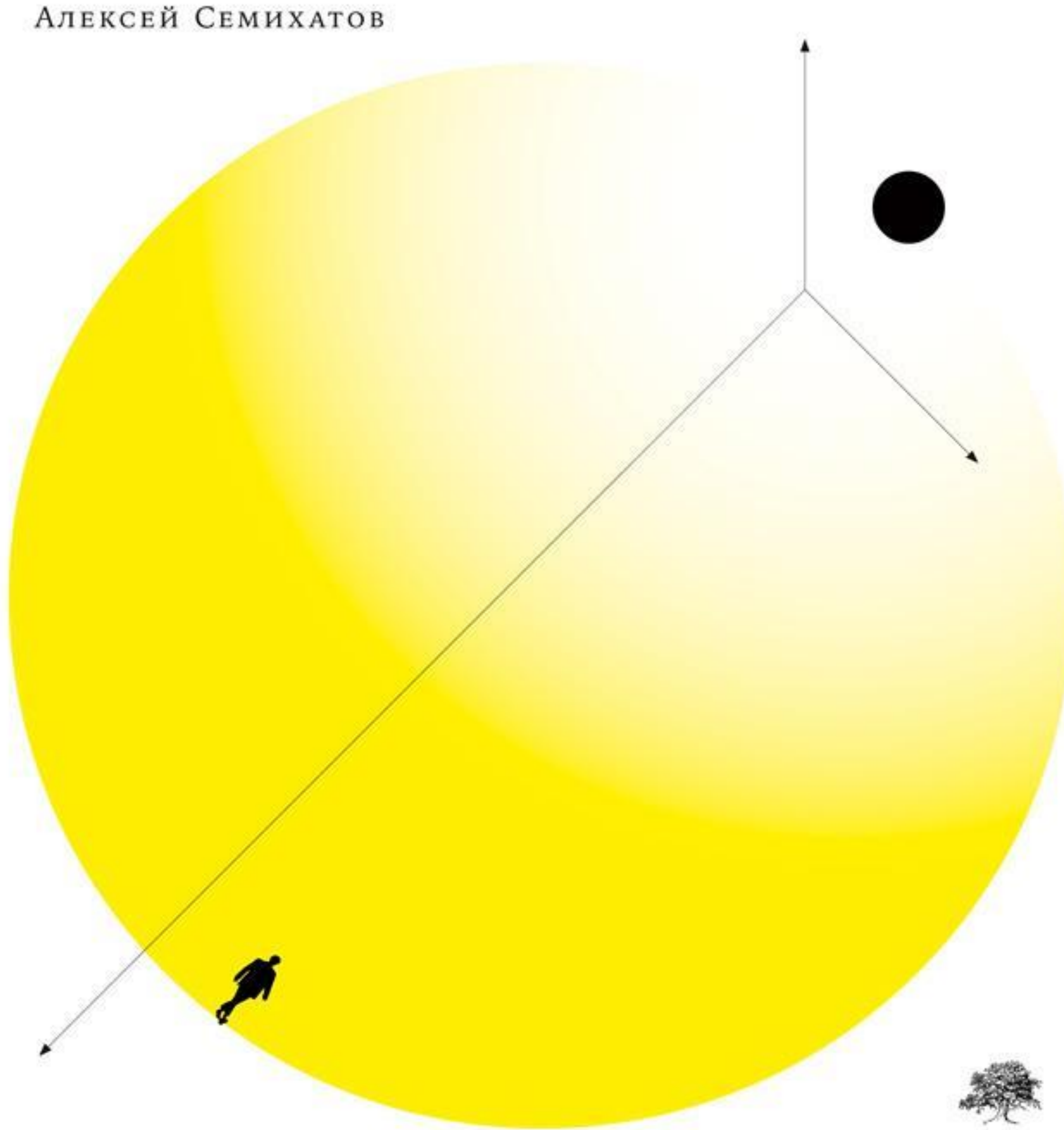
# ВСЁ, ЧТО ДВИЖЕТСЯ

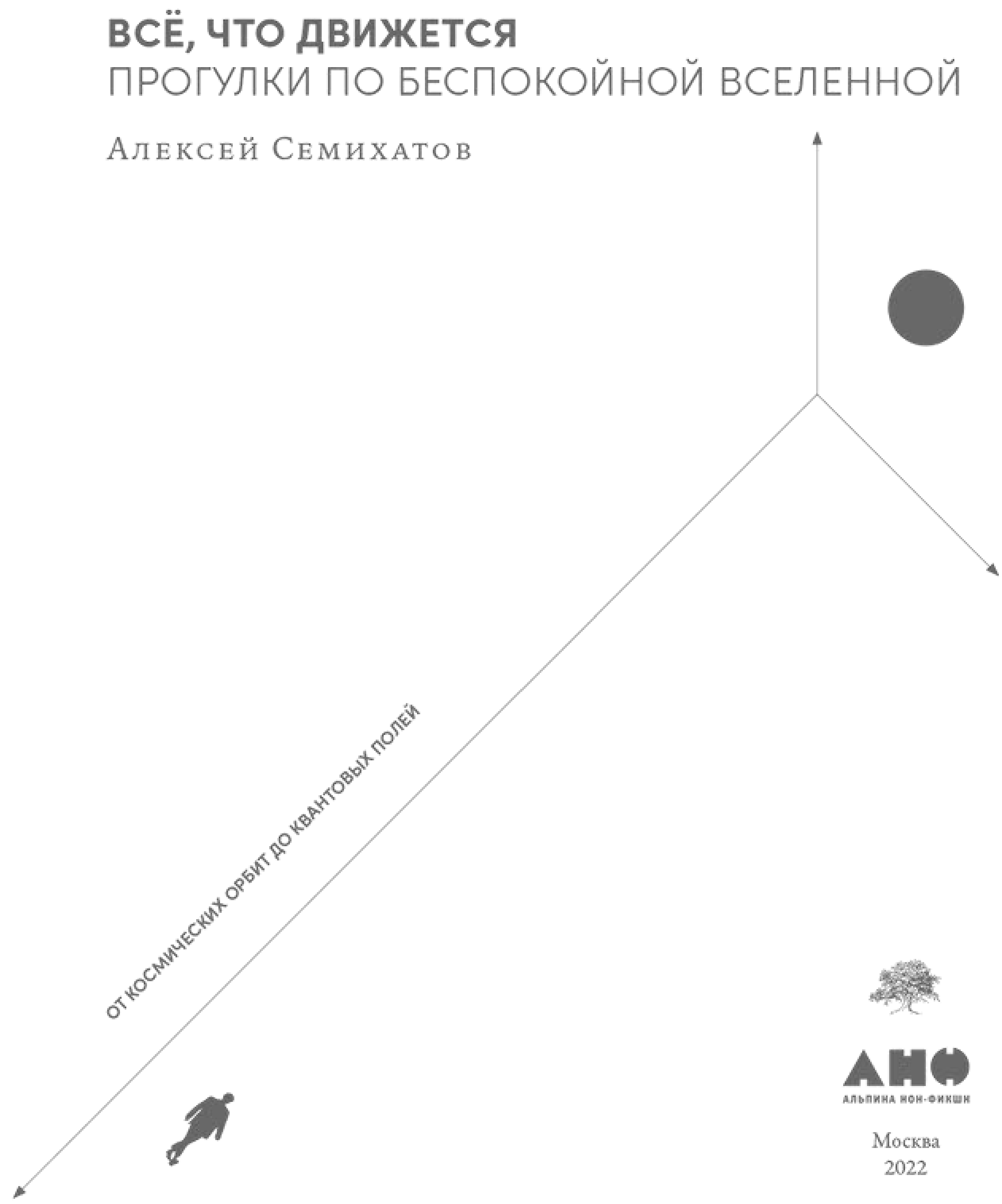
## ПРОГУЛКИ ПО БЕСПОКОЙНОЙ ВСЕЛЕННОЙ

Алексей Семихатов



от космических орбит до квантовых полей

АНФ
АЛЬПИНА НОН-ФИКШН




# Очень короткое предисловие

**О читателе.** Эта книга для тех, кому мысли об устройстве мира приносят больше радости, чем расстройства; для тех, кого они скорее интригуют, чем раздражают.

**О содержании.** Вообще-то самая интересная часть «устройства мира» вокруг нас — это мир людей, но книга не про это, а про то, в чем я понимаю немного больше: про устройство мира неодушевленного, но, впрочем, такого, который сделал возможным появление одушевленного. И интересует меня в этом устройстве, по существу, один-единственный мотив, зато такой, который связан со многими другими. *Вселенная не просто находится в движении, но и в некотором роде существует через движение. В нем соединены пространство, время и материя. Открытие Вселенной началось с изучения движения и во многом* *продолжается так же: наблюдая за движением одних частей мира, мы делаем выводы о существовании и свойствах других.*

**О жанре.** Жанр этой книги — *прогулки*. Прежде всего необременительные (хотя кое-где я все-таки переборщил), имеющие своей целью не рассказать обо всем, а скорее заинтересовать чем-то; всегда можно двигаться дальше, но при желании можно и слегка задержаться там, где что-то привлекло внимание [1]. Не возбраняется и еще раз взглянуть на то, что мы уже видели, но с несколько другой стороны. В книге нет ни претензии, ни попытки излагать историю событий, или людей, или даже идей: несистематические исторические экскурсы — это просто элементы прогулки, а для тех, кого мне удалось заинтересовать, — приглашение к самостоятельному углублению в подробности. В ряде случаев подробности (или отступления, с которыми не удалось совладать) приведены в добавлениях к прогулкам. А в поисках читательского внимания я время от времени выношу на поля то, что хотелось бы особенно отметить. Да, и из-за рода моих занятий это прогулки в первую очередь по теоретическому знанию; практика и эксперимент составили бы отдельную книгу. Литературными комментариями в конце каждой прогулки я пользуюсь не только по их прямому назначению, но в ряде случаев и для того, чтобы сознаться в переупрощениях, неиспользовании стандартных терминов и других серьезных прегрешениях.

**О дисциплине.** Из-за многочисленных и разноуровневых связей идеи движения с другими темами мне следовало держать себя в руках и не отвлекаться на параллельные сюжеты. Полного успеха в таком самоограничении я не достиг. Пожалуй, только предисловие получилось по-настоящему коротким.

# Благодарности

*По прихоти судьбы — разносчицы даров —*
*в прекрасный день мне откровенья были.*
*Я написал роман «Прогулки фраеров»,*

*и фраера меня благодарили.*
Б. Окуджава

Я благодарен времени за то, что оно нашлось. А оглядываясь на это время, я могу только удивляться, как немного сделал я-и-только-я, чтобы эта книга появилась. Первый вариант начальных глав, предвкушая живой отклик, я попросил прочитать Ивана Семенова; он был настолько деликатен, что не только ничего не ответил, но и ни разу впоследствии не дал заподозрить себя в знании, что я хоть что-нибудь написал. Сообразив, что так писать нельзя, я взялся кое-что переделывать — не совсем напрасно, если судить по его же откликам на финальный вариант последних глав. Неоценимыми для меня оказались тренировки по дехаотизации мышления, в которых наряду с другими участвовали Виктория Гинанова, Дмитрий Мамонтов, Василий Панюшкин, Анастасия Решетняк, Валерий Ройзен и Мария Усачева; наши совместные упражнения развивали способность смотреть на вещи, которые я намереваюсь рассказывать, со стороны не рассказчика (т.е. меня самого), а слушателя. Видную роль в качестве этого последнего играл Дмитрий Ликин: он задавал вопросы, а потом отказывался воспринимать мои безнадежно развернутые, *ab ovo*, объяснения, чем поначалу будил негодование в недрах моего «я». Заинтересованной критикой рождающегося текста — критикой, послужившей для меня источником здравомыслия, энергии, решимости и вдохновения, — я обязан Ксении Ануфриевой, Виктории Гинановой, Василию Панюшкину и Марии Попцовой; их замечания и предложения *даже* могли стать причиной заметных улучшений. Алексей Кондратов не только прочитал предварительный вариант (около девяти десятых — что, по-видимому, близко к абсолютному пределу), выказывая при этом удачную комбинацию снисходительности и скептицизма, но и написал блюз «Черная дыра»; возможно, вы уже где-то слышали его исполнение. Сергей Кондратов и Дмитрий Баюк — фактически мои соавторы в двух главах/прогулках (каждый в своей). Кроме более или менее регулярных причин, события, включая и написание книги, могут иметь еще и триггеры, которые косвенно способствуют их реализации; среди тех, кто решительно не ставил себе такой цели, но тем не менее спровоцировал меня на дополнительные усилия (помог, попросту говоря, преодолеть лень), — Ивар Максутов, Максим Карпов, Сергей Серегин, Елена Петровская, Алексей Шилов. Ряд сложных для меня вопросов я обсуждал с Аркадием Цейтлиным и Владимиром Лосяковым; книга, вероятно, была бы лучше, если бы я смог использовать все, о чем они говорили. Я благодарен за разъяснения Алексею Топоренскому и за призывы к стилистической дисциплине Валентину Кориневскому. Интеллектуальные провокации со стороны Михаила Аркадьева помогли мне яснее определить свое позиционирование в пространстве идей. Немало выгоды принесли мне семейные связи: разного рода вопросы и критику я получал от Ксении Семихатовой и ее бабушки (моей мамы) Ирины Красивской. И мне определенно повезло с тем, что предфинальный вариант согласились прочитать Владимир Сурдин и частично Дмитрий Казаков (которые вообще-то являются для меня примером того, как систематически и с вниманием к аудитории рассказывать об устройстве мира). Помимо конкретных исправлений, Сурдин внес несколько предложений, которые я беззастенчиво использовал, не всегда это оговаривая. Я благодарен моему издателю Павлу Подкосову за приглашение, содержавшее в себе не только мотивированный отказ издавать книгу наспех, но и предложение вместо этого подготовить издание с командой «лучших людей», по его выражению. Это предложение имело последствия, включая положительные: многими фрагментами, где мой слог попадает в интервал от приемлемого и выше, я обязан редактору этой книги Петру Фаворову. Он, правда, и не думал ограничиваться слогом и стилем, а принялся методически изводить меня пожеланиями, плавно переходящими в требования, внести смысл туда, где его наличие вызывало у него сомнения (совершенно обоснованные, как я раз за разом убеждался). Под его неослабным давлением пришлось сделать то, что обычно бывает при подготовке второго издания, если книга удостаивается такого отличия: исправить глупости и разобраться с немалым числом неоднозначных и путаных формулировок, временами граничивших с ошибками. Одним словом, я бессовестно сел на шею Фаворову, сделавшему для создания новой версии ничуть не меньше меня, и в результате читателю уже сейчас фактически предлагается второе, «дополненное, исправленное и существенно переработанное» издание. (Первое, благо было в дюжине экземпляров, быстро разошлось.) Последующее научное редактирование, за которое неожиданно согласился взяться Сергей Нечаев, имело благотворные результаты в виде освежающей критики и сопутствующей ей расстановки смысловых точек над «і», включая такие, о существовании которых я ранее и не подозревал; в результате я открыл для себя новые связи между вещами, а в тексте появилось несколько уточняющих и дополняющих пояснений. Помимо всех этих «непосредственных» факторов, неоспоримо влияние, которое на меня оказали полтора десятка лет развития отношений с книгами того сорта, к которому я надеюсь присоединить и эту: благодаря Д. Б. Зимину (1933–2021) я имел обязанность и привилегию каждый год читать две дюжины книг о науке для широкого читателя, а затем — удовольствие обсуждать их в компании заинтересованных людей, которым Зимин доверил ту же задачу и к которым со страстью присоединялся (наряду со многим другим, что он делал для поддержания читающей, интересующейся, думающей среды). А прочитанные при этом книги оставили мне лишь небольшую незанятую область в гиперпространстве смыслов, из-за чего я начисто избежал мучительных раздумий, про что же писать.

И при всей благосклонности судьбы, которую она, возможно, проявляла по сей момент к этому замыслу, она не смогла бы помочь мне без постоянной вдохновенной и вдохновляющей поддержки моей жены Наташи.

# ЧАСТЬ 1

# КОСМИЧЕСКИЕ ПРОГУЛКИ

Прогулка 1

# Движение по правилам

**Маршрут:** *От качества к количеству. — Открытие Солнечной системы. — Относительность и инерция. — Законы движения. — Всеобщее притяжение. — Уравнения движения. — Больше чем Кеплер. — Движение как организация.*

**Главный герой:** *Иоганн Кеплер*

---

**От качества к количеству.** Планеты — т.е. *блуждающие* среди звезд — сопровождали человечество со времени первых сколько-нибудь раздумчивых взглядов в ночное небо. Вид этого неба с тех пор несколько изменился, хотя и не сильно, но наша острота взгляда и способность делать выводы из наблюдений развились фантастически — хотя сказать так, пожалуй, является даже умалением. Процесс начал самоускоряться, когда от наблюдения за движением планет и вещей мысль обратилась к причинам движения; от констатации наблюдаемого — к предсказаниям того, какое движение должно наблюдаться. Сейчас на основе всего достигнутого нашей научно-технической цивилизацией мы в огромной мере разделяем уверенность, что искать фундаментальные причины и формулировать законы природы — предприятие не просто осмысленное, но и чрезвычайно полезное и что Вселенная познаваема, по крайней мере до некоторой степени. Но легко рассуждать задним числом, стоя на плечах гигантов. Греки были лишены подобной привилегии, и у них, по-видимому, не было ясного представления о таких законах: они не сформулировали четкого закона движения, например, для выпущенной из лука стрелы. Тела падают, потому что их место — на земле, и к этой «цели» все они и стремятся. Наблюдения над поведением вещей подытоживались рассуждениями Аристотеля, который различал «естественное движение», т.е. движение к естественному состоянию, и «насильственное движение», т.е. происходящее против естества (а для объяснения сложных случаев, таких как стрела, которая все же летит некоторое время вверх, хотя естественное место ее на земле, потребовалось и «смешанное движение»).

С нашим современным умением пользоваться законами природы и представлением, что они действуют «через причины», довольно трудно принять античную точку зрения, искавшую закономерности в математическом мире, но не предполагавшую их неотвратимого и однозначного действия в мире физическом. Согласно Аристотелю, движение вообще невозможно описывать математически и изучение природы — «физика» — может строиться только качественно; сама идея приписывать качествам какую-то численную меру появилась только в Средние века. Но что же и потом довольно долго мешало разглядеть, что стрела летит по математически строгой траектории, называемой параболой? Среди прочего — тот простой факт, что стрела *не* летит по параболе. Сопротивление воздуха «портит» параболу и превращает ее во что-то сложное — почти буквально «смешанное». В реально наблюдаемых нами процессах многие факторы *путаются*. Чтобы сформулировать принципы, которыми управляется происходящее, часто (да почти всегда) требуется отделить одно от другого (и от третьего, и от четвертого — влияний разного рода, как правило, много). В целом ряде сложных явлений мы сумели разобраться, выделив в них несколько факторов, каждый из которых действует относительно просто, и поняв, как эти разные факторы влияют друг на друга. Ключевая идея, таким образом, состоит в том, что некоторый главный эффект может до некоторой степени «портиться» всяческими дополнительными влияниями. Но, чтобы увидеть главный эффект во всей его полноте и строгости, иногда требуется проделать работу по реальному или воображаемому устранению этих влияний. Идеальные проявления законов природы могут поэтому оказаться абстракцией, но такие абстракции доказали свою полезность в практическом плане. Да, тело, запущенное под углом к горизонту, не летит по математически строгой параболе; но любой артиллерийский офицер эпохи Наполеоновских войн сказал бы, что пользы от «нереализуемой» параболы все равно много: она математически точна и проста, и, хотя она дает лишь некоторое приближение к реальности, для учета сопротивления воздуха в разных обстоятельствах и других эффектов имеются таблицы поправок при прицеливании. Такой подход к описанию реальности (заметно отличный от аристотелевского) колоссально расширил наше понимание Вселенной [2].

*****

**Открытие Солнечной системы.** Впечатляющий шаг к ключевой идее, что законы мироустройства *можно* извлечь из наблюдений, был сделан при рассмотрении «идеального», как все еще казалось тогда, мира небесных тел и потребовал точных наблюдений планет на небе. Их выполнил в последней трети XVI в. Тихо Браге, происходивший, как бы теперь сказали, «из олигархов», что (нисколько не умаляя его приверженности точным и систематическим наблюдениям) способствовало наличию у него лучших из имевшихся тогда — до изобретения телескопа! — приборов. К составленным им таблицам с данными наблюдений в конце концов получил доступ сильно желавший этого Иоганн Кеплер — человек определенно не аристократического происхождения, упорство и гениальность которого в итоге превратили колонки чисел в математические кривые. Орбиты планет, как смог усмотреть из таблиц Кеплер, представляли собой эллипсы, причем Солнце располагалось вовсе не в центре, а несколько в стороне, в одном из двух фокусов (рис. 1.1); картина не очень симметричная, потому что во втором фокусе ничего нет.

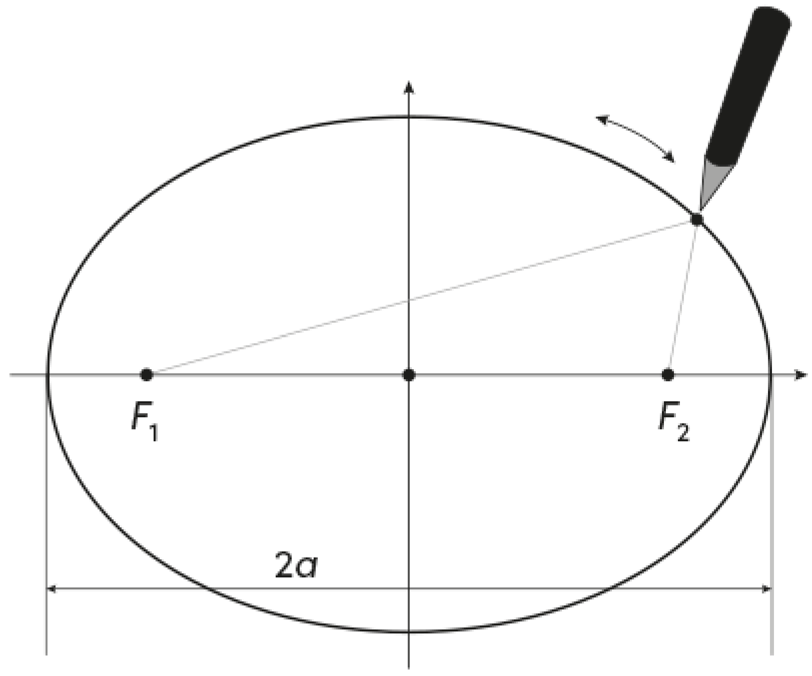



**Рис. 1.1.** Эллипс интереснее окружности. Он определен тем, что сумма расстояний от каждой его точки до двух фиксированных точек (фокусов) постоянна. Поэтому нарисовать эллипс проще всего, закрепив в этих точках концы нитки и держа карандаш так, чтобы нитка всегда была натянута. Показано расстояние 2*a* между двумя самыми удаленными друг от друга точками эллипса. Его половина, *a*, называется большой полуосью

Космический телескоп, запущенный в 2009 г. и вооруженный самыми современными технологиями для поиска планет у других звезд (иначе говоря, экзопланет), получил имя «Кеплер». При этом в мире Иоганна Кеплера звезды были огнями на самой дальней из твердых сфер — какие уж там планеты! — и даже в том, что касается Солнечной системы, он и не подозревал о существовании Урана и Нептуна. И уж тем более там не было места рукотворным изделиям, отправленным путешествовать теми же путями, что планеты. Подходящее ли это название для космического телескопа?

Задача, которую решал Кеплер в первые годы XVII в., — найти форму (и относительные размеры) орбиты каждой из планет — осложнялась тем, что наблюдения за движущимися планетами велись с Земли, которая сама тоже двигалась каким-то образом (как одна из планет, должен был рассуждать Кеплер; но *как именно*? Заранее неизвестное движение Земли требовалось некоторым образом «вычесть» из результатов наблюдений). В этом смысле таблицы Тихо Браге носили несколько «внутренний» характер, как если бы Аристотелю были доступны только видео летящей стрелы, снятые с других стрел. И даже хуже того: наблюдаемые «положения» планет — это не их положения в пространстве, пусть и относительно Земли, а только *направления* на эти их положения в пространстве. И на небе они ведут себя не самым регулярным образом, время от времени меняя направление своего перемещения на фоне звезд (рис. 1.2). Ответ же, данный Кеплером на вопрос о движении вокруг Солнца всех планет, включая и Землю, носит совершенно «внешний» характер: мы вслед за Кеплером рисуем эллипсы так, как будто видим Солнечную систему со стороны. По сей день ни один наблюдатель, ни один беспилотный космический корабль не смотрел на Солнечную систему извне, чтобы в течение достаточно долгого времени — скажем, пары десятков лет — *как на картинке* удостовериться, что планеты вычерчивают эллипсы. И тем не менее в этом нет ни малейших сомнений. Я с трудом могу вообразить, как такой взлет мысли — переход от «внутренней» перспективы к «внешней», казалось бы немыслимой в век, когда и Земля-то не вся была исследована, — вообще мог произойти в голове отдельно взятого человека в 1600–1609 гг. [3] Словами Эйнштейна:

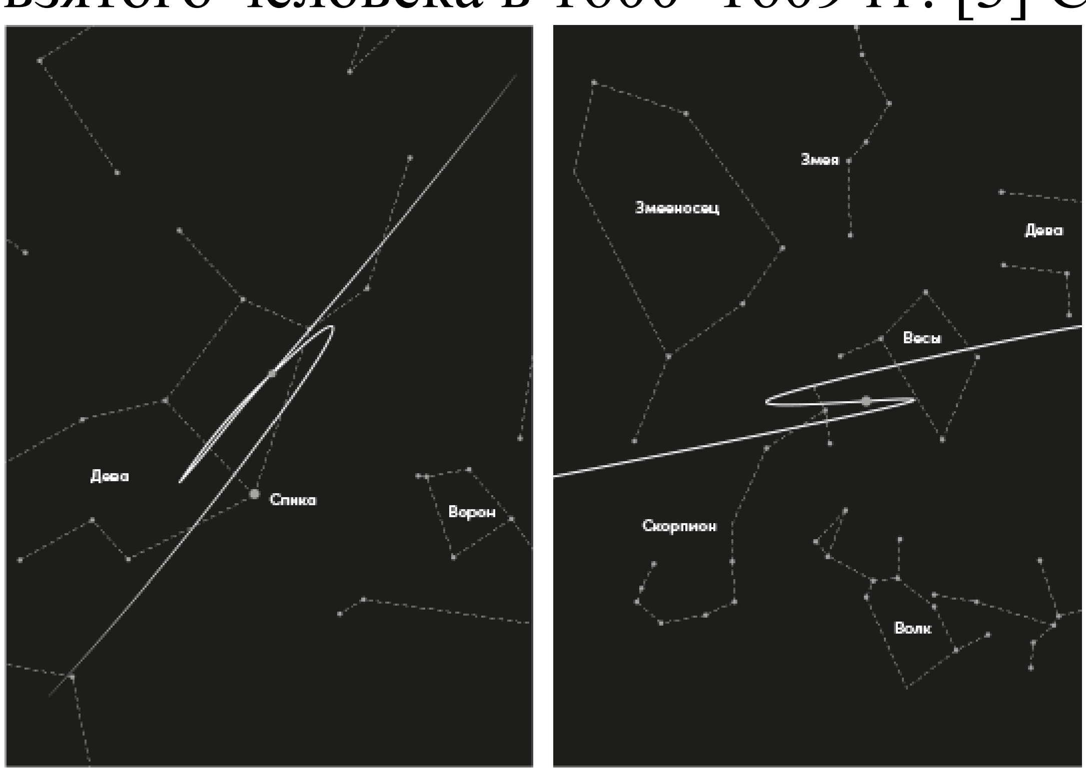



**Рис. 1.2.** Два фрагмента пути, по которому Марс движется на небе

> Он жил в эпоху, когда не было еще уверенности в существовании некоторой общей закономерности для всех явлений природы. Какой глубокой была у него вера в такую закономерность, если, работая в одиночестве, никем не поддерживаемый и мало понятый, он на протяжении многих десятков лет черпал в ней силы для трудного и кропотливого эмпирического исследования движения планет и математических законов этого движения! [4]

Больше того, Кеплер жил в эпоху, когда ему в течение нескольких лет приходилось всерьез заниматься защитой своей матери от обвинений в колдовстве; женщине реально грозил костер.

Кеплер сформулировал три высказывания. Они известны как три закона Кеплера.

1. **Про эллипсы как таковые.** Орбиты — эллипсы; Солнце — в одном из фокусов. Это был грандиозный успех, превращение наблюдений — сырых данных о движении планет по небу — в математическое высказывание и одновременно с этим колоссальный прорыв в соотнесении наших представлений об идеальном с реальностью. Ведь вполне естественно было думать, что «природа предпочитает совершенство» в виде сфер и круговых орбит, с Солнцем в центре, но, во-первых, Кеплер понял, что это не так, а во-вторых, сумел показать, как же все происходит на самом деле, причем это второе — с математической точностью (окружность — частный случай эллипса; в этом смысле орбиты могли бы быть и круговыми, просто они такими не оказались).

2. **Про скорость движения по этим эллипсам.** Она, оказывается, не постоянная. Кеплеру принадлежит ясная формулировка, из которой следует, в какой части эллипса планета движется быстрее и в точности во сколько раз быстрее, чем в какой-нибудь другой части. Закон так закон! — ему следуют *все* планеты, включая Землю. Чтобы его сформулировать, Кеплер снова приглашает нас посмотреть на орбиты со стороны и делает геометрические построения, проводя воображаемую линию от Солнца к планете и рассуждая о том, как эта линия поворачивается. Это довольно удивительно, если учесть, что никакой такой «линии» нет, но математические рассуждения с ее использованием позволяют сформулировать правило, описывающее реальные движения всех планет. Сравнивая положение планеты на орбите «сейчас» и, скажем, через день, Кеплер просит нас обратить внимание на площадь фигуры, образованной двумя радиусами и участком орбиты, который планета прошла за день. Второй закон Кеплера состоит в том, что *площадь* такого треугольника, заметаемого за выбранное время (скажем, день), — одна и та же вдоль всей орбиты.

Там, где планета ближе к Солнцу, она движется как раз настолько быстрее, чтобы скомпенсировать меньшую высоту треугольника (расстояние от Солнца). Разница в скоростях вблизи Солнца и вдали от него велика для вытянутых эллипсов; для Земли же максимальная и минимальная скорости составляют 30,29 км/с и 29,29 км/с (соответствующие расстояния до Солнца при этом 147,09 млн и 152,10 млн километров). Земля ближе к Солнцу и движется быстрее, когда в Северном полушарии осень и зима, из-за чего этот прекрасный сезон формально оказывается укороченным на несколько дней. (Пять миллионов километров ближе или дальше от Солнца — далеко не первостепенный фактор, влияющий на климат.)

3. **Про то, как размеры эллипсов, по которым движутся разные планеты, соотносятся с временем их полного оборота вокруг Солнца.** Не только каждая планета сама по себе следует законам, но и каждая пара планет подчиняется строгой и одной для всех математике. «Размером» эллипса в данном случае является его большая полуось — расстояние от *центра* (а не от Солнца!) до точки наибольшего удаления. Для любой пары планет Кеплер предлагает поделить друг на друга их большие полуоси, а результат возвести в квадрат. В качестве второго действия нужно поделить друг на друга продолжительности года на каждой планете, а результат этого деления возвести в куб. Получится, говорит Кеплер, одно и то же. Чем дальше планета от Солнца, тем больше времени занимает ее полный оборот — не *только* из-за того, что орбита длиннее, но *еще и* из-за того, что скорость планеты меньше (в 4 раза дальше — в 8 раз дольше; в 9 раз дальше — в 27 раз дольше).

Кеплер начал с определения формы орбиты Земли, потом это сильно облегчило ему задачу найти форму всех других орбит. Но как же было подступиться к орбите тела, *с которого* были сделаны все наблюдения? Понадобилось третье, кроме Земли и Солнца, тело, а именно — Марс. Но, поскольку орбита Марса была равным образом неизвестна, Кеплер использовал его как источник некоторого набора отдельных точек («дискретной» информации). Ключ —

момент, когда Солнце, Земля и Марс оказались на одной прямой. (Такое положение трех тел *случается* с неплохой точностью, потому что орбиты Земли и Марса лежат почти в одной плоскости; Земля при этом совершает один оборот вокруг Солнца быстрее, чем Марс.) Направление этой прямой относительно звезд следовало зафиксировать; оно сыграет «опорную» роль. А далее — вот источник дискретности в применяемой схеме! — требовалось знать продолжительность марсианского года (это отдельный вопрос, ответ на который у Кеплера был). Через один марсианский год Марс окажется снова на той же прямой, но Земля нет. Для наблюдателя с Земли Марс и Солнце будут видны под некоторым углом друг к другу. Этот угол, который можно непосредственно измерить, — полдела. Вторая половина — это линия «Солнце — Земля» в этот же момент: необходимо определить ее направление относительно звезд, что позволит найти угол, который она образует с «опорным» направлением. Принимая расстояние от Солнца до Марса в «опорном» положении за единицу, находим треугольник по стороне и двум углам. Мы определили (!) точку на земной орбите. После этого все вычисления *надо повторить*, найдя в таблице положение Марса и Солнца относительно звезд еще один марсианский год спустя, и еще один и так далее. Каждый раз таким образом появляется по точке; Кеплер сумел уложить все эти точки на слабо вытянутый эллипс (*не* поддавшись искушению заявить о круговой орбите в пределах точности вычислений!). Когда орбиты всех планет были найдены, настала очередь следующей задачи — угадывать законы *движения* планет по этим орбитам. Это означало делать какие-то допущения (с каких начать?!), проверять их, определяя с помощью таблиц пространственное положение планет в разные моменты времени, и если допущения не подтверждались, то придумывать и проверять другие. Перед нами одинокий человек в окружении пустоты и сферы звезд, вооруженный числовыми таблицами данных и одержимый страстным желанием своими силами разобраться в устройстве известного ему мира.

Кеплер не открыл для нас планеты — они были известны с доисторических времен. Но он в некотором роде открыл для нас Солнечную систему, показав, какова в ней *система* — какой порядок там действует. Сейчас все предсказания, скажем, взаимного расположения Земли и Марса, необходимые для планирования путешествий между ними, математически делаются на основе тех самых кеплеровых эллипсов (хотя и требуют на фоне главного эффекта учитывать ряд дополнительных факторов, с которыми у нас будет еще немало поводов познакомиться). Про орбиты планет, да и не только планет, часто говорят «кеплеровы». Космический телескоп «Кеплер» проработал (не без приключений) до 2018 г., исследовав в общей сложности 530 506 звезд и открыв 2662 экзопланеты. Небольшая выборка экзопланет, сравнимых с Землей по размеру и находящихся в зоне обитаемости [5], приведена на рис. 1.3. Поиск таких объектов заведомо невозможен без знания о том, что искомые планеты — о существовании которых Иоганн Кеплер не мог и помыслить — движутся вокруг своих звезд по кеплеровым орбитам. По-моему, «Кеплер» — подходящее название для такого телескопа.


**Рис. 1.3.** Земля и несколько экзопланет. Данные им названия отражают тот факт, что они открыты с помощью космического телескопа «Кеплер»

*****

**Относительность и инерция.** Современник Кеплера Галилей *не* бросал предметы с колокольни на Кампо-деи-Мираколи в Пизе, за возможным исключением незадокументированных случаев баловства [6]. Галилей первым всерьез направил телескопическую трубу в небо и совершил революционные открытия (включая спутники Юпитера, кольца Сатурна, горы на Луне, пятна на Солнце и фазы Венеры); однако среди тех многочисленных вещей, которые он постоянно был готов обдумывать, предметом его долгосрочного интереса было движение.

Для нас важны два глубоких свойства движения, осознание которых началось с Галилея: относительность и инерция. Галилей усматривает их в природе вещей с помощью того, что ему неизменно удавалось с блеском: он извлекает «идеальные» следствия не из идеальных, а вполне реальных опытов, а также применяет логический анализ путем постановки *мысленных* экспериментов. Успехи в таком подходе к исследованию природы, собственно говоря, и снискали ему титул основоположника научного метода (что, впрочем, известно нам сейчас, но не было известно ему самому). Если художник рисует натуру, находясь вместе с ней в каюте на корабле, который плавает в виду берега, то при *идеальном* состоянии моря, рассуждает Галилей, художник может забыть, что он находится не на берегу, а на корабле; ничто не будет мешать созданию картины. Но на взгляд людей, стоящих на берегу, рука художника участвует в движении, включающем движение самого корабля. Следовательно, если корабль не качается и не дергается, его движение не оказывает никакого влияния на происходящее в каюте. Отсюда происходят две идеи: одну впоследствии стали называть принципом относительности, а другая, важная для Галилея (и неизменно важная с тех пор), — независимость движений, т.е. движение кисти относительно холста и движение холста относительно берега независимы. Развивая именно этот тезис, Галилей стал первым, кто теоретически *получил параболу* для «стрелы» (тела, брошенного под углом к горизонту). Исходя из того, что горизонтальное и вертикальное движения независимы, он замечает, что горизонтальное движение равномерно, а вертикальное ускоренно; их сложение и дает параболу — вывод, который Галилей считал одним из главных результатов своей теории движения.

Галилею принадлежит и сама идея равноускоренного падения, причем одинакового для всех тел [7]. Доминировавшая до того точка зрения опиралась на представление о естественности равномерного движения; это, по-видимому, должно было означать, что после разжатия руки яблоко сразу приобретает ту скорость, с которой ударится о землю. Исходный же пункт рассуждений Галилея состоял в том, что падающие тела, когда им «ничто не мешает» (что тоже не так просто организовать), изменяют скорость по мере того, как падают. Но *как* меняется скорость? Галилей установил, что скорость увеличивается в течение всего падения и что тело последовательно проходит «через все градусы скорости» (этот подход, существенно расходящийся со взглядами Аристотеля, присутствует уже здесь, хотя и не принадлежит лично Галилею: приписывать качествам определенные «градусы» — не античная, а средневековая идея). Довольно долго он думал, что скорость увеличивается равными порциями через равные отрезки пути, но потом логическими рассуждениями отверг эту идею, а вместо этого показал, что скорость растет равными порциями за равные промежутки времени — пропорционально времени, как мы бы сейчас сказали. Я часто напоминаю себе, что все это происходило в отсутствие часов, хоть сколько-нибудь пригодных для точных измерений, и — что, может быть, даже более важно — до *формализации понятия ускорения* [8]. Три с половиной столетия спустя, 2 августа 1971 г., командир «Аполлона-15» Дейв Скотт, стоя на поверхности Луны перед своим лунным модулем, произнес, глядя в камеру:

Вот в левой руке у меня перо, а в правой — молоток. И можно сказать, что одной из причин, по которой мы сюда добрались, был джентльмен по имени Галилео, живший очень давно, который сделал довольно существенное открытие о падающих телах в гравитационных полях. И мы подумали: где найти лучшее место, чтобы подтвердить его результаты, как не на Луне? Так что мы решили, что попробуем это вам сейчас показать. <…> Я отпущу оба предмета, и, будем надеяться, они достигнут поверхности одновременно.

[*Он разжимает перчатки — молоток и соколиное перо падают на лунную поверхность в согласии с ожиданиями.*]

Как вам такое?!

Справедливости ради надо сказать, что Галилей развивал не идею притяжения, а тезис о *естественности* равноускоренного движения; тем не менее одинаковое ускорение для всех падающих тел в отсутствие сопротивления воздуха — его открытие.

### *Как тебе такое, Галилео Галилей?*

Кроме того, Галилей смог усмотреть в свойствах движения то, что позднее стали называть инерцией (склонность движущихся тел сохранять свое состояние движения или в частном случае — покоя), хотя слова «инерция» сам Галилей не употребляет. Свойство *каждого* тела двигаться по инерции не вполне очевидно на первый взгляд, потому что мы воспринимаем разные свойства вещей одновременно: тела вокруг нас *не* сохраняют состояние своего движения из-за того, что на них действует сила трения или сила сопротивления среды. Не зная заранее всех действующих здесь факторов, не так легко выделить свойство инерции и объяснить, как оно проявляет себя, когда других факторов нет. Здесь снова в полной мере потребовалась способность Галилея логически доводить постановку эксперимента до некоторого предела — скажем, предела исчезновения трения, — добиться которого в реальности невозможно, но свойства которого тем не менее делались ясными исходя из шагов, приближающих реальную постановку к идеальной.

Галилею же принадлежит мысль, что книга природы написана языком математики:

> Я распознал у Сарси твердое убеждение в том, будто при философствовании необычайно важно опираться на мнение какого-нибудь знаменитого автора <…> В действительности же, синьор Сарси, все обстоит не так. Философия написана в величественной книге (я имею в виду Вселенную), которая постоянно открыта нашему взору, но понять ее может лишь тот, кто сначала научится постигать ее язык и толковать знаки, которыми она написана. Написана же она на языке математики, и знаки ее — треугольники, круги и другие геометрические фигуры, без которых человек не смог бы понять в ней ни единого слова; без них он был бы обречен блуждать в потемках по лабиринту [9].

Вопрос о том, *почему* математика настолько эффективна в естественных науках, обсуждался многократно, и простого ответа на него нет, но рассуждения и примеры, приводимые различными авторами, читать интересно. Как бы то ни было, математика снабжает нас «движком» для того, чтобы делать выводы. Она особенно ценна в этом качестве, когда мы выходим за пределы области, где помощником может служить «здравый смысл». Это набор представлений, выработанных в рамках нашего ограниченного опыта, и они вполне могут отказывать (и отказывают!), когда этот опыт расширяется. Как следствие такого положения вещей математика скрыто присутствует почти везде на этих прогулках.

*****

**Законы движения.** Но почему три закона Кеплера таковы? Почему Солнце в фокусе? Почему планеты движутся именно так?

Ответ на каждое «почему» должен опираться на нечто, что принимается без объяснения, иначе никакое объяснение не останавливается и поэтому перестает быть объяснением. Ответы, которые удается дать довольно близко к тому уровню, где уже приходится разводить руками, называются фундаментальными. В момент формулировки законов Кеплера они сами, вероятно, считались бы фундаментальными, реши тогда кто-нибудь классифицировать подобные утверждения таким образом. Как-никак эти законы были приложимы ко всем известным планетам. Но 80 лет спустя уже нельзя было так думать, потому что фундаментальными оказались другие законы — Ньютона [10]. И это были законы совсем другого сорта. Из них следовало *множество* утверждений, включая и эллипс для планеты, и параболу для стрелы, не испытывающей сопротивления воздуха (и заодно — направление мысли, позволяющее как-то учесть это сопротивление). События начали разворачиваться стремительно, потому что фокус внимания сместился на *причины*.

Причины наблюдаемых движений Ньютон сформулировал в виде *законов движения* — утверждений совсем иного свойства, чем законы Кеплера. Законы Ньютона напрямую ничего не говорили о том, по какой траектории полетит стрела или планета! Вместо этого они предлагали всем заинтересованным лицам действовать более прогрессивным образом: определить траектории самостоятельно (!) на основе буквально нескольких принципов. Ключевой аспект всей схемы — универсальность этих принципов. Их меньше, чем пальцев на руке, но их можно применять снова и снова — и к явлениям уже известным, и к тем, которые могут нам встретиться когда-нибудь в будущем. Это довольно удивительно: ничем не похожие явления *подчиняются* одним и тем же общим принципам. Слово «принципы» здесь надо понимать в первую очередь как *уравнения*. Это не уравнения типа $x^3 + 3x^2 + 3x - 1 = 0$, решением которых могут являться числа (например, как в данном случае, число, примерно равное 0,259921); вместо чисел неизвестным тут является *поведение*, или, чуть более технически, траектории. Всякое движущееся тело с течением времени описывает траекторию, и предложенная Ньютоном схема сводилась к поиску того, какова эта траектория, т.е. как именно координаты чего-то движущегося зависят от времени. Входные данные для этого состоят в воздействиях, которым подвергается то, что движется, — планета, или стрела, или что угодно. Выражаясь еще чуть более технически, требовалось решить уравнения, где неизвестными вместо чисел были зависимости от времени — функции. Слово «функция» в таком контексте означает не набор обязанностей, а именно характер зависимости: если ваш вклад в банке — возрастающая функция времени, это значит, что сегодня у вас больше денег, чем вчера; иногда становятся интересны и другие подробности, например, *сколь быстро* эта функция времени растет, меняется ли сама скорость роста и т.д. [11] Все то же самое можно спрашивать и про разные другие функции. Скорость самолета, разгоняющегося на взлетно-посадочной полосе, — тоже функция времени, и важная часть истории состоит в том, через какое время скорость достигнет значения, обеспечивающего отрыв от земли. Чтобы узнать это, необходимо понять причины.

Прежде всего, говорит нам Ньютон, движение «сохраняется», если то, что движется, предоставить самому себе, т.е. никак не воздействовать на него со стороны. Это факт, понятый уже Галилеем; Ньютон определенно действовал не на пустом месте [12]. В воздушном хоккее шайба продолжает двигаться туда, куда вы ее направили, пока не испытает воздействия еще какого-то предмета (бортика или биты). Умение забивать голы в этой игре состоит в том, чтобы привести шайбу в движение устраивающим вас образом — *направить* ее в ворота, и после этого *ничего больше делать не надо*, потому что от вас уже ничего не зависит, пока шайба не испытает какое-то следующее воздействие, из-за которого изменит свое движение; в промежутке же она движется «сама», причем по прямой и с заданной скоростью [13]. В этом и состоит «сохранение движения» в отсутствие сил, оно же — закон инерции Галилея, и оно же — первый закон Ньютона. У инертности есть количественная мера: это масса.

Итак, если не воздействовать, то движение сохраняется. Как только этот факт полностью осознан, естественно предположить, что если как-то воздействовать, то движение изменится. Осталось только сказать *как*, и Ньютон примерно это и говорит, но только не вполне прямо, потому что природа отвечает на этот вопрос не прямо, а косвенно. Чтобы высказываться точнее, нам понадобятся средства. Одно из них — *количество движения*. Оно тем больше, чем быстрее нечто движется и чем больше его масса. Грузовик, весящий 10 тонн и движущийся со скоростью 30 км/ч, имеет то же количество движения, что и автомобиль весом 2 тонны на скорости 150 км/ч. Количество движения — это просто произведение массы на скорость, с тем только уточнением, что, кроме величины, оно имеет еще и направление — такое же, как у скорости; в общем, как и скорость, это *стрелка* (вектор). Когда говорят о сохранении (неизменности) таких стрелок, это означает, что не меняется ни их длина, ни направление (шайба в воздушном хоккее летит по прямой, пока на что-нибудь не натолкнется), а *изменить* стрелку означает изменить ее длину или направление (или и то и другое).

Высказывание, что движение сохраняется, в точной формулировке звучит как «количество движения сохраняется» в отсутствие внешних воздействий (сил). Если же какие-то силы действуют, то количество движения меняется, и, главное, меняется быстро или медленно в зависимости от того, велика ли сила. У каждого изменения есть свой темп (если это не приводит к недоразумениям, можно говорить «скорость изменения»). И вот *темп изменения* количества движения как раз равен полной действующей силе, сообщает нам Ньютон. Просто *равен*. Нет никакой возможности сосчитать, сколько раз это высказывание применялось для описания мира. В нем содержится указание на причину: это сила. Сила тяги двигателей самолета, разгоняющегося для взлета, определяет, как быстро меняется количество движения самолета — что в салоне ощущается как эффект прижимания к спинке кресла; в горизонтальном направлении на самолет действуют еще и силы сопротивления (рис. 1.4), и полный баланс этих сил определяет изменение — нет, не скорости, а количества движения; именно поэтому столь важна взлетная масса («взлетный вес») самолета: одна и та же прибавка к количеству движения для самолета, в полтора раза более тяжелого, означает в полтора раза меньшее увеличение скорости. Сила, действующая здесь и сейчас, «не отвечает» за итог — за то, что получится, скажем, в конце взлетно-посадочной полосы. Она отвечает только за то, быстро или нет меняется количество движения здесь и сейчас.

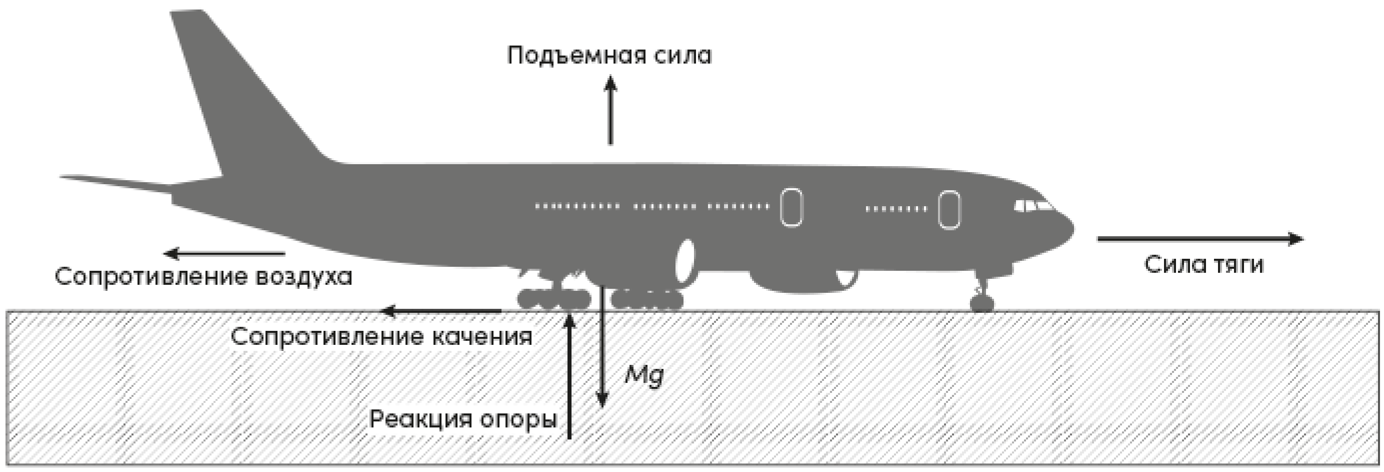



**Рис. 1.4.** Силы, действующие на самолет во время разгона

### *Сила говорит количеству движения, как ему изменяться*

Ньютон не мог думать о решении задачи про взлетающий самолет, как не мог думать и о решении своих уравнений на компьютере. Я затрудняюсь даже сказать, о какой из этих двух тем он «не мог думать в большей степени». Но современные компьютеры определяют, как будут развиваться события при взлете самолета или ракеты, действуя в точности так, как это наверняка представлял себе Ньютон: если в первую миллисекунду после старта действует определенная сила, то приобретенное количество движения — это и есть та самая сила, умноженная на прошедший малый интервал времени (ту самую миллисекунду). В следующую миллисекунду сила тяги может измениться, а кроме того, появляется сила сопротивления со стороны воздуха. Две силы действуют в противоположных направлениях, одну надо вычесть из другой, а результат умножить снова на выбранный интервал времени длиной в миллисекунду, и так мы узнаем, сколько же количества движения *прибавилось* за вторую миллисекунду. Потом мы точно так же поступаем с третьей миллисекундой и не забываем суммировать все накопленные прибавки к количеству движения. Если нам нужна особая точность (и уж во всяком случае, если речь идет о взлете ракеты), то надо вспомнить, что по мере израсходования топлива уменьшается масса, поэтому пересчет количества движения в набранную скорость надо производить внимательно, помня, что и масса меняется от миллисекунды к миллисекунде. Например, ракета-носитель «Сатурн V» сжигала — и выбрасывала из себя — 15 кг смеси из горючего и окислителя в миллисекунду, т.е. 15 тонн в секунду.

### *Поведение — результат сложения причин*

Стратегия, позволяющая узнать, что получится, т.е. делать предсказания о том, что будет, состоит в суммировании накопленных прибавок.Компьютер *буквально* суммирует накопленное по малым интервалам времени, а Ньютон (изобрел и) широко применял математический метод такого суммирования. Он называется интегрированием и не требует, чтобы разбиение на малые интервалы времени выполнялось буквально: такое разбиение встроено в сам метод, причем наилучшим возможным способом. Дело в том, что если для самолета миллисекунда — это малый интервал времени в том смысле, что действующие силы (да и масса) практически не успевают измениться, то для других процессов (например, горения или взрыва) расчет с шагом в миллисекунду даст неправильный результат, потому что за это время многое успевает измениться, и интервал времени надо выбирать еще короче. Вся идея интегрирования состоит в том, что интервал «уже взят» меньше любого, который вы в состоянии назвать. Поэтому интегрирование как математическая процедура точнее любого вычисления на компьютере. Другое дело, что результат интегрирования далеко, далеко не всегда удается *выразить* в обозримых терминах (т.е. используя привычные функции): хотя задача поставлена математически точно, записать точный ответ мы часто оказываемся не в силах. В таких случаях или изобретают приближенные способы осуществить математическую процедуру, или, конечно же, «сажают задачу на компьютер», т.е. применяют одну из многочисленных программ, которые, да, суммируют малые накопления.

Промежуточный итог: Ньютон не считал (и с тех пор никто, в общем, не считает), что законы природы могут описывать картину целиком. Кеплер со своими тремя абсолютно верными законами, в которых констатировалось поведение в целом, остался в прошлом. Законы Ньютона говорят, как причины (силы) определяют темп изменения количества движения. А дальше уж что получится путем «накопления», то получится — или на компьютере, или с помощью специальной математической процедуры. Если не удается ни то ни другое, то это наша проблема, а не проблема природы, в которой все «само себя суммирует» по мере того, как течет время: разнообразные причины постоянно действуют, накапливаемые изменения, в свою очередь, рождают новые причины, которые снова влияют, и так далее; время — это и есть способ упорядочения действующих причин и накапливающихся следствий.

*****

**Всеобщее притяжение.** Причины изменений количества движения планет в Солнечной системе (и подоплека законов Кеплера) — притяжение. Это ключевой дополнительный постулат, без которого у Ньютона ничего бы не получилось. Все тела притягивают друг друга. Одни делают это сильнее, другие слабее. Мерой («гравитационным зарядом») является масса каждого тела — то, что мы обычно измеряем в килограммах. Никакие подробности касательно состава и других свойств тел не имеют значения. Странно, нет? Из всего многообразия свойств материи в данном случае важно только одно число [14].

*Масса — гравитационный заряд*

Гравитационные заряды одного знака притягиваются, а масса любого тела может быть только положительной; никакие тела поэтому не отталкиваются. Это делает гравитацию всепобеждающей: нет возможности «закрыть» положительный гравитационный заряд отрицательным и тем самым спрятаться от действия гравитации (нельзя «заземлиться», давая зарядам стечь туда, где они скомпенсируются противоположными). Гравитация слаба (см. добавления к этой прогулке), но *неостановима*. Гравитация убывает с расстоянием, но делает это не слишком быстро — как обычно говорят, «по закону обратных квадратов». Я никогда не понимал, почему здесь появляется множественное число: в законе тяготения присутствует всего один квадрат всего одной величины — расстояния $R$ между двумя маленькими кусками материи (*любой* материи, как уже было сказано) массами $M_1$ и $M_2$. Сила притяжения между ними равна

$$F = G\frac{M_1 M_2}{R^2}. \qquad (1.1)$$

Буква $G$ здесь обозначает постоянную, которая, собственно, и выражает интенсивность гравитационного взаимодействия; это одна из Мировых постоянных — величин, встроенных куда-то глубоко в устройство нашей Вселенной. Численное значение этой постоянной — не предмет рассуждений, а экспериментальный факт. При всех «разумных» единицах измерения, выбранных для других входящих в формулу величин, постоянная $G$ весьма мала, из-за этого гравитационное взаимодействие и оказывается таким слабым. Ньютон угадал формулу (1.1) (пришел к ней на основе ряда вспомогательных рассуждений), а многие тысячи раз ее использования с тех пор привели к впечатляющему прогрессу в познании мира [15]. Ньютонова теория тяготения позволяет делать отличные предсказания о движении притягивающих друг друга тел; она описывает и падение яблока, и движение Луны вокруг Земли. Лабораторией для систематических проверок ее предсказаний стала Солнечная система; мы увидим несколько ее триумфов на следующих прогулках.

Постепенно (сильно не сразу), впрочем, выяснилось, что приведенная формула хорошо работает, пока нет быстрых движений, а сама гравитация не адски сильная. В случае «быстрых» и «сильной» приходится довольно радикально менять взгляды на устройство тяготения (прогулка 6), но в Солнечной системе мы окружены «медленными» и «слабой», за одним-единственным астрономическим исключением: это движение планеты Меркурий вокруг Солнца, которое очень немного, но все же отличается от предсказанного по Ньютону (и которое у нас будет еще много поводов обсудить). Эти отличия свидетельствуют, что закон тяготения в форме (1.1) все же не является точным. Средства наблюдений, имевшиеся во времена Ньютона, не позволяли заметить отклонения в движении Меркурия, но у Ньютона были независимые основания для некоторого беспокойства за свой закон тяготения, исходя из того, что мы сейчас бы назвали проблемой передачи информации. *Предположим*, что Солнце по какой-либо причине внезапно начинает двигаться с ускорением в направлении какой-нибудь выбранной звезды. (Реализовать такое крайне непросто, но это не запрещено законами природы, а физические законы должны корректно описывать явления вне зависимости от того, в людских ли силах эти явления осуществить.) Спрашивается, как скоро Земля почувствует изменения в силе притяжения со стороны Солнца? Каким образом Земле *передастся* информация о том, где Солнце? Проблема с законом тяготения в виде формулы (1.1) в том, что если продолжить применять ее «как написано» (а что еще делать?!) и в этом гипотетическом случае, то мы вынуждены будем заключить, что изменения силы притяжения передаются к Земле (и вообще куда угодно) мгновенно. Это называется «действие на расстоянии»: эффект мгновенно передается через пустоту. Действие на расстоянии определенно не нравилось Ньютону:

> Тот факт, что гравитация должна быть внутренним, существенным образом присуща материи так, чтобы одно тело воздействовало на другое на расстоянии через пустоту без посредничества чего бы то ни было еще, способного передавать воздействие или силу от одного тела к другому, представляется мне таким колоссальным абсурдом, что, как я полагаю, никто со сколько-нибудь развитым пониманием философских вопросов в него не впадет. Гравитация должна вызываться каким-либо агентом, действующим постоянно и в соответствии с определенными законами; но вопрос о том, быть этому Агенту материальным или нематериальным, я оставил на Усмотрение моих читателей [16].

### *Ньютон подозревал наличие Агента*

Судя по этому фрагменту (который кажется мне гениальным из-за намека на совершенно неизвестную в то время форму материи — *поле*), Ньютон понимал, что отгаданный им закон не может быть последним словом в описании гравитации. Тем не менее ему пришлось постулировать закон природы, в котором говорится о силе гравитационного притяжения между двумя малыми кусками массы в зависимости от разделяющего их расстояния, но вообще ничего не сообщается о том, как гравитация распространяется через пространство — грубо говоря, *как «движется» сама гравитация* (в нашем изложении эта история тоже далеко впереди). Для всех тел Ньютон сформулировал закон движения, в котором ключевую роль играет изменение (количества движения) во времени, но в его законе гравитации не предусмотрена возможность какого-либо изменения гравитации во времени, потому что время вообще не участвует в формулировке этого закона (это *статический* закон). Ньютон не мог не видеть этого недостатка своей теории, но никаких данных, которые хотя бы отдаленно подсказывали, в каком направлении искать ответ, в то время не было. *Hypotheses non fingo* [17].

*****

**Уравнения движения.** Закон природы «сила — это темп изменения количества движения» традиционно называется вторым законом Ньютона. Его еще часто называют *уравнением движения* или уравнениями движения. Вот как получается *уравнение*, например, для Марса. Солнце притягивает Марс с силой, которая зависит от расстояния между Марсом и Солнцем. Но оно-то и неизвестно, ведь задача как раз и состоит в том, чтобы *узнать*, как положение планеты зависит от времени. А как мы вообще применяем уравнения для решения задач? Мы делаем вид, что неизвестное нам известно, обозначаем его какой-нибудь буквой (например, но совершенно не обязательно, $x$) и стараемся переписать условие задачи, используя эту букву. В случае с Марсом мы поступаем точно так же, только буква кодирует не неизвестное нам число, а неизвестное нам поведение, т.е. функцию времени. (И таких букв/функций вообще-то три, когда движение происходит в трехмерном пространстве.) Условие задачи, которое надо использовать, чтобы составить уравнение, — это и есть второй закон Ньютона: мы совершаем с неизвестной функцией два разных действия, что дает две разные вещи, но их нужно приравнять. Во-первых, мы записываем выражение для силы; она зависит от расстояния, а потому и от искомого *положения* планеты по отношению к Солнцу. Во-вторых, мы берем темп изменения количества движения, в данном случае — темп изменения скорости планеты (умноженной на массу). Но сама скорость планеты — это темп изменения ее *положения*. Итак, мы выразили две разные величины через (пока неизвестное) положение планеты, изменяющееся со временем. Ньютон же говорит нам, что эти две разные величины *равны* друг другу. Все, что происходит в мире, происходит так, что они совпадают. Поэтому мы принимаемся за выяснение, как должно себя вести положение планеты в зависимости от времени, чтобы записанное равенство действительно было равенством. Это и выражают словами «решить уравнения движения».

Разумеется, не все стрелы летят по одной и той же параболе даже в отсутствие сопротивления воздуха, а планеты не сидят все на одной-единственной эллиптической орбите. Кроме собственно закона движения, важно и то, как я *запустил* стрелу (куда направил и с какой скоростью) и где именно находился и с какой скоростью двигался Марс, скажем, в 00:00:00 GMT 1 января 2000 г. Эти данные удачно называются начальными условиями. Они включают положения и скорости всего, что движется, в некоторый момент времени, который условно считается начальным. Решая уравнения движения для конкретных систем, мы каждый раз задаемся какими-то начальными условиями. Для разгоняющегося самолета это положение в начале полосы и нулевая скорость. Используя уравнения движения с учетом тяги, сопротивления воздуха в зависимости от скорости и подъемной силы в зависимости от скорости, мы можем определить, где и когда самолет оторвется от полосы.

Для сложных систем, как правило, ответ невозможно выразить в виде функции времени, записанной на бумаге обозримым образом. В таких случаях говорят, что «уравнения движения нельзя решить точно», но в этой фразе нет никакого глубокого философского смысла; это довольно технический момент, к тому же стимулирующий развитие как приближенных математических методов, так и компьютерных вычислений. Но для одинокой планеты, обращающейся вокруг звезды, по прекрасному математическому везению уравнения движения *можно* решить точно, и именно это Ньютон и проделал, с выдающимися последствиями.

*Уравнения движения для одной планеты можно решить точно*

*****

**Больше чем Кеплер.** Ко временам Ньютона законы Кеплера можно было воспринимать как экспериментальный факт, т.е. результат наблюдений. Привнесенные в эту историю Ньютоном математика и дополнительная догадка о том, как действует гравитация, воспроизвели эллипсы для планет. Три закона Кеплера перестали быть разрозненными высказываниями и приобрели логическую связь между собой: все три оказались следствиями закона движения и закона тяготения. Слово «следствие» здесь означает математическую неизбежность: если верны второй закон Ньютона и закон тяготения Ньютона, то никак по-другому планеты двигаться не могут [18]. Точнее говоря, могут, но только не совсем планеты (которые одни только и входили в предмет вычислений Кеплера), а тела, прилетающие извне Солнечной системы и улетающие куда-то прочь из нее. Здесь произошло очередное маленькое чудо: с помощью логического анализа (математики) познание вышло за текущие пределы наблюдений. Математический вывод законов Кеплера в большой степени поддержал уверенность в том, что и догадки по поводу законов неплохи, и математика выбрана правильно. А затем та же математика стала для нас проводником, указывая на новые, ранее не наблюдавшиеся виды движения. Для тел вблизи Солнца их оказалось три (вместе с эллипсами), если не считать движения по прямой точно в направлении Солнца [19]. И буква, и дух метода исследования мира по схеме «причина — следствие» говорят, что нет никакой возможности принять одни выводы и отказаться от других — неважно, что другие виды движения не наблюдались. Вот все виды движения под действием притяжения к центральному телу (рис. 1.5).

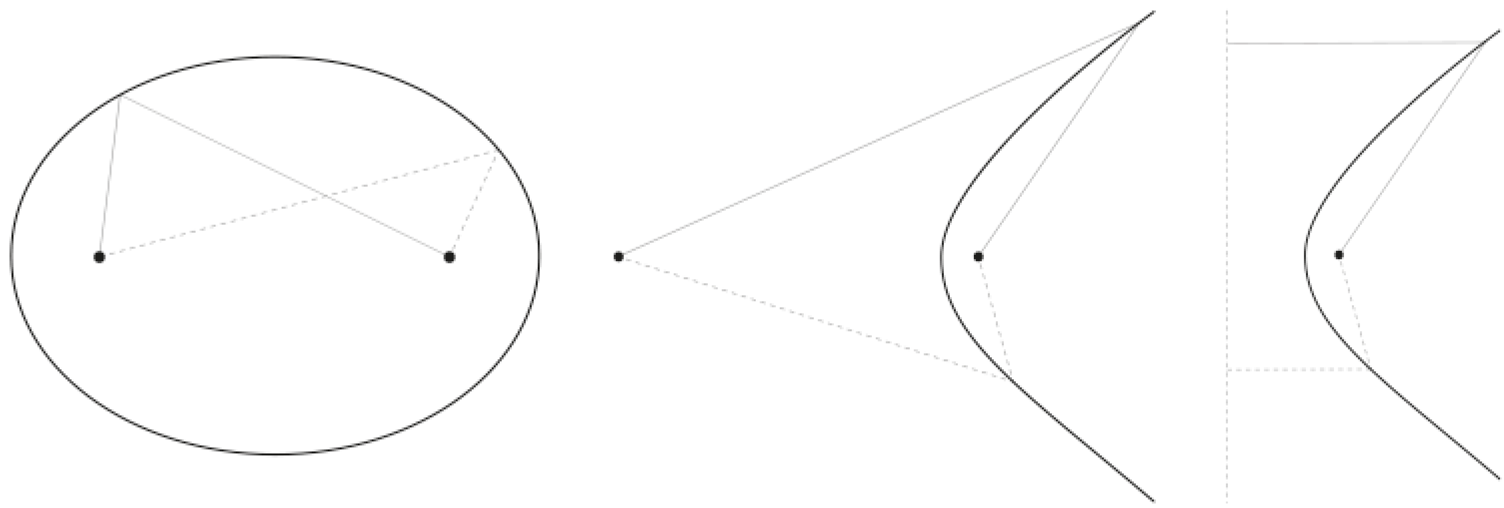


**Рис. 1.5.** Орбиты: эллипс, гипербола и парабола

**Эллипсы.** Во-первых (Кеплер был абсолютно прав!), эллипсы: математически точные эллипсы. Движение в разных частях эллипса происходит быстрее или медленнее точно так, как это утверждал Кеплер, вот только после Ньютона это утверждение перестало быть отдельным законом природы, а стало *следствием* закона движения и закона тяготения. Точно так же и третий закон Кеплера потерял самостоятельность.

Для Кеплера имеющиеся орбиты планет были уникальными. Для Ньютона, получившего контроль над тем, как эти эллипсы вырастают из законов и начальных условий, очевидно, что эллипсы могут быть очень разными: сильнее или слабее вытянутыми («совсем не вытянутый» эллипс — это попросту окружность). Математически тот или иной эллипс, по которому движется планета, определяется начальными условиями: тем, в каком направлении и с какой скоростью планета двигалась в выбранный «начальный» момент. Чтобы предсказать поведение реальных планет, надо взять эти начальные условия из наблюдений (определить скорость может оказаться сложнее, чем определить положение; но нужно и то и другое). Решение уравнений движения с такими начальными условиями дает в точности те траектории, которым реальные планеты и следуют, и мы уверенно предсказываем, что с ними будет в будущем [20]. Для *воображаемой* планеты начальные условия можно выбрать любыми, и эллипсы получатся самые разные: например, сильно вытянутые. Настоящие планеты в Солнечной системе таких вытянутых эллипсов не демонстрируют, но и здесь оказалось, что если математика показывает наличие решения определенного вида, то стоит поискать его в физическом мире. Кометы — это тела, которые движутся по сильно вытянутым орбитам (не каким-то, а именно эллипсам, пока они не портятся за счет прохождения вблизи массивных планет). При движении по вытянутому эллипсу тело проводит бóльшую часть времени далеко от Солнца, где его не разглядеть, и лишь за короткое время и с высокой скоростью пролетает вблизи Солнца. Именно тогда комета становится видна с Земли (которая, не будем забывать, и сама достаточно близка к Солнцу — примерно в 10 раз ближе, чем Сатурн, самая дальняя из известных во времена Ньютона планет, и в 30 раз ближе, чем Нептун) [21].

«Начала» Ньютона вышли в 1687 г., а в 1705-м его уравнения были использованы для предсказания, причем с размахом на полвека вперед: в 1758 г. будет наблюдаться комета. Эта комета сейчас называется 1P/Halley. В этом обозначении 1P указывает на ее порядковый номер (один!!) и ее «периодичность», а Halley — это в русской традиции Галлей, хотя точнее было бы Хэли или Холи. (Пример другой кометы: 67P/Churyumov — Gerasimenko; здесь пусть англоговорящие мучаются с тем, как произнести.) Галлей — современник Ньютона, сыгравший немалую роль в том, чтобы «Начала» вообще увидели свет, — *не открыл* свою комету, он «всего лишь» заявил, что кометы, наблюдавшиеся ранее, в частности в 1531, 1607 (при Кеплере!) и 1682 гг., — это одна и та же комета. Заявление не было произвольной догадкой, но подтверждалось результатами вычислений того, как большие планеты влияют на орбиты комет (как именно они портят те самые вытянутые эллипсы). На основе вычислений, пользуясь законами Ньютона, Галлей и предсказал следующее появление кометы в 1758 г. Сбывшееся предсказание означало бы, что в Солнечной системе есть по крайней мере одно тело, не являющееся планетой, которое обращается вокруг Солнца.

Галлей скончался за 16 лет до установленного им срока возвращения кометы и был лишен возможности переживать «в реальном времени», сбудется или не сбудется его предсказание, — а переживать было от чего. Указанный им 1758 год прошел без кометы, точнее, почти прошел: комета объявилась практически в последний момент, 25 декабря. Увидел ее 35-летний саксонский фермер и астроном-любитель Палич. Его жизненная стезя определялась унаследованными им обязанностями по ведению фермерского хозяйства, и в юности ему приходилось скрывать свою любовь к астрономии [22]. Вообще-то я не думаю, что Галлей хоть сколько-нибудь сомневался, что его комета вернется и будет возвращаться. После трех полных оборотов вслед за своим появлением в 1758–1759 гг. комета вернулась в 1986-м, но я упустил свою возможность ее увидеть. Она приблизилась к Солнцу, но оказалась по другую сторону от него, чем Земля, что создало худшие условия для ее наблюдения с Земли за последние 2000 лет. Надеюсь, многие из моих читателей используют свой шанс в 2061-м. Целый класс комет — с периодом обращения от 20 до 200 лет — называют кометами галлеевского типа; типичная такая комета появляется во внутренней области Солнечной системы один-два раза за одну человеческую жизнь.

1 января 1801 г. на небе обнаружилось неизвестное до того тело. Автор открытия (астроном Пьяцци, католический священник из Палермо) продолжал наблюдения до начала февраля, когда ему пришлось прервать их из-за болезни. К сентябрю, когда он опубликовал результаты своих наблюдений, новое небесное тело заняло на небе положение, близкое к Солнцу, из-за чего наблюдать его стало невозможно. Возможность наблюдений должна была вернуться в конце года, но для их возобновления требовалось с достаточной точностью знать, где новое тело к тому времени окажется. В его розыске принял участие 24-летний Гаусс (по мнению многих — величайший математик из всех когда-либо живших). Он разработал «быстрый алгоритм» восстановления орбиты по трем наблюдениям и с его помощью определил эллипс, на котором это тело должно было находиться. На основе его предсказаний потерянная планетка, названная Церерой, была успешно «возвращена» 31 декабря 1801 г.; едва ли какая-нибудь другая подобная

история наблюдений укладывается точно в календарный год [23]. Большая полуось эллипса, на котором пребывает Церера, — примерно 2,8 а.е. (астрономическая единица — среднее расстояние от Земли до Солнца, удобная мера длины в Солнечной системе); это между Марсом и Юпитером.

К решениям уравнений движения для планеты, притягиваемой Солнцем, следует относиться как к описанию *всех* возможных видов движения в такой системе. Несколько удивительно, что их так мало: кроме вышеупомянутых эллипсов, осталось только два.

**Гиперболы.** Если запускать тела из какой-нибудь суперпушки, находящейся на некотором расстоянии от Солнца, то при достаточно большой начальной скорости тело не попадет на замкнутую орбиту, а, «завернув» вокруг Солнца, улетит прочь. Решение уравнений движения говорит, что такое движение непременно происходит по математически точным кривым, которые называются гиперболами. Они родственны эллипсам, но, в отличие от замкнутого эллипса, гиперболы разомкнуты. Два конца гиперболы по мере удаления от ее «середины» делаются все больше похожими на прямые (что неплохо согласуется с нашим представлением о том, что, когда тело находится очень далеко от Солнца, солнечное притяжение почти не ощущается и тело летит почти по прямой). У гиперболы тоже есть фокус (специальная точка вне самой гиперболы); гиперболические траектории небесных тел таковы, что (как и в случае эллипса) Солнце сидит точно в фокусе. Движение по гиперболе, как говорят, «не финитно»: тело приходит откуда-то издалека, отклоняется Солнцем и, изменив направление, уходит куда-то в неопределенное далеко, причем скорость его, хотя и уменьшается по мере удаления, приближается к некоторому фиксированному значению, не равному нулю.

Предсказание гиперболических орбит (возможность которых Кеплер, очевидно, не мог и подозревать) — это демонстрация силы математических методов и самого подхода к познанию, основанного на причинах явлений. В течение трех сотен лет можно было не наблюдать в Солнечной системе ни одного тела, летящего по гиперболе, и тем не менее ни у кого не было сомнений, что такое возможно — что в Солнечную систему может залететь гость извне, побыть здесь недолго и распрощаться навсегда, с необходимостью следуя по какой-то гиперболе. Такой гость издалека был замечен 19 октября 2017 г. и вскоре наречен Оумуамуа (рис. 1.6). Сейчас этот астероид, когда-то, видимо, выброшенный из какой-то иной планетной системы, уже вычерчивает «уходящую» от нас часть гиперболы. 30 августа 2019 г. была открыта и *межзвездная комета* 2I/Borisov. Кроме того, пять рукотворных объектов сейчас движутся «вокруг» Солнца по гиперболам, это значит, что они покидают Солнечную систему. Это «Пионер-10» (запущен в 1972-м), «Пионер-11» (1973), «Вояджер-1», «Вояджер-2» (1977) и «Новые горизонты» (2006).

**Рис. 1.6.** Оумуамуа в видении художника

**Параболы.** Наконец, «между» эллипсом и гиперболой есть траектория еще одного типа. Она называется парабола. У нее тоже есть специальная точка, называемая фокусом, и несколько условно можно считать, что парабола — это «разомкнутый эллипс» (один из фокусов эллипса отодвинут неопределенно далеко, но по мере отодвигания эллипсу не давали стать слишком тонким). На первый же взгляд парабола больше похожа на гиперболу: у нее тоже уходят вдаль два конца, правда, «выпрямляются» они по мере удаления по другому закону, чем в случае гиперболы, да и улетающее тело движется по ним иначе: скорость движения делается все меньше и меньше, постепенно приближаясь к нулю.

Едва ли хоть одно тело вблизи какой-нибудь звезды летит по параболе, но причина не в нарушении соответствия между тем, что предсказывает математика, и тем, что может иметь место в реальности. Причина в сложности «тонких настроек». Если вы имеете в своем распоряжении космическую пушку, чтобы запускать тела в сторону Солнца, то, пока вы будете выстреливать тела с большой скоростью, Солнце не сможет оставить их в своей сфере влияния и траектории этих тел станут гиперболами. Если же вы понизите скорость выстреливания, то притяжения Солнца хватит на то, чтобы удержать тело при себе, а это значит, что траектория окажется эллипсом. При заданном расстоянии от Солнца лишь единственное значение скорости приведет к тому, что тело полетит по параболе. Стоит выстрелить чуть или сколь угодно быстрее — получатся гиперболы, а чуть или сильно медленнее — эллипсы. В этом смысле гипербол и эллипсов «много», а парабол «мало». В реальности параболы в качестве орбит не запрещены, а просто не случаются.

Вот, собственно, и все, что может произойти: эллипсы, гиперболы или в крайнем случае параболы. Никаких более замысловатых траекторий, если речь идет о движении под действием притяжения к одному центру. Никаких, например, вариантов «по спирали падает на Солнце» — что не может не радовать обитателей одной из планет, обращающихся вокруг Солнца.

Кеплер абсолютно правильно прочитал многостраничные таблицы с числами, но нечеловеческие усилия и озарение, необходимые для такого прочтения, оказались больше никому не нужны: знание о том, какими могут быть орбиты, стало доступным и первокурснику. «Особенно замечательным, — писал Эйнштейн в статье, посвященной 200-летию кончины Ньютона, — должно было казаться выяснение того факта, что причина движения небесных тел тождественна столь привычной нам из повседневной жизни силе тяжести» [24]. И это не все. Принципы, один раз успешно выведенные из наблюдений (исторически — в ограниченной части Солнечной системы), наделили нас способностью делать выводы об устройстве мира и предсказывать поведение его частей *далеко* за пределами Солнечной системы. Мир Ньютона, полностью поглотивший мир Кеплера (и впитавший в себя относительность Галилея), постепенно распространялся на все шире приоткрывавшуюся Вселенную, не требуя для этого никаких изменений в своих фундаментальных положениях. Солнечная система отлично поддерживала единство теории и наблюдений: например, солнечные и лунные затмения известны на любой «мыслимый» момент времени в будущем или прошлом, и эти предсказания выполняются много точнее, чем расписание пригородных поездов. Простые принципы, заложенные в описание мира, работали, работали и работали; новые принципы не требовались. А если все, что происходит, случается в соответствии с законами движения, то все ли предсказуемо? Если знать положения и скорости всех тел в некоторый момент времени (упоминавшиеся уже начальные условия), то можно ли узнать будущее, просто решая уравнения движения? И вообще, в космосе все правда так просто? И есть ли границы, за которыми сформулированные законы теряют применимость?

Источник развития знания — несоответствия в имеющемся знании. Мощь ньютоновской картины мира, основанной на законах движения, определялась в том числе тем, что границы ее стали появляться в поле зрения не раньше чем через полтора столетия чрезвычайно плодотворного ее развития. Мы доберемся до этих границ гораздо быстрее, но еще до того нас ждут несколько шедевров ее использования, как в рукотворных ситуациях, когда требуется управлять движением ради достижения практических целей, так и для понимания устройства мира самого по себе.

*****

**Движение как организация.** Планеты, которые «бродят» по небу, а в действительности движутся по эллипсам, *остаются* в Солнечной системе, а не улетают прочь. Слово «система» подчеркивает привычку мыслить о нашем космическом окружении как о чем-то едином и заодно достаточно устойчивом. Причина такого положения дел в том, что существует вид движения под действием притяжения (да, эллипсы), участники которого не разбегаются в разные стороны. Открывая планеты у других звезд, мы тоже говорим о планетных системах и тоже, разумеется, рассуждаем в терминах эллипсов, по которым там летают планеты. На тех расстояниях, с которых мы их наблюдаем, ничего, кроме планет (и иногда значительных скоплений пыли), обнаружить не удается, но про свою Солнечную систему мы хорошо знаем, что в ней содержится *множество* разного, кроме планет; и все разнообразные ее обитатели летают вокруг Солнца тоже по эллипсам — в большей или меньшей мере искажаемым влиянием других обитателей. Я легко соглашусь с тем, что самое интересное из происходящего состоит как раз в этих взаимных влияниях, вызванных ими изменениях орбит и прочих драматических событиях, но тем не менее буду настаивать на том, что Солнечная система организована в нечто единое благодаря замкнутым траекториям. Ту же идею организации движущихся частей в нечто единое мы усматриваем в структурах большего масштаба: Солнечная система вместе с другими звездами, а также газом и пылью обращается вокруг центра галактики Млечный Путь, и все вместе они тоже составляют «систему»; другие галактики в дальнем космосе — основные структурные элементы, в терминах которых мы говорим об этом космосе. Движение в сочетании с законом притяжения — элемент организации и одновременно инструмент для проверки нашего понимания происходящего во Вселенной; ближе к дому это еще и возможность применить достигнутое понимание на практике. Движение как предмет для применения имеющихся знаний и способ получения новых — объект нашего внимания на следующих прогулках.

## Добавления к прогулке 1

**Об уравнениях.** Волей-неволей нам предстоят прогулки в компании уравнений: их приходится упоминать и о них рассуждать, даже если сами они не присутствуют здесь во всей своей математической полноте. Нелишне сказать несколько слов об уравнениях вообще.

Если говорить одним словом, то уравнение — это *задача*. Сформулирована эта задача в виде двух различных математических выражений, соединенных знаком равенства. Как правило, требуется определить, каким должно быть неизвестное, чтобы это равенство *действительно выполнялось* (например, каким должно быть $x$, чтобы выполнялось равенство $x^2 = 1$). До конца этого абзаца будем считать, что неизвестное — это число или числа, «любые» или из какого-то класса (например, иногда бывают интересны целые числа или, скажем, положительные; к уравнению всегда прилагается или подразумевается информация о том, в каком классе следует искать неизвестное). Кроме неизвестного или неизвестных, уравнения содержат нечто известное или считающееся известным. В буквальном смысле известными (известнее не бывает) являются конкретные числа, но очень часто в качестве известных фигурируют и буквы. Смысл букв в том, что их *можно* заменять числами по нашему выбору, но желательно делать это, когда уравнение уже решено. Получить решение «в буквах» всегда здорово, потому что решение относится тогда не к одному-единственному уравнению с конкретными числами, а к семейству уравнений. Хрестоматийный пример — квадратное уравнение, в котором одна буква $x$ обозначает неизвестное, а две или три другие буквы считаются известными. Такое уравнение можно действительно решить «в буквах», т.е. в общем виде, но это редкая ситуация — например, с уравнением пятой степени (содержащим $x^5$ и более низкие степени) этого сделать нельзя, за исключением особых случаев, и приходится решать уравнение каждый раз заново с конкретными числами. Компьютер, как правило, неплохо справляется с уравнениями, в которых, кроме неизвестного, присутствуют только числа.

Но неизвестными могут быть не только числа, но и более сложные объекты — функции. Пример функции — *поведение* (зависимость от времени) какой-либо величины, скажем объема вашего вклада в банке. Данные о том, что каждый день вклад увеличивается на 0,001 своей величины, являются, по существу, уравнением, из которого можно найти это поведение — *функцию времени* — и, например, узнать размер вклада через 1000 дней. Часто (хотя и не всегда) в задачах про такое поведение нет «зернистости» в виде фиксированного отрезка времени («дня»): считается, что функция изменяется непрерывно, и формулировка уравнений к этому приспособлена (такие уравнения называются дифференциальными, что примерно означает «имеют дело с *очень* малыми изменениями»). Пример поведения — координаты тела, движущегося в пространстве; чтобы задать его траекторию, требуются три функции времени — по одной для каждой из координат. Когда тела движутся под действием каких-либо сил, эти функции не произвольны, а определяются уравнениями движения.

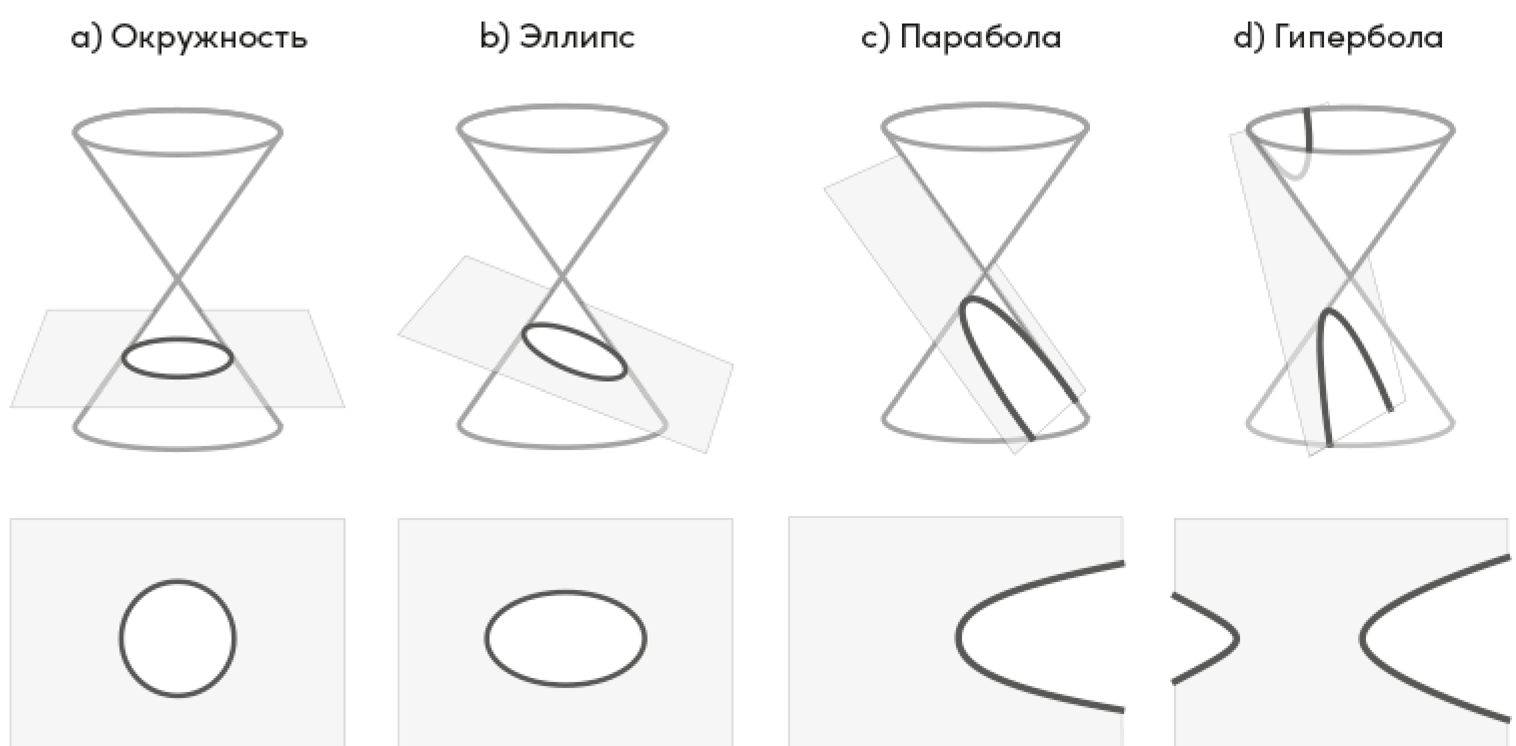



**Рис. 1.7.** Конические сечения

Уравнения, которые выражают законы природы, описывают точную (количественную) связь между какими-то величинами. Такие уравнения позволяют делать предсказания о поведении и свойствах изучаемых систем. Когда предполагается наличие в природе какой-либо связи, сопоставление предсказаний с наблюдениями служит для отбора тех уравнений, которые приводят к более точным предсказаниям. Несколько упрощая, можно сказать, что таким образом и формулируются работающие законы природы.

**Конические сечения.** Орбиты трех типов — эллипс (становящийся окружностью в частном случае), парабола и гипербола — объединены самим фактом того, что они и только они (кроме еще тривиального случая прямой линии) являются траекториями движения тел под действием притяжения одного центра. Они же объединены свойством совершенно иного типа: они и только они (и в специальном случае — прямая) возникают как пересечение плоскости и конуса. Конус — это поверхность, которая образуется, если свернуть в воронку лист бумаги, но с одним уточнением: математический конус продолжается по обе стороны от вершины, как видно уже на рис. 1.7$a$. Если теперь пересечь конус плоскостью, которая перпендикулярна оси симметрии, то в сечении получится окружность. Наклоняя плоскость, мы получаем в сечении разнообразные эллипсы — всё более вытянутые по мере того, как наклон плоскости увеличивается (рис. 1.7$b$), — до тех пор, пока наклон не станет таким же, как наклон образующей конуса. В этом случае (рис. 1.7$c$) в сечении получается парабола (в некотором роде, как мы говорили, эллипсов много, а парабола одна; здесь эта идея выражается в том, что парабола возникает при точно обозначенном угле). Наклоняя плоскость еще сильнее, получаем в сечении гиперболы — разные в зависимости от угла наклона (рис. 1.7$d$). Здесь требуется небольшое пояснение: каждая гипербола имеет две части, потому что плоскость задевает и верхнюю, и нижнюю половины конуса. Говоря о гиперболе как о траектории движения, имеют в виду *одну* ее половину (которую тогда тоже называют гиперболой).

*Почему* три вида кривых, и только они, оказались решением двух столь различных задач (задача Кеплера и конические сечения) — вопрос, который нельзя было не задать некоторое число раз за те триста с лишним лет, как этот факт выяснился (конические сечения как таковые были известны в Древней Греции). Эллипс, кроме того, геометрически полностью симметричен относительно двух фокусов, что видно уже из построения с ниткой, показанного на рис. 1.1; но в Солнечной системе нет никакой «нитки», которая указывала бы планете, как двигаться, а сила действует на планету всегда и только в сторону одного из фокусов. Как же геометрия возникает из закона тяготения? Самый простой ответ: она *получается* как решение уравнений. Этот ответ, однако, никак не проясняет механизм, а из-за того, что уравнения здесь дифференциальные, он не относится к числу «элементарных». Есть ли *элементарное* решение, т.е. такое, которое позволяет перевести одну задачу (нахождение орбиты) в другую (построение конического сечения), причем делает это «непосредственно» и без использования математических средств типа дифференциального исчисления? Такое элементарное решение известно; в частности, ему посвящена «забытая» лекция Фейнмана — забытая на фоне других, прочитанных им в Калтехе и вошедших в «Фейнмановские лекции по физике». Однако Фейнман предваряет рассуждения таким предупреждением:

Элементарное вовсе не означает легкое для понимания. Элементарное означает, что для понимания не требуется почти никаких предварительных знаний, кроме бесконечно развитых умственных способностей.

**Две «разные» параболы.** Параболы оказались ответами в двух задачах: «планета» (частный случай движения вокруг центра притяжения, скажем Солнца) и «стрела», или, выразительнее, «камень» (движение, начинающееся под углом к горизонту вблизи земной поверхности). Одна и та же математическая кривая вполне может оказаться решением уравнений, записанных для различных систем, при разных предположениях. В задаче «планета» предполагается, что сила притяжения убывает при увеличении расстояния — «обратные квадраты», как это записано в (1.1). Парабола может тогда получиться в качестве решения при тщательно подобранных начальных условиях. В задаче «камень» предполагается другое: *вблизи* земной поверхности сила притяжения практически постоянна; поэтому можно спокойно пренебречь тем, как она убывает по мере подъема над поверхностью. В *такой* постановке задачи траектория брошенного тела — всегда парабола (разумеется, если убрать весь воздух — например, перенести эксперимент на Луну и там от души пострелять из рогатки), за очевидным исключением случаев бросания строго вверх и строго вниз. Если все же проявить дотошность и решить задачу про камень, не забывая, что притяжение ослабевает с высотой (и меняет направление по мере смещения вдоль земной поверхности!), то траектория от старта до падения окажется частью *очень* вытянутого эллипса — очень коротким отрезком его дуги вблизи его верхней части. На рис. 1.8 изображена часть эллипса, вытянутого несравненно слабее, чем тот, на который можно запустить камень любыми подручными средствами, но рисунок передает идею: небольшая дуга эллипса практически совпадает с параболой. Траекторией является только та часть каждой кривой, которая находится над поверхностью Земли, и, пока максимальная высота подъема мала по сравнению с радиусом планеты, участок эллипса неотличим от параболы. Поэтому вблизи поверхности Земли можно считать, что брошенные под углом к горизонту тела летят по параболе. Это Галилей и установил.

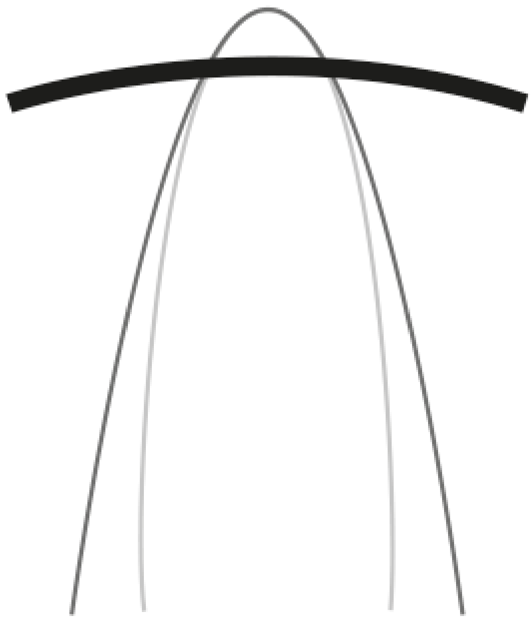


**Рис. 1.8.** Часть эллипса (светло-серая линия) и часть параболы (темно-серая линия), которые неразличимо близки около вершины. Широкой линией показана поверхность Земли. Только участки кривых, которые лежат выше нее, могут быть траекториями брошенных тел, а в этой части эллипсы очень похожи на параболы, пока они достаточно близки к поверхности

*Точная* парабола возникает в задаче о стрельбе с поверхности Земли, когда притяжение Земли учитывается «по-настоящему», в соответствии с законом тяготения Ньютона, а скорость имеет строго определенное значение. Если вы стреляете из суперпушки, расположенной на поверхности, то при достаточной скорости снаряда, посланного под углом к горизонту, он отправится путешествовать вокруг Земли, описывая эллипс. Если скорость выстрела еще увеличить, то наступит момент, когда снаряд уйдет от Земли неопределенно далеко. Минимальную скорость, при которой это происходит, называют второй космической скоростью или параболической скоростью. Это минимальная скорость освобождения: та скорость, которую необходимо придать телу, чтобы оно преодолело гравитацию, например, Земли и улетело «совсем». Движение тогда происходит по параболе! (Разумеется, если запустить снаряд быстрее, то он тем более улетит от Земли — но уже не по параболе, а по гиперболе.)

*Парабола — траектория самого неторопливого расставания*

**Гравитация и заряды.** Царица Вселенной — гравитация — это самая слабая из четырех фундаментальных сил. И одна из двух дальнодействующих. Вторая дальнодействующая — электромагнетизм, и, чтобы оценить, во сколько раз одна сильнее или слабее другой, можно сравнить силу, с которой два расположенных на определенном расстоянии электрона отталкивают друг друга электрически, и силу, с которой они притягиваются гравитационно. Гравитационное притяжение слабее электрического отталкивания примерно в 4 100 000 000 000 000 000 000 000 000 000 000 000 000 000 раз.
Это *большое* число раз, независимо от вашего определения слова «много». Намеки на эту огромную разницу повсюду вокруг нас: когда я держу в руках груз весом 10 кг, сила химических связей между молекулами в моем теле (которые в основе своей электромагнитные, но в заметно «ослабленном» варианте по сравнению с взаимодействием одиночных электрических зарядов) позволяет мне с успехом противодействовать притяжению *целой планеты*. И тем не менее на больших масштабах Вселенную структурирует гравитация, а вовсе не электромагнетизм, за которым остался весь мир сред, материалов и вещей вокруг нас. Причина в том, что электрические заряды встречаются в двух разных видах: положительные и отрицательные, и в зависимости от

этого они могут и притягиваться, и отталкиваться. Положительные и отрицательные заряды распределены вокруг нас поровну, так что окружающие тела в целом электрически нейтральны, т.е. не имеют электрического заряда (хотя глубоко внутри с зарядами происходит много интересного). Ничего похожего не происходит с гравитационными зарядами — т.е. массами — окружающих тел: при всей слабости гравитации тела заведомо не являются гравитационно нейтральными.

**Телескоп «Кеплер».** «Кеплер» занимался поиском случаев периодического ослабления света от звезды из-за прохождения планеты по ее диску, наблюдаемому с Земли, — что-то вроде крошечной, микроскопической пылинки на фоне прожектора. Это наш основной источник знаний об экзопланетах на данный момент, хотя такой метод их поиска и имеет некоторый перекос: чаще открываются более близкие к своей звезде планеты, чем далекие, потому что при небольшом наклоне плоскости орбиты планеты к лучу зрения близкая к своей звезде планета скорее окажется на фоне диска этой звезды, чем далекая (а перекос хорошо осознается, и разрабатываются меры по его преодолению для оценки планетного «населения» в галактике Млечный Путь).

Телескоп «Кеплер» работал не на околоземной орбите, а летал (и сейчас летает, только срок службы уже закончился) вокруг Солнца, близко к земной орбите и собственно к Земле, но несколько отставая от нее. Его пришлось убрать подальше, чтобы избежать ненужных затмений части неба близкой Землей, влияния света, отражаемого от Земли, а также влияния лунной гравитации на его орбиту (из-за обращения Луны вокруг Земли — влияния переменного, что и составляет проблему). Оборот вокруг Солнца «Кеплер» совершает за 372,5 суток, что означает отставание от Земли на 26 млн километров за год. Через примерно 25 лет «Кеплер» окажется с противоположной стороны от Солнца по отношению к Земле, а лет через 50 снова приблизится к нам. Быть может, тогда будет не очень дорого снять его с орбиты и поставить в музей.

Количество движения (в простейшем случае — произведение массы на скорость) имеет и более короткое название — «импульс», и этот термин можно было бы выучить и использовать, но я предпочел вариант, звучащий несколько более значаще. Для системы, на которую ничто не действует извне, суммарное количество движения всех ее частей — сохраняющаяся (не меняющаяся с течением времени) величина. В эквивалентной форме этот факт известен как самый, наверное, популярный — третий — закон Ньютона, на котором я не стал специально останавливаться (но о законах сохранения сказано еще немного в приложении Б).

Высказывание Эйнштейна о Кеплере взято из статьи "Albert Einstein über Kepler", впервые напечатанной в газете *Frankfurter Zeitung* в ноябре 1930 г.; русский перевод под названием «Иоганн Кеплер» включен в сборник статей Эйнштейна [42]. Там же — его статья «Механика Ньютона и ее влияние на формирование теоретической физики», написанная к 200-летию кончины Ньютона, из которой я также привожу цитату. Разнообразные подробности о жизни и трудах Тихо Браге, Кеплера, Галилея и Ньютона (и не только их) можно найти в энциклопедической книге [19]. Труды и жизнь Галилея в период его противостояния с инквизицией, представленные на фоне эпохи, интриг и растущего научного знания, — предмет захватывающего чтения в [13]. На Дейва Скотта, бросающего предметы на Луне, можно посмотреть по ссылке https://youtu.be/Oo8TaPVsn9Y. Цитата из самого Галилея взята из издания [8].

В связи с появлением у Кеплера некруговых орбит Владимир Сурдин отмечает определенный элемент «психологической подготовки»: уже в Птолемеевой *геоцентрической* системе мира Земля располагалась не в центре главной окружности (деферента), а была смещена от центра; в противоположную сторону от центра был смещен эквант — точка, при наблюдении из которой движение планеты выглядит равномерным. По поводу того, что «Ньютон угадал закон тяготения», стоит отметить, что Ньютон не действовал в вакууме, а был участником обмена идеями; развитие событий от переписки Ньютона с Гуком до появления «Начал» ясно и выразительно описано в книге [14] (чем ее содержание далеко не исчерпывается); я благодарен Дмитрию Баюку за обсуждение этих вопросов. Несколько упрощенное, но тоже интересное изложение истории, приведшей к появлению «Начал», имеется в книге [3]. Там же (помимо всего другого) рассказано и о Галлее. Научная и общественная биография Ньютона систематически исследуется в книге [106]. Интересно, насколько задержалось бы развитие науки в Новом времени, если бы (в гипотетической параллельной Вселенной) уравнения движения для планет не позволяли обозримым образом выразить точное решение и на основе постулатов Ньютона не удалось бы продемонстрировать явного быстрого успеха?

«Забытой» лекции Фейнмана посвящено блестящее изложение каналов minutephysics и 3Blue1Brown: https://youtu.be/xdIjYBtnvZU. Заодно стоит посмотреть рассказ в том же стиле от 3Blue1Brown, почему из конических сечений возникают именно эллипсы: https://youtu.be/pQa_tWZmlGs. «Незабытые» «Фейнмановские лекции по физике» [35] много раз переиздавались на русском, но я продолжаю пользоваться своими томиками, вышедшими в 1976 г. (это было уже третье русское издание). Как мне кажется, не потерял своей актуальности рецепт по-настоящему заинтересованного знакомства с физикой: читать первый том «Фейнмановских лекций...» до состояния потери понимания, и к тому моменту как раз станет понятно, выстраиваются ли ваши отношения с этой формой знания. Воспользуюсь случаем и порекомендую еще одну (тоже несчетное число раз переиздававшуюся) книгу Фейнмана [34], которая остается универсально актуальной — в частности, актуальной для большинства этих прогулок.

По поводу «зоны обитаемости», о которой говорят в связи с экзопланетами. Владимир Сурдин считает важным напоминание, что так называется диапазон расстояний от звезды, в пределах которого температура на поверхности планеты позволяет существовать там жидкой воде, и *ничего* сверх того не предполагается; сам Сурдин, однако, предпочитает название «зона жизни». Рисунок 1.3 взят с сайта NASA https://exoplanets.nasa.gov/resources/131/lining-kepler-habitable-zone-planets-up, где приведен с целью проиллюстрировать сравнительные размеры потенциально обитаемых планет, открытых с помощью телескопа «Кеплер». Никакие подробности о том, как они на самом деле *выглядят*, нам, конечно, неизвестны. Достаточно условно и изображение Оумуамуа на рис. 1.6, взятое с сайта https://solarsystem.nasa.gov/asteroids-comets-and-meteors/comets/oumuamua/in-depth/, где оно приведено со ссылкой на Европейскую южную обсерваторию (European Southern Observatory, ESO) и дизайнера Мартина Корнмессера. Главное в нем — крайне необычное для астероида соотношение (около 10 : 1) его большого и малых размеров.

На восходящий к Галилею вопрос о причинах, определяющих эффективность математики в науках, Тегмарк [31] отвечает максимально последовательно с минимальным, как мне кажется, числом дополнительных гипотез и построений: потому что Вселенная *и есть математика*. Я бы, несомненно, согласился с этим заявлением в еще большей степени, чем согласен сейчас, если бы лучше понимал, что в точности оно значит. Среди немалого числа высказываний о роли математики в науках название статьи [5] стало мемом, она вошла и в сборник [6]; в этих изданиях переводчики почему-то сократили имя автора, Юджин, до буквы Е.

# Прогулка 2

# Танец с небесами

**Маршрут:** *От Земли к Луне и обратно. — Центр масс. — Кто за рулем. — Космические парковки XVIII века. — Гало-орбиты. — Греки и троянцы. — Полет из пращи. — Где прибавить ходу. — Рандеву. — Танец с небесами.*

**Главный герой:** *Майкл Коллинз*

**От Земли к Луне и обратно.** Прекрасные в своем совершенстве кеплерово-ньютоновы эллипсы могут навевать скуку — ведь это всего лишь эллипсы. В действительности же движение в космосе в бесконечное число раз разнообразнее. Дело просто в том, что математическая задача, которую решил Ньютон, была задачей про *одну* планету, притягиваемую Солнцем; в качестве траекторий действительно получились только эллипсы [25]. Однако планет у Солнца в действительности несколько, еще больше — их лун (спутников), а закон гравитации, как Ньютон же его и придумал, универсальный: все притягивается ко всему. При наличии многих тел задача сразу меняется, а движение оказывается практически бесконечно разнообразным. Правда, математические трудности на пути точного решения задачи многих тел, притягивающих друг друга, непреодолимы — во времена Ньютона, в общем, в той же мере, что и сейчас. Проблема, конечно, в том, что каждое тело движется в зависимости от того, как оно притягивается к другим, а это притяжение зависит от того, какое тело где находится. Записать уравнения движения — легче легкого, а вот решить их в обозримом виде (т.е. в виде небольшого числа формул, из которых «виден ответ») невозможно. Оказываемся ли мы снова беспомощными перед лицом Вселенной, желая на основе законов движения предсказать, куда и с какой скоростью что-то полетит? И да и нет.

Движение под действием двух центров притяжения — предмет существенного интереса с точки зрения путешествия с Земли на Луну. Масса космического корабля настолько незначительна по сравнению с массой обоих тел, что не оказывает влияния на их орбиты; зато движущиеся друг относительно друга Земля и Луна влияют на космический корабль так, что его реальная орбита может оказаться где-то в интервале от «слегка некеплеровой» до «совершенно некеплеровой». И в этой задаче нельзя действовать так, как действовал Кеплер: попытаться сразу сказать, какой же траектории будет следовать корабль. Да и Ньютону было бы не под силу коротко определить эту траекторию: для нее нет не только понятного названия типа «эллипс», но и единой формулы, которая полностью и точно описывала бы ее в одну или хотя бы в несколько строк. Ньютон, правда, *вовсе* не занимался расчетами полетов космических кораблей к Луне — хотя, кто знает, если бы эта задача была поставлена перед ним королем (как она была поставлена советским руководством перед М. В. Келдышем в конце 1950-х), он мог бы этим загореться и посвящать меньше времени другим своим увлечениям и административным обязанностям (Келдыш между тем был президентом Академии наук СССР).

### *Точно учесть совместное влияние Земли и Луны непросто*

Первой земной вещью, которую удалось отправить на Луну, предварительно проделав все необходимые вычисления (и, само собой, преодолев многие технологические сложности), была «Вторая космическая ракета», как она тогда называлась, — аппарат, задним числом переименованный в «Луну-2». «*Первая* космическая ракета» (в установившейся позднее терминологии — «Луна-1»), стартовавшая с территории СССР в самом начале 1959 г., промахнулась мимо Луны больше чем на три лунных радиуса из-за слишком поздней команды на выключение разгонного двигателя. Ошибки были учтены, и уже в сентябре «Луна-2» попала в цель. Расстояние от центра Земли до центра Луны — 110 с небольшим лунных диаметров; при этом Луна не стоит на месте, а движется относительно Земли со средней скоростью около 3680 км/ч. И да, притягивает космический аппарат с силой, мало существенной на большей части пути, но все возрастающей по мере приближения к Луне, — тогда как притяжение Земли ослабевает по мере удаления. Корабль/ракету при этом именно *запускают*, почти как шар в боулинге: траектория в основном задается тем, как сработал двигатель при старте с околоземной орбиты, а далее движение происходит под действием одного только тяготения; хорошо, когда по дороге есть возможность небольшой коррекции. Отправить людей к Луне и благополучно вернуть их обратно удалось ценой напряженных целенаправленных усилий только через девять с лишним лет после полета «Луны-2».

*Первые предметы доставлены на Луну в 1959 г.*

Первым (после, конечно, «Из пушки на Луну») транспортным средством, на котором люди отправились к Луне, был «Аполлон-8» в конце декабря 1968 г. Задача состояла в том, чтобы туда добраться (преодолев примерно 384 000 км), выйти на орбиту вокруг Луны, а затем, наоборот, уйти с нее и вернуться домой. За словами «выйти» и «уйти», как и «добраться» и «вернуться», стоят концентрированные смыслы и сложные технологические решения. Когда три ступени ракеты «Сатурн V» вывели «Аполлон-8» (вместе с третьей ступенью, которой предстояло еще поработать) на низкую околоземную, почти круговую орбиту, все системы корабля были проверены на предмет дальнейшего путешествия к Луне. Действия, необходимые для перехода на курс к Луне, надлежало выполнить в строго определенном месте траектории, которое на рис. 2.1 обозначено буквами TLI, что означает Trans Lunar Injection («переход на траекторию полета к Луне»). Сама «инъекция» состояла в точно дозированном включении двигателя третьей ступени при строго определенной ориентации корабля.

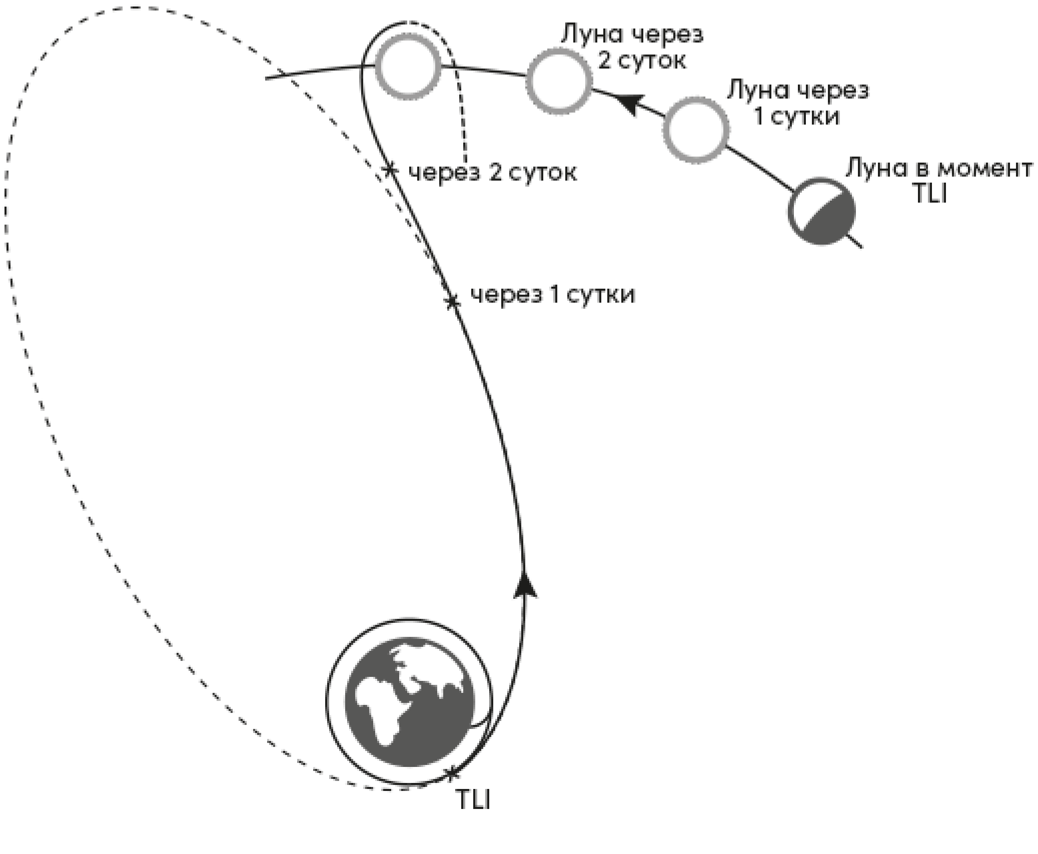



**Рис. 2.1.** Схема полета «Аполлона-8» к Луне. Размеры Земли и Луны указаны не в масштабе, соответствующем расстоянию между ними. Расстояние от центра Земли до центра Луны примерно в 30 раз превышает диаметр Земли и в 110 раз — диаметр Луны (а Земля «шире» Луны в 3,7

раза). Большой эллипс в действительности вытянут гораздо сильнее

За некоторое время перед этим из центра управления должна была поступить разрешающая команда. На связи с астронавтами был Майкл Коллинз, который в момент времени $T + 002{:}27{:}22$ (т.е. через 2 часа 27 минут и 22 секунды после старта) произнес: «Отлично, "Аполлон-8", есть готовность к переходу на траекторию к Луне, конец связи» (All right, Apollo 8. You are go for TLI, over). Это довольно техническая, сухая фраза, которую он к тому же многократно тренировался произносить (не ради улучшения своей дикции, а как часть тренировки в центре управления, где систематически моделировались всевозможные неисправности и отрабатывались действия по их диагностике и преодолению). Но она произвела на Коллинза впечатление, сравнимое с впечатлением от его собственного полета к Луне семь месяцев спустя:

И вот наступил серьезный момент. Пока мы вели обратный отсчет до включения двигателя [третьей ступени], чтобы выполнить TLI, безмолвие охватило центр управления. Из-за TLI этот полет отличался от предшествовавших ему шести полетов проекта «Меркурий», десяти «Джемини» и одного «Аполлона», отличался от любого путешествия, когда-либо предпринимавшегося людьми на каком бы то ни было транспортном средстве. Впервые в истории человек собирался ускорить себя до скорости освобождения, разорвать хватку гравитационного поля Земли и, как никто никогда не делал раньше, вылететь накатом в открытый космос. После TLI в Солнечной системе должны были появиться трое людей, которых следовало учитывать отдельно от остальных миллиардов, — трое, находящихся в другом месте, движение которых подчиняется другим правилам и среду обитания которых надо считать отдельной планетой. Они могли оглядывать Землю, а Земля могла глядеть на них, и каждая из сторон видела бы другую впервые. Люди в центре управления все это понимали; но не нашлось никаких специально написанных слов, чтобы выразить этот факт. Вместо них была только тонкая зеленая линия, показывающая, как «Аполлон-8» карабкается вверх, набирает скорость и исчезает, оставляя всех нас, застрявших на этой планете, в благоговении оттого, что мы, человечество, в конце концов получили возможность выбора — улететь или не улететь — и выбрали первое.

Я слышу здесь те же мотивы, что, видимо, подсказали название «Первая космическая ракета» ее создателям. Хотя к моменту ее запуска (январь 1959 г.) в космосе уже побывало четыре искусственных спутника Земли, уход *от* Земли, будь то к Луне или дальше, воспринимался, вероятно, как полет в «настоящий космос».

Включение двигателя «Аполлона-8» было рассчитано так, чтобы корабль перешел на вытянутую эллиптическую орбиту. После 5 минут и 17,72 секунды работы двигателя законы Ньютона вступили в свои права без усложнений со стороны реактивной тяги: движением управляла гравитация. Луна находилась в этот момент еще в удалении от места дальнейших главных событий. Если бы ее не было вовсе, вытянутый эллипс таковым бы и остался: «Аполлон-8» прошел бы его целиком (а потом снова и снова, пока не включил бы двигатель). Однако все мероприятие было затеяно ради встречи с Луной, которая сама не стоит на месте, а движется по орбите вокруг Земли.

*****

**Центр масс.** Строго говоря, Луна обращается не точно вокруг Земли (а Земля, в свою очередь, — не точно вокруг Солнца), даже если понимать «обращается вокруг тела *X*» как «движется по эллипсу, в фокусе которого находится центр тела *X*».

Земля и Луна в своем взаимном движении обращаются вокруг определенной точки, которая по факту находится внутри Земли, но не совпадает с ее центром. Она называется центром масс и для двух тел одинаковой массы находится точно посередине отрезка, соединяющего эти тела; для неодинаковых тел центр масс смещен из середины в сторону более массивного тела. Для примерно сферических тел, таких как Луна, планеты и звезды, все расстояния надо вычислять до центра каждого тела. Из-за того что Земля в 81,6 раза массивнее Луны, их общий центр масс расположен близко к центру Земли — настолько близко, что оказывается внутри Земли, на расстоянии около 4600 км от центра (тогда как радиус Земли — 6378 км).

### *Центр вращения — центр масс*

Если бы у Земли было два спутника — Луна и, скажем, Селена, то все три обращались бы вокруг *общего* центра масс. В зависимости от массы и удаления Селены от Земли и (меняющейся) конфигурации всей системы трех тел он вполне мог бы выходить за пределы Земли. То же самое происходит в Солнечной системе: там *всё* обращается вокруг общего центра масс. Из-за того что Солнце во много раз массивнее, чем все планеты, вместе взятые, центр масс находится вблизи или внутри Солнца. Поскольку планеты в разное время располагаются по разным сторонам от Солнца, положение центра масс меняется, если смотреть с Солнца. Когда две самые массивные планеты, Юпитер и Сатурн, находятся примерно на одном радиусе, проведенном от Солнца, центр масс заметно сдвигается в их сторону; но когда они расположены по противоположным сторонам, их вклады в сдвиг центра масс по отношению к центру Солнца почти компенсируют друг друга. Самый большой вклад в сдвиг центра масс от центра Солнца дает Юпитер. Центр масс системы Солнце — Юпитер находится даже не внутри, а снаружи Солнца, хотя и близко к его поверхности — на расстоянии немного меньшем, чем четыре диаметра Земли; от центра Солнца это 744 196 км. А центр масс системы Солнце — Земля сдвинут от центра Солнца всего на 450 км. Вращение Солнца вокруг центра масс Солнечной системы — если какой-то далекий наблюдатель его зафиксирует — возможность установить наличие у Солнца планет при взгляде со стороны какой-нибудь другой звезды.

*****

**Кто за рулем.** Пока «Аполлон-8» летит к Луне, а двигатель выключен, корабль *падает* — находится в состоянии свободного падения, главный признак которого — невесомость [26]. Чтобы встреча с Луной произошла как запланировано, в программу полета входила коррекция траектории этого свободного падения к Луне. Для этого надо было точно определить параметры того «большого» эллипса, которому следовал корабль после TLI, вычислить необходимую поправку, превратить ее в точное время включения и выключения двигателя и передать эти данные экипажу/бортовому компьютеру. Коррекция, проведенная почти точно через 11 часов после старта, оказалась очень незначительной: двигатель включили всего на две секунды.

На второй день полета — когда скорость корабля уменьшилась в несколько раз, как и полагается при движении по вытянутому эллипсу (*что чувствовал бы Кеплер*!..), — расстояние от корабля до Луны стало сокращаться, из-за чего ее притяжение постепенно вступало в силу и «большой эллипс» все заметнее переставал быть эллипсом; для успеха всего путешествия требовалось хорошо понимать, как и насколько. Математически записать точное решение для такой траектории невозможно, но человечество не сидело 250 лет после «Начал» Ньютона сложа руки, а разработало набор способов получать приближенные формулы, а за два десятилетия, предшествовавшие полету, более того, научилось поручать вычисления в каждом конкретном случае компьютеру — развив для этого специальные схемы вычислений.

Через 55 часов и 38 минут полета «Аполлон-8» оказался в точке, где притяжение Земли и притяжение Луны равны по величине. Из-за разницы масс Земли и Луны происходит это там, откуда до Луны в $\sqrt{81{,}6} \approx 9$ раз ближе, чем до Земли [27]. После этого Луна стала забирать корабль себе. Если бы притяжение Земли вдруг волшебным образом исчезло, то окололунной орбитой (как она видится наблюдателю на Луне) стала бы в точности гипербола (прилетел — отклонился — улетел), а в реальности получалось что-то вроде гиперболы, несколько испорченной влиянием Земли [28]. Но в любом случае оставаться на ней не было частью плана. Задание состояло в том, чтобы перейти на низкую, почти круговую окололунную орбиту. Для этого сначала провели небольшую промежуточную коррекцию траектории, а затем, в момент $T$ + 068:04:07, экипаж получил одобрение на LOI (Lunar Orbit Insertion) — включение двигателя для вывода корабля на окололунную орбиту. Здесь требовалось *притормозить* — уменьшить скорость свободного падения мимо Луны.

Разгоняться и тормозить в открытом космосе — действия совершенно одного порядка, потому что оба выполняются путем включения двигателя, и именно время этого включения (и, разумеется, тяга двигателя в соотнесении с массой корабля) определяет изменение скорости, которое в результате получится. Не имеет никакого значения, с какой скоростью двигался космический корабль до того. Если мы с вами летим рядом параллельными курсами на двух посудинах *в открытом космосе* и я включаю двигатель на 10 секунд, а вы нет, то я удалюсь от вас на одно и то же расстояние независимо от того, в направлении какой звезды я пожелал двигаться. Если эта звезда у вас впереди по курсу, то вы скажете, что я разогнался, если же сзади по курсу — то затормозил [29]. Мне же и разгон, и торможение, как и уход в любую сторону с одним и тем же по величине изменением скорости, стоят одинаковых затрат топлива.

*Разгон и торможение в открытом космосе — одно и то же*

Однако эффект, который производит на *орбиту* корабля приобретение им фиксированной прибавки к скорости, зависит от степени приближения к главному на текущий момент телу — тому, вблизи которого корабль движется. Для эффективного расхода страшно дорогого топлива (дорогого, разумеется, не из-за стоимости аэрозина и окислителя как таковых, а из-за расходов по их доставке к месту использования) маневр LOI — торможение — требовалось выполнить в точке наибольшего приближения к Луне. Но эта точка орбиты располагалась *за* Луной, где корабль был лишен связи с Землей. Центр управления оставался в неведении относительно успеха или неуспеха маневра до момента появления корабля из-за Луны — по правильной (в случае успеха) или неправильной траектории. Двигатель включился в момент *T* + 069:08:20,4 и проработал 4 минуты и 6,9 секунды. В центре управления прекрасно знали, что если двигатель сработал правильно, то связь не просто восстановится, но и произойдет это в рассчитанный заранее момент. Поэтому уже само появление «Аполлона-8» в эфире в момент *T* + 069:33:52 говорило, что двигатель отработал штатно. Сначала корабль вышел на эллиптическую орбиту вокруг Луны, которую чуть позже «циркуляризировали» — превратили в почти круговую путем десятисекундного включения двигателя. Таким образом, преодолев около 384 000 км до Луны, «Аполлон-8» поместил себя на орбиту всего в 110 км над поверхностью этой движущейся мишени — неплохое достижение с учетом того, что за все 66 часов после TLI свободное падение прерывалось включением двигателя в общей сложности не более чем на пять минут.

Потеря и восстановление связи, по наблюдениям экипажа, происходили *точно* в те моменты, когда их ожидали согласно информации из центра управления. Надо ли говорить, что такое предвидение — просто еще один результат расчетов по Ньютону. Участники событий прекрасно это понимали. Описывая уже свой собственный полет к Луне, через семь месяцев после того, как дорогу туда проложили Борман (командир), Андерс и Ловелл на «Аполлоне-8», Коллинз вернулся мыслями к тому времени, когда сам он был связным между центром управления и тремя только что упомянутыми астронавтами «Аполлона-8». Текущее же время в рассказе — первый день Коллинза вместе с Армстронгом и Олдрином на «большом» эллипсе на пути к Луне; дел не очень много, а напряжение велико.

Помню, как в прошлом декабре, во время полета «Аполлона-8», мой пятилетний сын задавал один и только один, но весьма конкретный вопрос: а кто у них за рулем? Не его ли это друг мистер Борман? Как-то вечером, когда в центре управления было тихо, я переадресовал его вопрос на борт, и Билл Андерс сразу ответил, что нет, за рулем не Борман, а Исаак Ньютон. Нельзя дать более верного и более четкого описания полета между Землей и Луной. Солнце притягивает нас, Земля притягивает нас, Луна притягивает нас — точно так, как это предсказал Ньютон. Откликаясь на эти центры притяжения, наша траектория отклоняется от своих начальных направления и скорости, полученных после TLI. На данный момент продолжает доминировать притяжение Земли, но к концу завтрашнего дня ее заменит Луна, и наша скорость снова начнет увеличиваться. До того нам необходимо слегка скорректировать наш маршрут, поскольку все это время после TLI мы медленно дрейфовали в сторону. На три короткие секунды включения двигателя служебного модуля Майк Коллинз сменит за рулем сэра Исаака Ньютона. Всего-то на три секунды! Я поражаюсь точности нашего путешествия, которое не перестают сравнивать с путешествием Колумба. Насколько я помню, по мере того как его экипаж выказывал все больше нетерпения из-за того, что земля никак не появлялась, и возрастало давление, чтобы повернуть назад, Колумб вроде бы подправил корабельный журнал так, чтобы из него следовало, будто «Нинья» ушла не так уж далеко, и поэтому вполне естественно, что земля еще не появилась в виду. Попробуйте представить себе, как я подправляю наш полетный план в случае, если бы Луна оказалась дальше, чем на расстоянии трехдневного путешествия. Что бы я сообщил компьютерам в Хьюстоне?

**Рис. 2.2.** «Восход Земли», видимый с борта «Аполлона-8». Фотография сделана Биллом Андерсом, по настойчивой просьбе которого Джим Ловелл быстро нашел цветную пленку. Ориентация корабля оказалась благоприятной для такого вида на четвертом по счету выходе из-за Луны. Один из запечатленных на фотографиях кратеров на поверхности позднее получил название «Андерсовский восход Земли» (Anders′ Earthrise)

События на лунной орбите «Аполлона-8» по-своему замечательны, но не являются здесь предметом нашего интереса (см., впрочем, рис. 2.2). Все это время драматическим вопросом было предстоящее возвращение. Для этого двигатель должен был снова включиться в точности в нужный момент, на нужное время и при нужной ориентации корабля — и снова за Луной, в период отсутствия связи с Землей. Экипаж получил рутинное напоминание о предстоящем включении двигателя, хотя *этот* маневр не относился к разряду «центр управления решит по обстоятельствам, выполнять или нет», — маневр Trans Earth Injection, переход на траекторию возвращения к Земле, *нужно* было выполнить. Двигатель *должен* был проработать под управлением бортового компьютера точно 3 минуты и 23,7 секунды. Полученная прибавка к скорости должна была заставить корабль уйти от Луны (перейти на гиперболическую траекторию, если говорить только о Луне) и вернуться в область доминирующего притяжения Земли. Маневр был несколько более ответственным, чем попадание на скоростном шоссе на нужную полосу, которая на следующей развязке уведет вас на запад, а не на юг. Запасного двигателя не было, как не было и никакого плана Б; никакая «Пинта» или «Санта-Мария» не пришла бы на помощь потерявшей ход «Нинье», и никакие ветра не прибили бы ее к берегу. Включение произошло в момент *T* + 089:19:16,6, но знали об этом только три человека, лишенные возможности с кем бы то ни было этим поделиться. В центре управления и в домах астронавтов в вынужденном полном бездействии 15 минут ждали возобновления связи и информации о том, как сработал двигатель.

*****

**Космические парковки XVIII века.** Один из двух последних (на момент написания книги и, боюсь, еще на какой-то период) людей на Луне, геолог Харрисон «Джек» Шмитт (первый астронавт NASA, не бывший профессиональным летчиком), одно время агитировал за посадку на обратной стороне Луны. Мы помним о невозможности радиообмена с теми, кто закрыт Луной. Для связи с кораблем пришлось бы запустить ретрансляционный спутник. Куда и как? Можно ли запустить космический аппарат так, чтобы он, не тратя или почти не тратя топлива, все время находился вблизи Луны, но *не обращался* бы вокруг нее (ведь иначе сам он периодически не будет видеть место посадки)?

Временно забудем про удобство радиосвязи и спросим себя: «*Можно ли, не тратя топлива, летать на постоянном расстоянии от Луны, но не обращаясь вокруг нее?*» Уже законы Кеплера (и, само собой, законы Ньютона) говорят, что тут есть проблема: чем больше радиус орбиты, тем больше времени занимает оборот вокруг Земли. Если запустить космический аппарат по орбите большего радиуса, чем орбита Луны, то он будет отставать от Луны; если поместить его на более близкую орбиту, то он будет убегать вперед. И в том и в другом случае получатся космические догонялки — расстояние между кораблем и Луной будет меняться с течением времени.

Оказывается тем не менее, что в околоземном пространстве есть пять орбит, по которым космические аппараты могут (или почти могут, как мы сейчас увидим) летать вокруг Земли, оставаясь неподвижными относительно Луны! Они называются точками (не орбитами, а именно точками) Лагранжа. За 185 лет до первого искусственного спутника Земли их описал Жозеф Луи Лагранж (родившийся в Турине и звавшийся от рождения Джузеппе Лодовико Лагранджиа) в своей математической статье о задаче трех тел. Три точки из этих пяти были открыты ранее Эйлером. Эти точки — все возможные ответы на поставленный выше вопрос. Вот подсказка к решению: попробуем сначала поместить космический аппарат на одну линию с Землей и Луной. Различных вариантов расположения Земли, Луны и спутника тогда три: ЗЛС, ЗСЛ и СЗЛ. Вариант ЗЛС означает, что спутник расположен на одной линии с Землей и Луной, но *за* Луной, если смотреть с Земли (точка $L_2$ на рис. 2.3). При этом Луна тянет спутник точно в ту же сторону, что и Земля, и, *пока спутник остается* точно на линии, соединяющей Землю и Луну, ничего другого Луна для него не делает: она работает как усилитель притяжения к центру масс (который тоже находится на линии, соединяющей Землю и Луну). А по законам Ньютона более сильное притяжение означает, что спутник движется по орбите быстрее, чем если бы действовало только притяжение Земли. Это отличная идея, если только удастся двигаться *ровно настолько* быстрее, чтобы все время оставаться на заветной линии Земля — Луна: такое расположение будет поддерживать то самое «усиленное» притяжение к центру масс, благодаря которому спутник может лететь так быстро, чтобы все время оставаться за Луной, благодаря чему продолжать испытывать более сильное притяжение к центру масс… Эта «история про курицу и яйцо» выражается уравнениями, решение которых и нашли сначала Эйлер (1760), а потом Лагранж (1772): точка $L_2$, где все складывается так удачно, существует! На ней и основано решение проблемы ретрансляционного спутника — с небольшим уточнением, которое будет сделано чуть ниже.

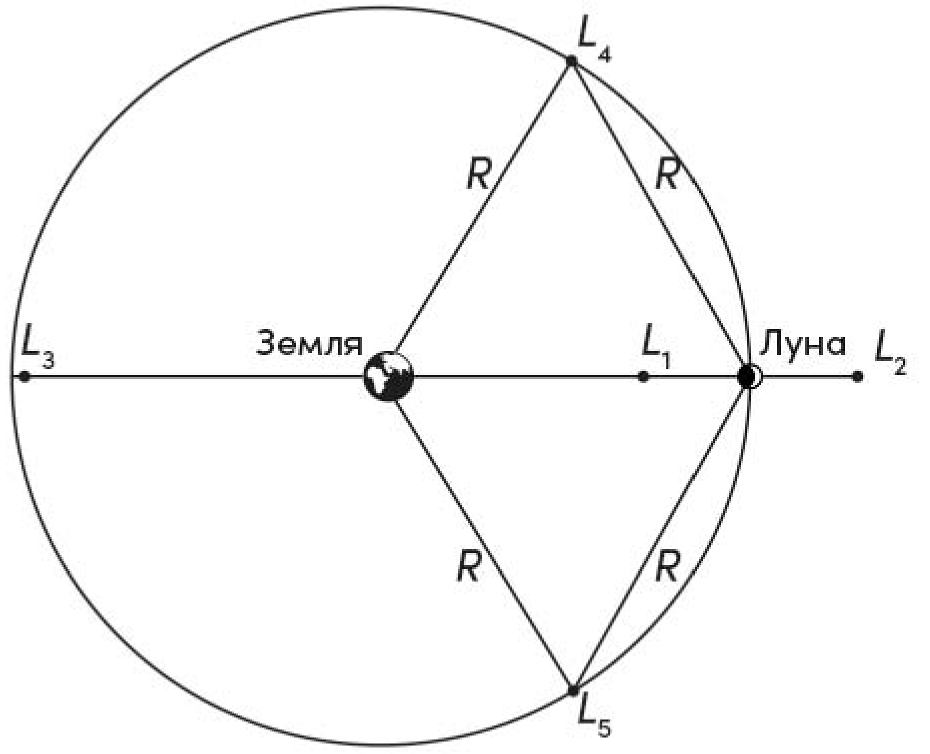



**Рис. 2.3.** Точки Лагранжа $L_1 - L_5$ в системе Земля — Луна

Другой интересный вариант — ЗСЛ, что означает спутник *между* Землей и Луной. На этот раз Земля и Луна тянут спутник в разные стороны: с точки зрения спутника это означает, что притяжение к центру масс слабее, чем если бы его притягивала одна только Земля. А это, в свою очередь, означает, что он летит по орбите выбранного радиуса медленнее, чем полетел бы в отсутствие Луны. Снова появляется надежда на успех, потому что «медленнее, чем обычно» — это как раз то, что требуется, ведь и спутник находится ближе к центру вращения, чем Луна. Мы снова ищем такую точку, где разность двух сил притяжения позволяет, находясь ближе к Земле, чем Луна, не обгонять Луну, а оставаться на линии Земля — Луна, из-за чего две силы притяжения продолжают вычитаться, из-за чего скорость движения по орбите меньше, чем если бы Луны не было, из-за чего тело все время остается на линии Земля — Луна, из-за чего оно испытывает настолько меньшую силу притяжения к центру, что движется ровно настолько медленнее, чтобы… Эта «самозацикливающаяся» фраза снова описывает уравнение. Математический факт с непосредственным приложением к космонавтике состоит в том, что решение у этого уравнения есть, и оно определяет единственную точку между Землей и Луной — точку $L_1$ на рис. 2.3. Это — подходящее место для космической базы: прекрасные условия радиосвязи и с Землей, и с Луной плюс определенные удобства путешествия к обоим телам. Это, собственно говоря, перевалочная точка: имея целью Луну, но долетев с Земли сначала на $L_1$, мы дополнительно потратимся на эту «остановку» очень незначительно. Поэтому отсылать, например, грузы в $L_1$ и хранить их там до момента, когда они понадобятся на Луне, можно практически без лишних затрат топлива по сравнению с прямой доставкой, но имея при этом преимущество в логистике.

L*₁* — *перевалочная точка*

Наконец, вариант СЗЛ означает, что спутник находится с противоположной стороны от Земли, чем Луна. И Земля, и Луна притягивают его в сторону центра масс системы Земля — Луна, т.е. в сторону центра вращения; притяжение Луны при этом сказывается слабо из-за большого расстояния до нее, но все же немного добавляет к притяжению в сторону центра масс (и главное — не утягивает спутник куда-то в сторону). Опять-таки требуется решить уравнение, говорящее, что совместное притяжение Земли и Луны позволяет обращаться вокруг Земли синхронно с Луной; этим однозначно определяется расстояние от центра масс (а потому и от центра Земли). Это точка $L_3$ на рис. 2.3. Она оказывается совсем немного дальше от центра масс (примерно в 1,017 раза дальше), чем Луна, но немного ближе к центру Земли, чем расстояние от него до Луны.

Разумеется, точки Лагранжа имеются не только в системе Земля — Луна. Неважно, как называются два массивных тела, — математика одна и та же, только относительные расстояния от центра до $L_1$, $L_2$ и $L_3$ несколько различаются в зависимости от соотношения масс двух больших тел. В системе Солнце — Земля практически важны две точки Лагранжа: уже знакомая нам $L_2$ (дом для космических телескопов, как мы очень скоро увидим) и $L_1$ между Солнцем и Землей (рис. 2.4). Из точки $L_1$ в системе Солнце — Земля открывается ничем не затемняемый постоянный вид на Солнце с одного и того же расстояния, и там работают приборы, которые именно в этом и нуждаются. Среди них — космическая обсерватория по наблюдению Солнца SOHO (Solar and Heliospheric Observatory Satellite). Другой аппарат, ACE (Advanced Composition Explorer), использует особенности этой точки Лагранжа, пожалуй, в еще большей мере: находясь «вверх по течению» от Земли вдоль потока солнечного ветра, он в реальном времени передает данные о магнитном поле и о потоке частиц, летящих от Солнца, что позволяет уточнять прогнозы космической погоды — влияния Солнца на околоземное пространство (магнитосферу и ионосферу). На смену этому ветерану точки $L_1$ уже запущен аппарат DSCOVR (Deep Space Climate Observatory), по совместительству — автор известных фотографий, показывающих прохождение Луны на фоне Земли.

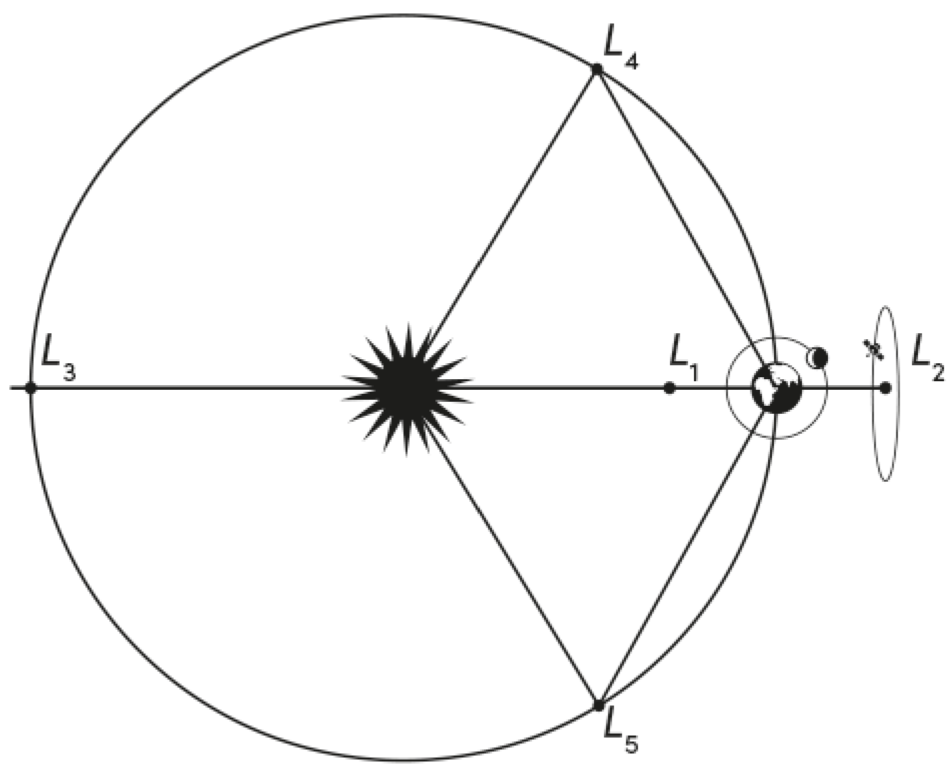



**Рис. 2.4.** Точки Лагранжа $L_1 – L_5$ в системе Солнце — Земля. Здесь изображено, по существу, то же самое, что на рис. 2.3, но для другой пары небесных тел. Луна на *этом* рисунке не играет никакой роли

Точка $L_3$ в системе Солнце — Земля (см. рис. 2.4) не нашла себе практических применений (и правда, чего ради стоило бы тащиться в такую даль?), но оказалась богатой темой для фантастических нарративов разного рода; не счесть замышляющих что-то инопланетян или других заговорщиков, желающих там обосноваться. Впрочем, трудно оспорить высказывание, что *если* какая-то развитая цивилизация [существует и] имеет цель не просто присутствовать в Солнечной системе, но еще и пребывать на фиксированном расстоянии от Земли и *если* при этом они желают оставаться на своем корабле, не высаживаясь на поверхность, но не хотят тратить много топлива, — то лучшего места, чем лагранжевы точки, не найти. Но на меня производит, пожалуй, большее впечатление не предполагаемый галактический заговор, а тот факт, что к моменту начала космических полетов они (эти зеленые человечки), без сомнения, открыли бы все пять этих точек, уж не знаю, как они там у них называются.

Впрочем, мы еще не знаем, что такое точки $L_4$ и $L_5$, у нас открытые Лагранжем в дополнение к первым трем, известным Эйлеру. Определить их положение, когда ответ уже известен, легче легкого: измеряем расстояние от Солнца до Земли и воображаем равносторонний треугольник, одна из сторон которого как раз и соединяет Солнце и Землю (см. рис. 2.4). У равностороннего треугольника все стороны *равны*, поэтому расстояния от его третьей вершины до Солнца и до Земли одинаковы. Это важно! В этой вершине притяжение Солнца во столько раз сильнее, чем притяжение Земли, во сколько раз Солнце массивнее. А дальше следует несложное упражнение в геометрии: две такие силы притяжения складываются так, что в итоге тело в точке $L_4$ испытывает суммарную силу, направленную в точности к центру масс системы Солнце — Земля, а по величине эта сила ровно такая, чтобы поддерживать обращение вокруг этого центра масс на заданном расстоянии — на том самом, которое определяется из нашего треугольника. С точкой $L_5$ все то же самое, только если $L_4$ опережает Землю в ее движении вокруг Солнца, то $L_5$ отстает. Обе — на один и тот же угол в 60°.

### *Точки Лагранжа — это некеплеровы орбиты*

Итог про точки Лагранжа: это такие положения в системе двух тел, где совместное притяжение этих тел способно поддерживать *синхронное обращение* малого третьего тела. Это ответ на заданный выше вопрос, но слово «точка», как мы видим, понимается тут несколько вольно: каждая из точек Лагранжа вообще-то задает *орбиту*, потому что вся картинка на рис. 2.4 вращается как единое целое; это буквально точка только для наблюдателя, который сам обращается вокруг общего центра масс — скажем, сидя на Земле, если мы говорим о системе Солнце — Земля. И еще я забыл сказать, что вся схема работает хорошо, когда орбиты в системе двух тел близки к круговым. И конечно, помещать на эти орбиты следует тела малой массы; такое условие означает, что притяжение этого третьего тела не должно оказывать обратного воздействия на два больших тела (Солнце и Землю в данном случае). И наконец, пояснения требует слово «поместить»: все тела, помещенные в какую-либо точку Лагранжа, должны быть разогнаны до необходимой скорости для движения по орбите, которую описывает выбранная точка Лагранжа, когда конфигурация, изображенная рис. 2.4, вращается как целое. Этого разгона совместное тяготение двух больших тел совсем никак не обеспечивает — но оно обеспечивает ровно такое притяжение к центру вращения, при котором тела, получившие подходящую скорость, могут оставаться на этой орбите.

*****

**Гало-орбиты.** Идея высадиться на обратной стороне Луне в начале 1970-х реализована не была, Сернан и Шмитт прилунились на «Аполлоне-17» на видимой стороне Луны и три дня ездили там на ровере; но китайский аппарат «Чанъэ-4», который в самом начале 2019 г. доставил луноход «Юйту-2» на обратную сторону Луны (рис. 2.5), вел связь через спутник «Цюэцяо», заблаговременно отправленный к той самой точке $L_2$ системы Земля — Луна, в каких-то 64 500 км за Луной. Здесь наконец пора дать обещанное уточнение про ретрансляционный спутник. Каждый раз, когда мы слышим про космический аппарат «в точке Лагранжа», надо представлять себе что-то вроде орбиты вокруг точки Лагранжа.

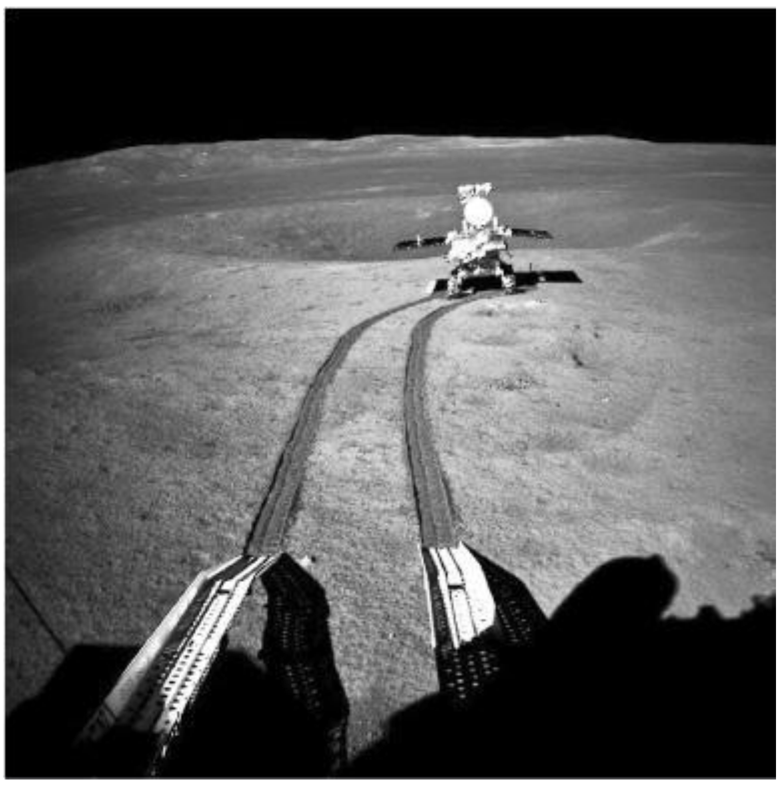


**Рис. 2.5.** Луноход «Юйту-2» на обратной стороне Луны. И его, и Землю постоянно видит ретрансляционный спутник, находящийся вблизи точки Лагранжа $L_2$ системы Земля — Луна

Дело в том, что с точками Лагранжа все-таки есть проблема: $L_1$, $L_2$ и $L_3$ неустойчивы [30]. Карандаш может некоторое время стоять вертикально на вашем столе, но рано или поздно упадет по той или иной причине, например если вы откроете окно или из-за какой-то еще флуктуации. Для космического аппарата, помещенного в точку Лагранжа, причин для подобных флуктуаций — нарушений точного баланса положения, скорости и сил притяжения — хоть отбавляй (притяжение других тел в Солнечной системе оказывает воздействие, орбиты отличаются от круговых, скорость оказывается не идеально точной для пребывания в точке Лагранжа и т.д.). В результате аппарат начинает «сползать» — удаляться от математически определенной точки Лагранжа. Хотя события и будут развиваться намного медленнее, чем при опрокидывании карандаша, неустойчивость означает, что по мере сползания на космический аппарат действуют силы, уводящие его только дальше [31]. Поэтому начавшееся по любой причине сползание не исправится само; если там оказался астероид, то он со временем сдвинется куда-то прочь, а если мы (или инопланетяне) желаем, чтобы там оставалось какое-то устройство, то потребуются включения корректирующего двигателя. Да, некоторое количество топлива тратится, но очень небольшое — именно из-за того, что дело происходит вблизи точки равновесия с достаточно вяло проявляющей себя неустойчивостью. Космический аппарат, который время от времени заботится о своем положении, может поэтому описывать вокруг точки Лагранжа что-то вроде орбиты, но это орбита *не* в кеплеровском смысле, поскольку в сторону самой точки Лагранжа нет силы притяжения, а скорее контролируемый дрейф — сначала сползание в одну сторону, затем короткое включение двигателя для изменения направления движения, последующее сползание в несколько иную сторону и так далее. Китайский ретрансляционный спутник летал вокруг $L_2$ по такой орбите, чтобы Луна не загораживала ему вид на Землю. При взгляде с Земли эта орбита проходит снаружи от лунного диска, нигде не заходя за него, — как «гало» вокруг Луны. Поэтому такие орбиты иногда называют гало-орбитами.

Вариация на тему гало-орбит предполагается и для Лунной орбитальной платформы (Lunar Gateway) — международной космической станции «вблизи» Луны, создание которой планируется при ведущей роли NASA. Станция должна находиться на вытянутой гало-орбите, «чувствительной» к наличию обеих точек Лагранжа $L_1$ и $L_2$, с максимальным приближением к поверхности Луны на 3000 км (что несколько меньше диаметра Луны) и максимальным удалением 70 000 км. Станция будет приближаться к Луне над ее северным полюсом, а уходить далеко — над южным, что на взгляд с Земли можно изображать как *под* южным: орбита «свисает вниз», почти перпендикулярно плоскости, в которой сама Луна обращается вокруг Земли, и уходя сильно ниже этой плоскости. Это одна из *южных* орбит в отношении Луны, южный полюс которой тоже «смотрит вниз», и в течение почти всего времени, за исключением коротких периодов прохода над северным полюсом, станция будет находиться в прямой (радио)видимости от предполагаемого места высадки на Луну вблизи ее южного полюса. Для периодических «исправлений» орбиты потребуются включения двигателя, сообщающие станции суммарное изменение скорости всего на 10 м/с за год.

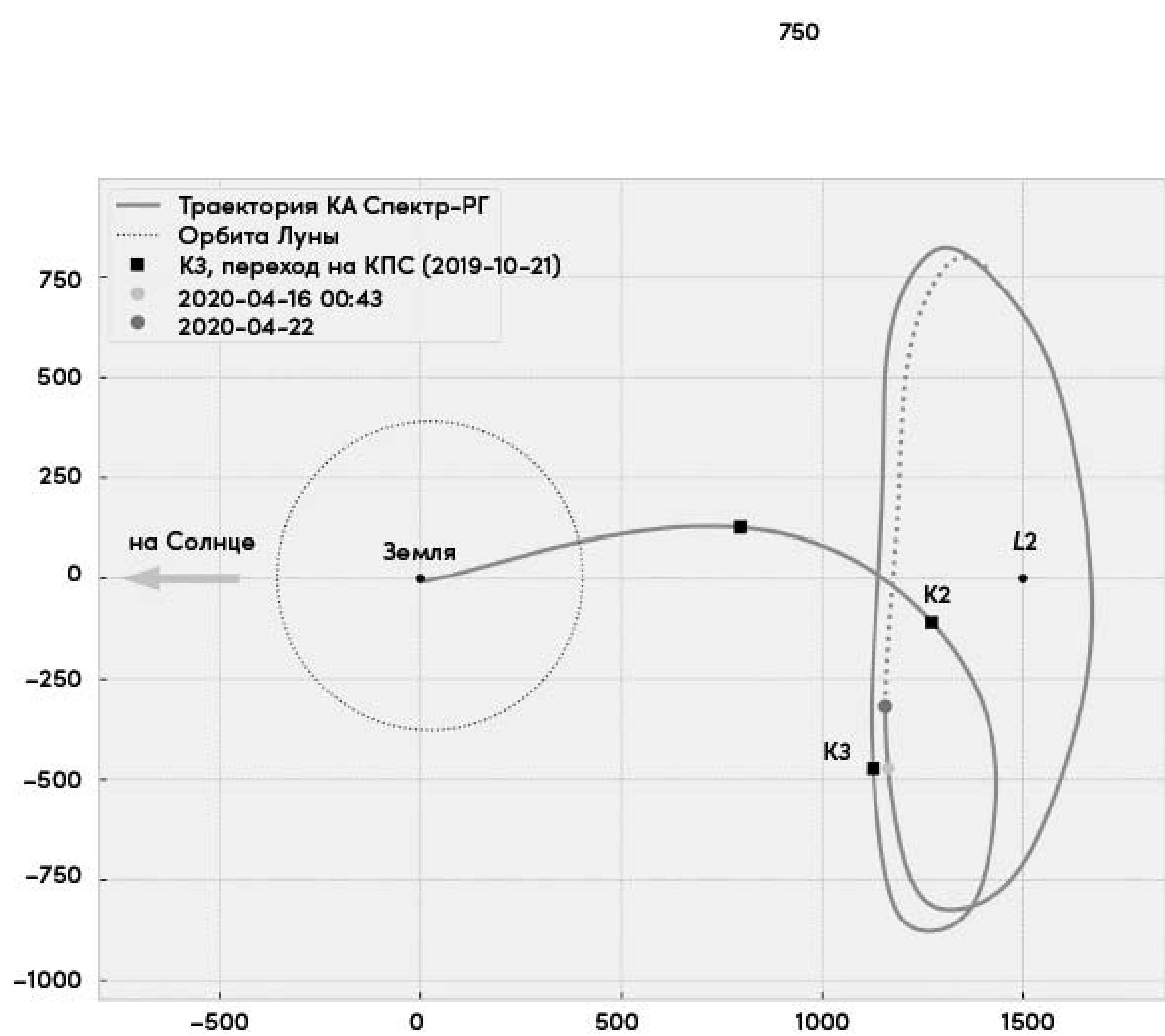



**Рис. 2.6.** Траектория аппарата «Спектр-РГ», работающего вблизи точки Лагранжа $L_2$ системы Солнце — Земля, данные ИПМ им. М. В. Келдыша РАН [25]

Если говорить про систему Солнце — Земля, то окрестности точки $L_2$ оказываются идеальной «движущейся парковкой» — площадкой для астрономических наблюдений. Эта точка Лагранжа расположена на расстоянии 1,5 млн км от Земли — что в сто раз меньше расстояния от Земли до Солнца, но все же в четыре раза дальше, чем находится от нас Луна. Именно из $L_2$ системы Солнце — Земля изучали реликтовое излучение (космический микроволновой фон) аппараты WMAP и «Планк» [32]. Относительно недавно там же поселился и «Спектр-РГ» — российско-германская астрофизическая обсерватория; аппарат, запущенный в июле 2019 г., за 100 дней добрался до окрестностей $L_2$, а к середине апреля 2020 г. выполнил один оборот по орбите, которая проходит на расстоянии до 400 000 км от $L_2$, перпендикулярно линии Солнце — Земля (рис. 2.6). Контроль за дрейфом в сторону от точки Лагранжа требует краткосрочных включений двигателя каждые 40–70 дней. В результате космический аппарат будет делать что-то вроде полного оборота в течение примерно полугода, поднимаясь над плоскостью земной орбиты и опускаясь под нее;

траектория образует не очень аккуратный «моток» вокруг $L_2$, мало похожий на строгий и совершенный эллипс [33].

Туда же, в окрестность точки $L_2$ системы Солнце — Земля, в январе 2022 г. добрался преемник знаменитого космического телескопа «Хаббл» — JWST [34]. Его задачи — наблюдать самые далекие от нас объекты во Вселенной (интересные нам в первую очередь из-за эффекта «машины времени», который мы обсуждаем на прогулке 5), следить за формированием звезд и планет, а также получать прямые изображения планет (и отдельно — взрывающихся звезд). Телескоп требуется держать очень холодным, и совокупность предъявляемых требований и определила положение для его устойчивого размещения внутри «круговорота» Солнечной системы. Для него выбрана гало-орбита, проходящая на расстоянии от 250 000 до 832 000 км от точки $L_2$. Чтобы его солнечные батареи постоянно освещались, аппарат не должен попадать в тень, отбрасываемую Землей. При этом, однако, давление солнечного света на щит, защищающий телескоп от нагревания Солнцем, становится фактором воздействия, уводящим аппарат в сторону. Телескоп будет подправлять свое положение каждые три недели. Суммарное годовое изменение скорости, которое необходимо обеспечить, включая двигатель, составит от 2 до 4 м/с. Это чепуховые поправки по сравнению со скоростью движения самой $L_2$ вокруг Солнца, которая близка к скорости Земли в 30 000 м/с, и их малость определяется именно близостью аппарата к точке Лагранжа. То же самое верно, конечно, и в отношении аппаратов, наблюдающих за Солнцем и солнечным ветром «из точки» $L_1$: ценой очень скромных затрат топлива они описывают вокруг этой точки Лагранжа несколько нерегулярные орбиты с характерными радиусами в несколько сотен тысяч километров.

*****

**Греки и троянцы.** Лагранж умер за 144 года до запуска первого искусственного спутника Земли, и не исключено, что он рассматривал пять специальных точек в системе двух тел как (всего лишь) математическое упражнение. Но нам, забравшимся на плечи гигантов, теперь видно, что интересная математика, возникающая при описании какой-либо реальной физической системы, — это почти гарантия обнаружения физического эффекта, в котором математическая достопримечательность тем или иным способом себя проявляет. И действительно, спустя более столетия после рассуждений Лагранжа астрономы начали открывать *троянцев*!

Если для замышляющих что-то зеленых человечков точки Лагранжа — это хорошие места для парковки, то для космических обломков и мусора точки $L_4$ и $L_5$ оказываются тихими закутками, где они оседают. В этих точках Лагранжа *собираются* астероиды, потому что там иная картина с устойчивостью, чем в трех других точках Лагранжа. С первого взгляда, правда, ситуация даже хуже, потому что баланс сил притяжения таков, что при выходе из точки Лагранжа в любом направлении возникает сила, которая побуждает уходить дальше. Но это только если смотреть на то, как работают силы притяжения. Кроме притяжения, в дело вступает движение. Сама точка Лагранжа движется по окружности, а в этом случае есть вот какая новость: при движении относительно вращающейся системы тело испытывает действие дополнительной силы [35]. Это не совсем обычная сила, потому что у нее нет физического источника, она *ощущается* только во вращающейся системе и связана с довольно простым обстоятельством: если вы уже стоите на вращающейся карусели-платформе, то, значит, вы приобрели ту же скорость, что и пол у вас под ногами. Но разные участки пола движутся с разными скоростями! Те, которые близко к центру, движутся медленно, а те, что у края, — быстро или очень быстро. Когда вы начнете *двигаться* — скажем, захотите перейти от края карусели к центру, — вы обнаружите, что, делая каждый следующий шаг, вы ставите ногу на участок пола, движущийся медленнее, чем тот, где вы только что находились. В вашем восприятии это будет выражаться в некоторой силе, действующей на вас со стороны пола и направленной поперек вашего движения. То же самое происходит в «гравитационной карусели» в окрестности (для определенности) точки $L_4$: по мере удаления от $L_4$ уходящее тело набирает скорость относительно этой точки Лагранжа. Но, поскольку все происходит во вращающейся системе, движущееся тело испытывает дополнительное воздействие по мере набора скорости. Результат оказывается приятным сюрпризом: баланс всех факторов в окрестности $L_4$ таков, что при развитии сползания тело не уходит прочь, а, набрав некоторую скорость, отправляется по орбите вокруг точки $L_4$. Все то же самое происходит и в окрестности $L_5$.

Точки $L_4$ и $L_5$ оказываются устойчивыми, если, как показывает математика, более массивное из двух больших тел тяжелее другого в $\frac{1}{2}(25+3\sqrt{69}) = 24{,}95993\ldots$ раза или больше. Это условие выполнено для пары Земля — Луна и с большим запасом выполнено для всех пар Солнце — планета.

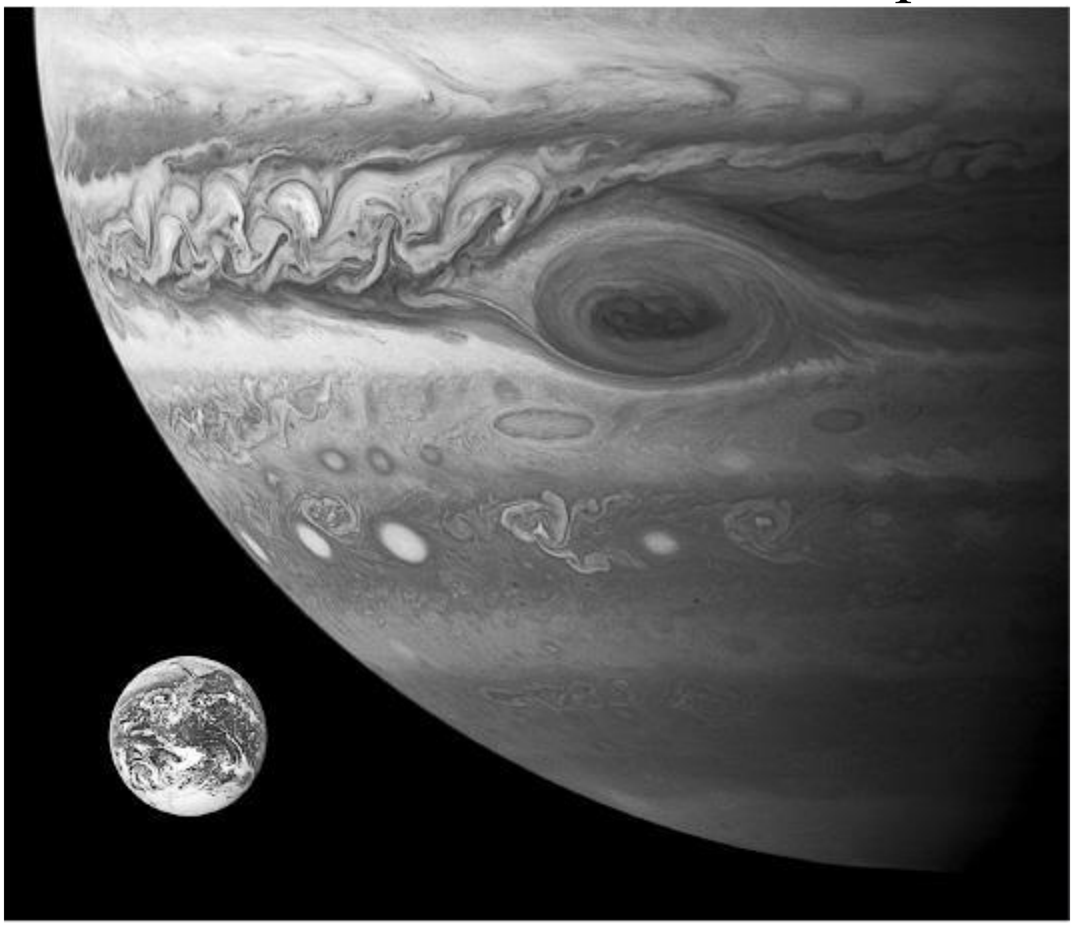


**Рис. 2.7.** Земля и Юпитер, если бы они могли оказаться рядом

Раз оказавшись вблизи $L_4$ или $L_5$ в системе Солнце — планета, астероиды имеют тенденцию там и оставаться. Сильнее всего этот эффект проявляется, разумеется, в самой гравитационно сильной паре тел в Солнечной системе. Это Солнце и Юпитер (который в 317 раз массивнее Земли; рис. 2.7). В точках Лагранжа $L_4$ и $L_5$ системы Солнце — Юпитер собралось, по оценкам, около 1 млн астероидов, превышающих 1 км в диаметре (возможно, примерно столько же, сколько их в поясе астероидов между Марсом и

Юпитером). Они названы именами участников Троянской войны и даже разбиты по лагерям:

$L_4$**.** Это лагерь греков. Застрявшие там астероиды носят, в частности, имена (начиная с тех, которые должны звучать хоть сколько-нибудь знакомо, если никуда не подглядывать): Ахилл, Нестор, Агамемнон, Одиссей, Аякс, Менелай, Филоктет, Неоптолем; а еще — Идоменей, Протесилай, Талфибий, Менесфей, Подалирий и многие другие. Но там же и Гектор — астероид, названный именем жителя Трои еще до того, как пробила себе дорогу идея номенклатурного разделения этих небесных тел на два враждующих лагеря, между которыми лежит треть орбиты Юпитера (больше полутора миллиардов километров).

$L_5$**.** Здесь совсем другая картина — это лагерь защитников Трои. Среди прочих тут обитают Приам, Эней, Главк, Сарпедон, Лаокоон, Парис, если снова начинать со знакомо звучащих имен, а кроме того, Алкафой, Пандар, Пулидам, Ифидам, Сергест, Астеропей и еще многие. Единство защитников Илиона тоже нарушено, еще до появления коня: к ним присоединился Патрокл.

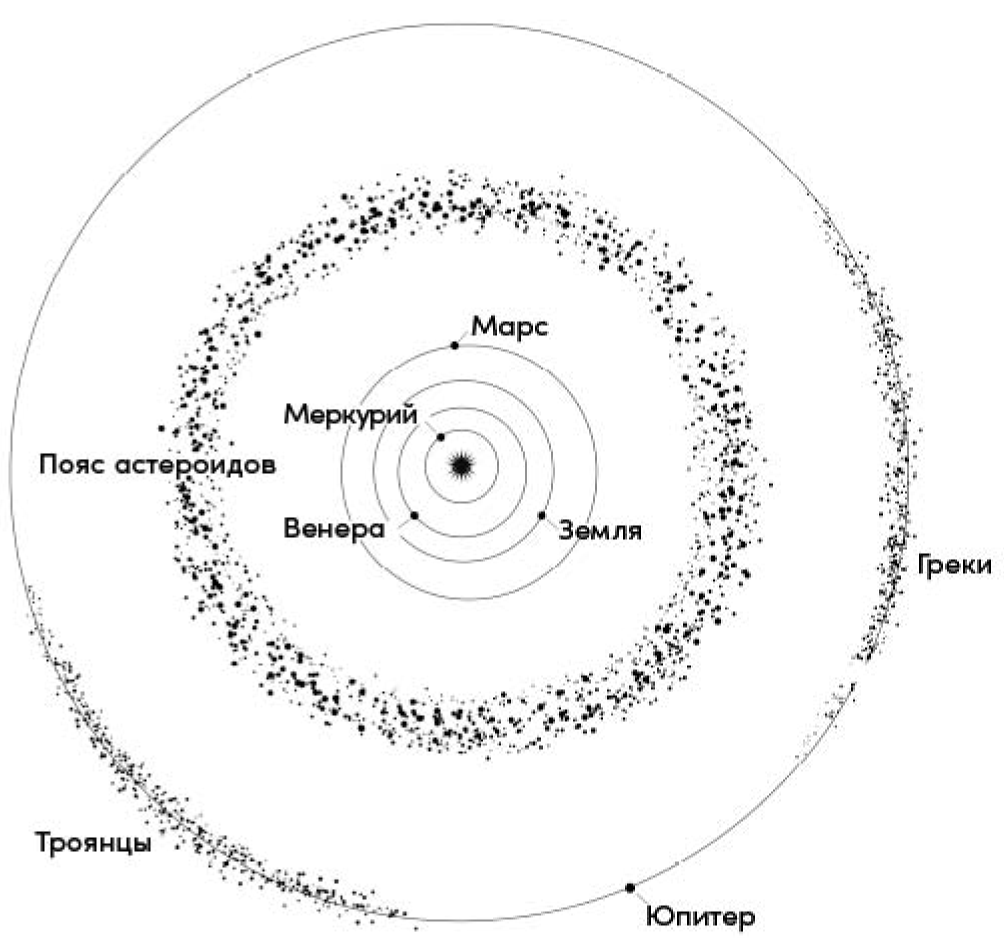



**Рис. 2.8.** Греки и троянцы по две стороны от Юпитера. Их разделяет расстояние, равное примерно десяти расстояниям от Земли до Солнца. Ближе к Солнцу, внутри орбиты Юпитера находится главный пояс астероидов

**Гектор и Патрокл.** Пребывание Гектора и Патрокла в «чужих» станах в парадоксальном смысле логично: именно Гектор убил Патрокла («Нет великого Патрокла! Жив презрительный Терсит!»), и только поэтому Ахилл вернулся на поле боя — где и сразил Гектора [36].

Разумеется, ни греки, ни троянцы не сосредоточены все в одной точке, а занимают некоторый участок вдоль траектории Юпитера. Происходит все это довольно далеко от Земли (рис. 2.8), поэтому открыты они были совсем не сразу. Слово «троянцы» используют также в отношении астероидов, скапливающихся вблизи точек $L_4$ и $L_5$ других пар Солнце — планета; поскольку Солнце — это всегда Солнце, говорят просто о троянцах, например, Нептуна или Сатурна. Слово относится и к опережающим, и к отстающим; одного эпизода Троянской войны на Солнечную систему достаточно.

*****

**Полет из пращи.** Путешествия к астероидам и планетам — это относительно далекие путешествия, оказывающиеся долгими при доступных нам скоростях. Разогнаться быстрее нелегко: топлива хватает только на что-то вроде TLI — единовременный разгон при старте с околоземной орбиты; хорошо, если потом остается еще немного на маневры. Дефицит топлива определяется трудностью его доставки к месту использования. Реактивная тяга основана на том, что, выбрасывая что-то «назад», реактивный аппарат движется «вперед»; здесь важна скорость, с которой некоторый «агент» выбрасывается назад (в подавляющем большинстве реально существующих реактивных двигателей это горячий газ). Реактивный аппарат несет с собой источник энергии для этого «выбрасывания» — в современных ракетах это горючее (например, керосин или метан) и окислитель. Их соединение обеспечивает горение, при котором и выделяется энергия. И вот здесь скрыт ключевой момент: необходимость с самого старта нести с собой все топливо (горючее и окислитель), в том числе и тот запас, который понадобится на более поздних этапах полета. Не только «полезную нагрузку», но и это топливо необходимо *разогнать* на более ранних этапах движения, а для этого разгона требуется дополнительное топливо, которое, в свою очередь, необходимо разогнать, для чего нужно еще сколько-то топлива, и так далее. Это удручающее положение дел математически выражается формулой Циолковского — соотношением, которое на основе законов движения Ньютона говорит, какой должна быть стартовая масса ракеты, чтобы разогнать желаемую «полезную» массу до заданной скорости, выбрасывая продукты горения с заданной скоростью относительно ракеты. Удручающим здесь является *характер* этой зависимости: увеличение конечной скорости достигается колоссальным увеличением массы ракеты — т.е. количества топлива — при старте.

*Формула Циолковского не очень оптимистична*

Но пока наши топливные возможности существенно ограничены, в дальнем путешествии можно заметно увеличить скорость, отобрав *совсем ничтожную* часть количества движения у встреченной по дороге планеты. Для этого действия иногда употребляют звучное название «гравитационная праща» (есть и более технический термин: «гравитационный маневр»). Это остроумный способ извлечения пользы — разгона или, когда это нужно, торможения — из совместной игры гравитации и движения [37]. Первым космическим аппаратом, исполнившим гравитационную пращу, была «Луна-3», полетевшая в космос в 1959 г. как «Автоматическая межпланетная станция». Она не только впервые выполнила этот маневр, но и впервые сфотографировала обратную сторону Луны, что вызвало колоссальный интерес и было огромным достижением, несмотря на никудышное по современным стандартам качество успешно присланных 17 (из 29 сделанных) фотографий. Пытаясь представить себе ощущение чуда от первого за всю историю человечества взгляда на то, чего увидеть «нельзя», я думаю, что качество фотографий было не самым главным в общественном восприятии этого события. (Первыми же людьми, посмотревшими на обратную сторону Луны своими глазами, был экипаж «Аполлона-8».) Луна направила станцию обратно к Земле, а из-за движения самой

Луны при встрече изменилась плоскость орбиты станции: она повернулась примерно вокруг линии Земля — Луна, проведенной в момент облета Луны (рис. 2.9). «Луна-3» ушла от Луны таким образом, чтобы при возвращении к Земле пролететь над Северным полушарием и передать фотографии на станции связи на территории СССР (что оказалось непросто из-за слабости сигнала). Она вообще не имела маршевого двигателя, и весь этот полет требовалось рассчитать заранее (расчетами по Ньютону занималась команда под руководством Келдыша).

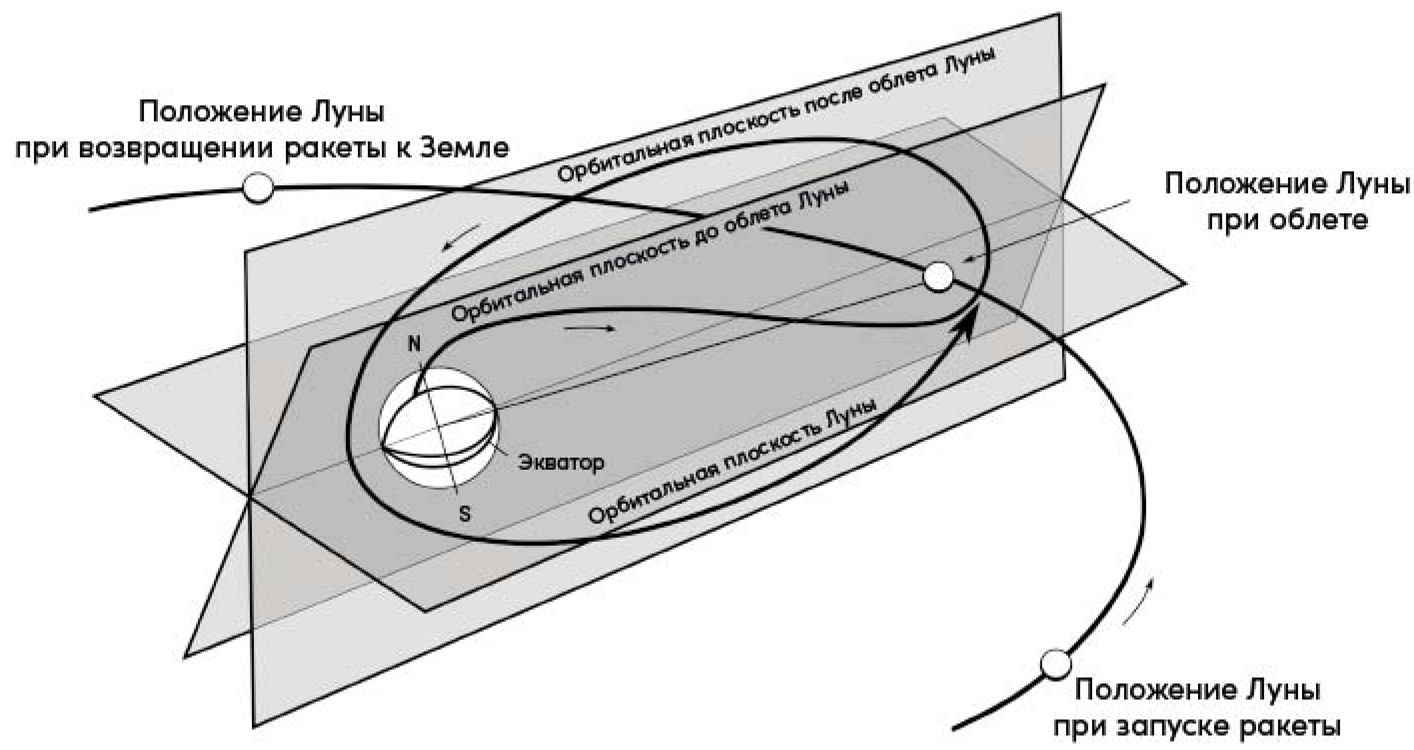



**Рис. 2.9.** «Луна-3», Земля и Луна. Гравитационный маневр

С тех пор гравитационный маневр применяли множество раз. «Вояджер-1», запущенный в 1977 г. (на 16 дней позже «Вояджера-2»), получил прибавку к скорости, позволяющую ему сейчас, когда вы это читаете, покидать пределы Солнечной системы с рекордной скоростью — около 61 000 км/ч, приобретенной в основном у Юпитера и Сатурна (рис. 2.10). В пересчете на космические масштабы это около 3,6 а.е./год. Без помощи планет «Вояджеры» не пролетели бы и полпути до своих положений на настоящий момент. 25 августа 2012 г. «Вояджер-1» стал первым искусственным аппаратом, вышедшим в *межзвездное* пространство, если проводить границу там, где попутный солнечный ветер наконец оказывается слабее встречного галактического ветра. Потребуются тем не менее еще *сотни* лет, чтобы он достиг расстояний, на которые уходят от Солнца наиболее далекие из идентифицированных тел Солнечной системы, такие как 2013 $SY_{99}$, Лелеакухонуа (первоначально известная как Гоблин) и 2014 $FE_{72}$.

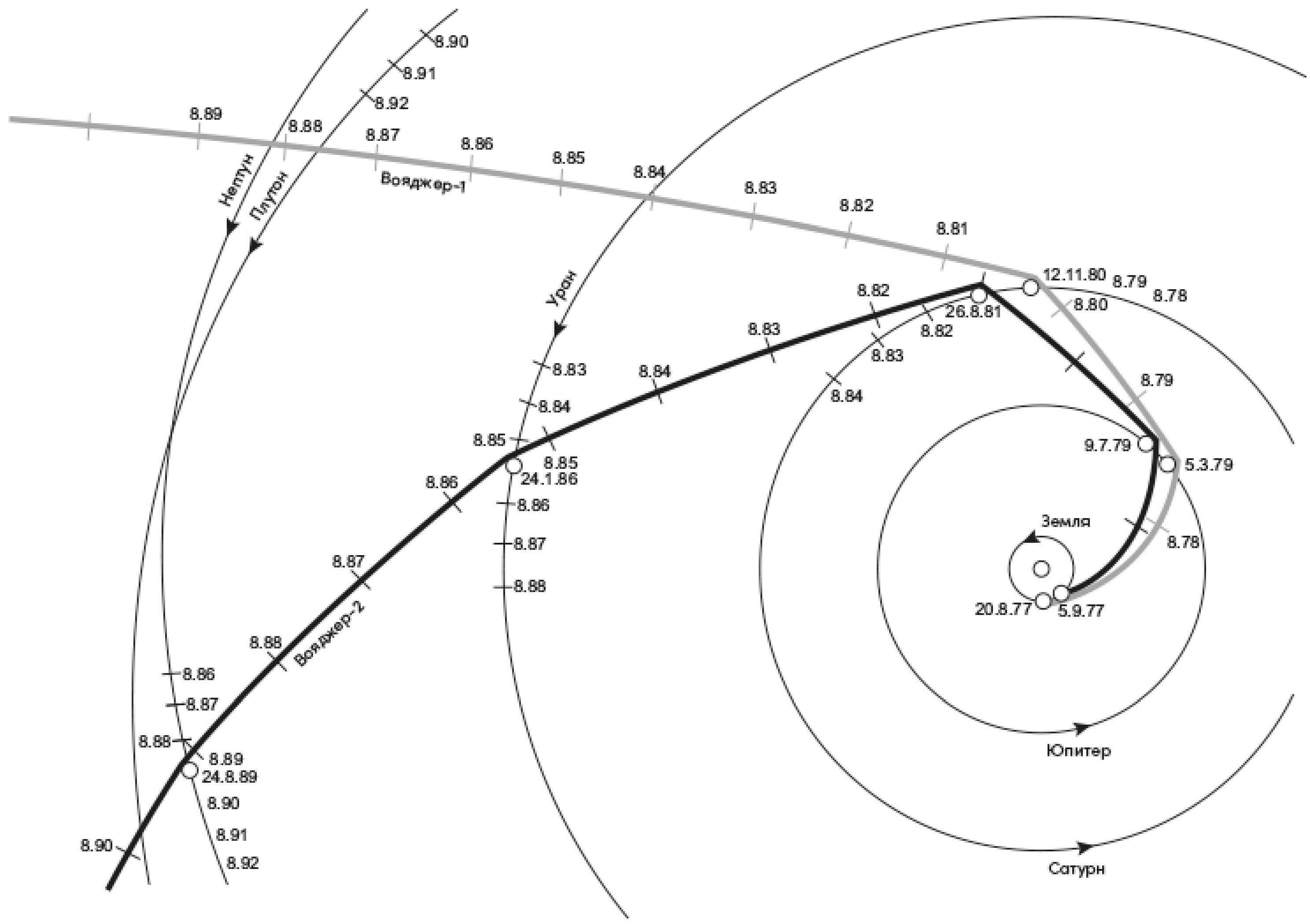



**Рис. 2.10.** Большие планеты изменяют траектории «Вояджеров», ускоряя их при этом. Засечками показаны точки траектории, в которых «Вояджеры» и планеты находились в определенные даты каждый год

Главное действующее лицо в истории про гравитационную пращу — гипербола (см. главу «прогулка 1»). Представим себе, что космический аппарат — скажем, запущенный с Земли — подлетает к Юпитеру достаточно быстро, со скоростью, которая не позволит Юпитеру оставить этот аппарат в зоне своего притяжения. Если временно забыть про притяжение Солнца, а кроме того, смотреть на происходящее, сидя на Юпитере, то картина хорошо известна: космический корабль приходит издалека по ветви гиперболы, отклоняется и уходит прочь. Приходящая и уходящая ветви гиперболы симметричны, и даже скорость движения при прощании с Юпитером такая же по величине, как скорость при сближении с Юпитером на том же расстоянии от него. Но это если смотреть с Юпитера! А если смотреть с Солнца, то движется не только сам аппарат, но и Юпитер, и скорость их сближения — это результат несложного математического действия со скоростями каждого. В начале всего эпизода мы пересчитываем скорость аппарата относительно Солнца в скорость сближения с Юпитером. В конце эпизода мы выполняем обратное действие: скорость удаления от Юпитера пересчитываем в скорость аппарата относительно Солнца. Казалось бы, это два взаимно противоположных действия: сколько сначала добавили, столько потом и вычли? Нет! Суть дела в том, что корабль *повернул* вокруг планеты: его скорость изменила направление. Поэтому скорость Юпитера, учитываемая на входе, и она же, учитываемая на выходе, не сокращают друг друга. Направлениями можно распорядиться так, что относительно Солнца корабль *ускорится* в результате пролета мимо Юпитера. В этом и состоит идея гравитационной пращи. Чуда в том, что корабль ускорился, «просто» пройдя мимо планеты, нет: дополнительная энергия движения относительно Солнца получена из энергии движения Юпитера; а сам он такого комариного укуса вообще не заметит (в расчетах с любой точностью можно считать, что скорость Юпитера не изменяется). Совсем наглядно происходящее видно из рис. 2.11, где, впрочем, ради этой наглядности пришлось кое-чем пожертвовать. Там предполагается, что космический корабль поворачивает вокруг планеты на 180°, чего *не* случается при движении по гиперболе: ее ветви расходятся все-таки под некоторым углом и никогда не бывают параллельными. Об изображенном на рисунке можно думать как о случае, к которому можно приблизиться, выбирая все более экстремальные гиперболы. Зато там все совсем просто со скоростями. Скорость корабля относительно Солнца $v$, а скорость планеты ему навстречу $U$, а тогда скорость сближения (скорость относительно Юпитера) равна $v + U$; после поворота на 180° она осталась численно равной $v + U$, но направлена в противоположную сторону — и это по-прежнему скорость относительно Юпитера. Однако теперь, после разворота корабля, Юпитер «несет» его по своей орбите, где сам имеет скорость $U$. Относительно Солнца скорость корабля получается равной $v + U + U = v + 2U$. Как видим, корабль приобрел две скорости Юпитера — как будто

Юпитер был упругой стенкой, от которой корабль отразился, как теннисный мяч от приближающегося поезда. На реальных траекториях выигрыш меньше, да и к направлению вылетания из «пращи» надо относиться внимательно, если не все равно, куда потом лететь, но идея работает.

### *Гравитационная праща — обмен энергией движения с планетой*

Аппарат «Кассини» [38], имевший целью работу на орбите Сатурна, был слишком тяжел, чтобы любая из имевшихся ракет-носителей могла отправить его сразу к цели. Стартовав в октябре 1997 г., «Кассини» сначала направился к Венере. Там в апреле 1998-го он получил прибавку в целых 7 км/с к скорости. В декабре того же года привезенное с собой топливо частично пошло на полуторачасовое включение двигателя для *торможения* на 450 м/с, что позволило аппарату в июне 1999-го второй раз пройти вблизи Венеры, которая направила его к Земле! Уже в августе 1999 г. родная планета встретила своего ускорившегося сына, подарив ему еще 5,5 км/с. С ними «Кассини» и отправился во внешнюю часть Солнечной системы, где сначала прошел мимо Юпитера, который еще немного «подтолкнул» его к цели, а 1 июля 2004 г. наконец вышел на орбиту Сатурна. (Дальнейшие приключения в ходе этой сверхуспешной миссии включали в себя посадку аппарата «Гюйгенс» на Титане, рискованные прохождения между кольцами и эпическое погружение вглубь планеты-гиганта 15 сентября 2017 г.)

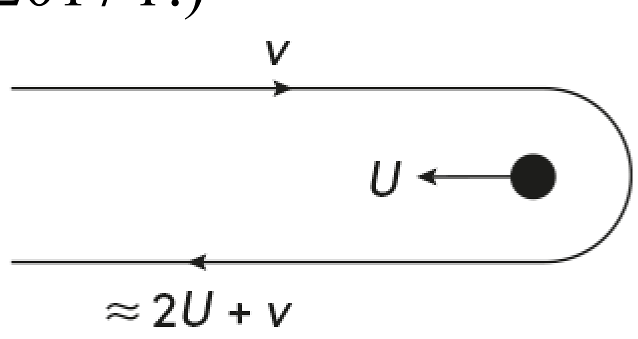



**Рис. 2.11.** Предельный (нереальный, но наглядный) случай гравитационной пращи. Нереальность состоит в предположении, что космический корабль разворачивается вокруг планеты на 180°, тогда как гиперболические траектории позволяют развернуться только на угол, меньший 180°. В изображенном предельном случае космический корабль приобретает две

скорости планеты, как если бы он упруго отразился от движущейся стенки

Распоряжаясь направлениями при исполнении гравитационной пращи, можно и уменьшить скорость аппарата относительно Солнца. Это тоже бывает нужно, например, чтобы запустить космический аппарат к Меркурию или «прямо на Солнце». Сделать это с Земли крайне непросто из-за скорости, с которой планета движется по орбите вокруг Солнца; эту скорость надо каким-то образом погасить, и один из способов — «праща наоборот» (в этом случае более сдержанно говорят о «гравитационном маневре») у Венеры. Правда, одного захода может не хватить, а это сильно удлиняет путешествие. Аппарат «Солар орбитер», запущенный к Солнцу Европейским космическим агентством 10 февраля 2020 г., будет двигаться к расчетной орбите вокруг Солнца около трех с половиной лет, совершая один за другим гравитационные маневры у Венеры и Земли (а затем Венера поработает еще и для того, чтобы наклонить плоскость его орбиты с целью лучшего обзора полюсов Солнца). И кроме того, гравитационный маневр около Земли выполняется в фильме «Марсианин».

*****

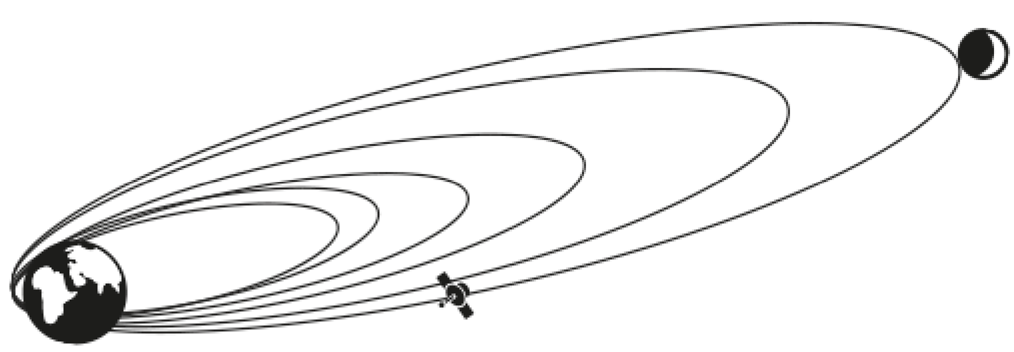


**Рис. 2.12.** Долгая дорога аппарата «Чандраян-1» к Луне: удлиняющиеся эллипсы

**Где прибавить ходу.** В последнее время к Луне часто летают «более долгой дорогой», экономя при этом самый дорогой ресурс — топливо (или, что то же самое, достигая большей скорости при заданном расходе топлива). Сочетание законов движения и гравитации предоставляет такую возможность при условии, что вы добираетесь до Луны *постепенно*, по траектории, представляющей собой букет из нескольких все более вытянутых эллипсов. Вместо одного TLI — включения двигателя на достаточное время, чтобы забросить корабль на траекторию полета к Луне, — корабль сначала, после недолгого включения двигателя, переходит на эллипс, вытянутый еще не сильно, и делает по нему полный оборот. В точке наибольшего приближения к Земле двигатель ненадолго включается снова, и корабль переходит на более вытянутый эллипс, снова делает полный оборот и снова включает двигатель вблизи Земли и так далее. Так, например, летала китайская миссия в 2007 г., индийская в 2008-м и израильская в 2019-м — все беспилотные. Экономия топлива по сравнению с «классическим» TLI требует времени на вычерчивание всех промежуточных эллипсов, что делает такой маршрут непригодным для пилотируемых полетов, поскольку экипажу в течение всего этого времени требуются кислород, вода, пища и тепло, а главное — многовитковая траектория многократно пересекает радиационные пояса Земли. В конце октября — начале ноября 2008 г. индийский аппарат «Чандраян-1» примерно за две недели перешел с орбиты с максимальным удалением от Земли 22 860 км на орбиту с максимальным удалением 380 000 км, включая для этого двигатель несколько раз, когда возвращался в точку наибольшего сближения с Землей (рис. 2.12). По итогам первого включения на 18 минут аппарат перешел на эллипс с максимальным удалением, которое оказалось на 15 040 км больше, чем у его орбиты до включения двигателя; при следующем сближении с Землей двигатель включили на 16 минут, что добавило к максимальному удалению на новом витке заметно больше — 36 815 км; но затем 9,5 минуты работы двигателя принесли целых 89 885 км, после чего всего 3 минуты подняли орбиту еще на 102 400 км, и, наконец, 2,5 минуты включения — еще на 113 000 км. Если «эффективность одной минуты включения» грубо измерять в терминах прибавки к максимальному удалению от Земли на витке «нового» эллипса, то эта эффективность растет с каждой следующей попыткой: от 15 040/18 = 836 до 113 000/2,5 = 45 200 км удаления на минуту работы двигателя. Цифры эти надо воспринимать лишь ориентировочно, потому что притяжение Земли слабеет с расстоянием и подняться с 207 000 до 307 000 км проще, чем с 7000 до 107 000; кроме того, при каждом следующем запуске двигателя ракета оказывается легче, а потому сильнее разгоняется при той же тяге. Но, как бы то ни было, тенденция ясна. Называется это явление эффектом Оберта, а сам маневр, состоящий в том, чтобы нырнуть к планете и включить двигатель в момент наибольшего сближения, — маневром Оберта. Выглядит все это с первого взгляда чуть подозрительно, потому что один и тот же двигатель, работающий одно и то же время, дает, конечно, одну и ту же *прибавку* к скорости — неважно, с какой скоростью двигался космический корабль перед включением двигателя, и вне зависимости от наличия или отсутствия планеты поблизости. Чтобы понять, откуда все же берется выигрыш, который хорошо виден на примере маневров «Чандраяна-1», надо сначала ясно выразить, *в чем* этот выигрыш.

Это выигрыш в энергии. Когда какой-нибудь снаряд запущен прочь от Земли, им ежесекундно управляет, да, сэр Исаак Ньютон посредством законов движения. Но сэр Исаак не возражает и против замечательно экономного способа сравнивать два разных состояния движущегося тела. Этот экономный способ состоит в учете энергии — которая всегда сохраняется. Правда, если работает двигатель, то надо учитывать энергию, выделяемую при сгорании топлива, а также отдаваемую выброшенным газам. Но мы обойдемся без этого, потому что будем смотреть на ракету в два ключевых момента времени: сразу после *выключения* двигателя на участке сближения с Землей и в точке наибольшего удаления от Земли. Вблизи Земли больше скорость, а потому больше энергия движения; а вдали от Земли скорость меньше, энергия движения меньше, зато больше энергия в поле притяжения. Сумма двух видов энергии одна и та же, но их вклады различны: вклад энергии движения велик сразу после разгона и делается заметно меньше (в характерных примерах — в значительное число раз меньше) в точке максимального удаления. Всю убыль энергии движения компенсирует увеличение энергии в поле притяжения. Итог: максимальное удаление чувствительно к тому, какую *энергию* имела ракета сразу после разгона. И вот здесь происходит то, чего *совсем* не наблюдается для привычных нам транспортных средств. Да, включение стандартного двигателя на некоторое стандартное время дает одну и ту же прибавку к скорости $\Delta v$ («дельта вэ»). Но *прибавка* к энергии движения зависит и от этой $\Delta v$, *и от скорости перед включением*! Разгон на одну и ту же $\Delta v$ сообщает космическому кораблю тем больше энергии, чем с большей скорости этот разгон *начинается*. А как мы только что видели, бóльшая прибавка к энергии движения на малом расстоянии от Земли позволит «забраться повыше» — оказаться дальше от Земли в самой удаленной части эллипса. Поэтому получение одной и той же прибавки к скорости закидывает прочь от Земли тем эффективнее, чем больше была скорость в момент включения двигателя.

*Ускоряться на орбите выгодно там, где и так быстро*

Маневр Оберта — это, в двух словах, нырок к планете для того, чтобы энергия движения ракеты была максимальной прямо перед выделением химической энергии от сгорания топлива и последующим перераспределением энергии между ракетой, несущей меньше топлива, и сгоревшим топливом, выброшенным назад. Мне почему-то не приходит на ум ни один фантастический фильм, где герои, которых ничто уже, казалось бы, не может спасти, внезапно вспоминают про эффект Оберта и благодаря рискованному (!) сближению с планетой в конце концов достигают такой далекой орбиты, где главный негодяй пребывает в полной беспечности. Возможно, проблема в том, насколько трудно вложить в уста «чудака-умника» такое объяснение этого эффекта, чтобы в режиме реального времени суть дела уловили не только другие хорошие парни, но и зрители (или я невнимательно смотрел «Звездный путь», он же Star Trek) [39].

*****

**Рандеву.** Едва ли у Кеплера было даже подобие причины задумываться о том, *как перебраться* с одного эллипса на другой. Открытые им орбиты планет должны были выглядеть уникальными (к чему мы еще вернемся) и никак не располагающими к самой постановке вопроса о «переходе с эллипса на эллипс». Но задача сближения космических кораблей не просто «располагает», а требует понимания таких маневров — и здесь обнаруживается кое-что неожиданное. Если, для начала, вы летите на своем корабле позади моего по той же самой — да еще и круговой — орбите, то что вы будете делать, желая догнать меня? Включите двигатель, чтобы ускориться? Если бы мы летели не по орбите, а по прямой на удалении от притягивающих масс, то двигатель добавил бы энергии движения вашему кораблю, а это значит, что возросла бы скорость и ваш маневр по сближению оказался бы успешным. Но законы движения в поле притяжения таковы, что поддерживают определенный баланс между энергией движения и энергией в поле притяжения. После включения двигателя энергия, получаемая от сгорания топлива, перераспределяется между этими двумя видами энергии. Перераспределение произойдет таким образом, что ваш корабль окажется на более высокой орбите. Но высокая орбита — это более *медленная* орбита, и, оказавшись там, вы будете все сильнее отставать от моего корабля, несмотря на то что пытались меня догнать. В результате закачки энергии, казалось бы, *в движение* вашего корабля энергия движения стала даже *меньше*; вся прибавка к энергии досталась энергии в поле притяжения [40]. Правильный способ действий состоит в том, чтобы включить двигатель *против* движения — уменьшить полную энергию, что приведет к переходу на более низкую орбиту, движение по которой «со времен Кеплера» (один из его законов!) происходит с большей скоростью. Несмотря на уменьшение полной энергии, баланс изменился так, что за счет уменьшения энергии в поле притяжения энергия движения возросла, а потому возросла и скорость — вы станете меня догонять, двигаясь по более низкой орбите. Там вам предстоит провести некоторое время, чтобы обогнать меня по угловой координате, после чего вы сможете начать маневр по переходу обратно на мою орбиту. Парадоксальное проявление эффекта «торможение вызывает увеличение скорости» — контакт космического аппарата на низкой круговой орбите с верхними слоями атмосферы. Трение об атмосферу забирает энергию у аппарата, из-за чего его скорость увеличивается, а сам он переходит на более низкую орбиту, где атмосфера плотнее, трение более сильное, космический аппарат ныряет еще глубже — и быстро распадается и сгорает в атмосфере.

Сближение на орбите (и последующая стыковка) — неотъемлемый элемент современной космонавтики. Теоретически Ньютон рулит здесь последние 300 лет и будет рулить и дальше: из закона движения он без труда вывел бы точное поведение космических кораблей при маневрах, которые начали выполнять в середине 1960-х. Но практически научиться этому в условиях постоянного дефицита топлива оказалось не так просто. В августе 1962 г. корабли «Восток-3» и «Восток-4» приблизились друг к другу на шесть с половиной километров, но не за счет орбитальных маневров, а благодаря сверхточному выведению на близкие орбиты; основные же сложности по тесному сближению оставались впереди. Два корабля по-настоящему *сблизились* (до 30 см) только в декабре 1965 г.; это были «Джемини-7» и «Джемини-6А», а предыдущая попытка в июне того же года, по сближению «Джемини-4» и отработавшей ступени ракеты-носителя, не удалась по ряду причин, включая как раз особенности орбитальной механики. Вслед за этим стало возможным завершать сближение стыковкой — сначала с непилотируемыми аппаратами, а в январе 1969 г. сблизились и состыковались два пилотируемых корабля, «Союз-4» и «Союз-5». Сближения и стыковки стали ключевой частью схемы высадки на Луну и возвращения на Землю: они происходили во всех полетах кораблей «Аполлон» *после* восьмого (кроме тринадцатого) — начиная с марта 1969 г., когда эта техника была сначала отработана на околоземной орбите. Базз Олдрин — второй человек, ступивший на Луну, — защитил диссертацию по теме стыковки. (И, как отмечали некоторые его коллеги-астронавты, едва мог поддерживать беседу на какую-либо другую тему; его прозвали «мистер Рандеву», по английскому слову для сближения в космосе.)

Один из огорчительных факторов на орбите — практически полная невозможность *поворачивать*. Ракета, летящая по низкой околоземной орбите со скоростью около 8 км/с (28 800 км/ч), разогналась до этой скорости почти наверняка благодаря работе двух ступеней ракеты-носителя, изначально полностью залитых топливом и все это топливо потративших для достижения этой цели. Увы, поворот, например, на 60° требует практически *такого же* количества топлива — которое взять решительно неоткуда (и которое вообще не доставить на орбиту теми двумя ступенями). Поэтому для сближения и стыковки орбиты двух кораблей должны лежать как можно более точно в одной плоскости. Это обстоятельство определяло серьезные требования к схеме возвращения с Луны. После взлета лунного модуля с лунной поверхности требовалась его стыковка с командным модулем, который обращался вокруг Луны, и было критически важно, чтобы их орбиты лежали в одной плоскости. Если бы орбита лунного модуля оказалась выше или ниже расчетной, средства справиться с этим имелись, но не в случае существенного рассогласования плоскостей. Впрочем, найти друг друга даже в пределах одной плоскости на орбите длиной более 11 000 км — тоже довольно содержательная задача. Стандартный экономный способ перехода между орбитами, лежащими в одной плоскости, но разделенными некоторым радиальным расстоянием, — гомановские (Hohmann) траектории, эллипсы, касательные к двум орбитам (рис. 2.13). Маневр требует двух включений двигателя для изменения скорости: для приобретения $\Delta v$ в начале и еще раз в конце маневра. Эта схема придумана на удивление давно — хоть и не во времена Ньютона, когда вопрос о *включениях двигателя* звучал бы не совсем понятно, но определенно в докосмическую эру (см. [80]). Армстронг и Олдрин, стартовавшие с Луны в лунном модуле, сначала выходили на круговую орбиту. После корректировки легких неточностей в совмещении плоскости двух орбит (примерно по завершении одного оборота вокруг Луны) включение двигателя переводило лунный модуль на слабо эллиптическую орбиту, приближавшую его к орбите командного модуля. После еще двух коррекций лунный модуль оказывался ниже и впереди командного модуля, и ему оставалось только *ускориться*, чтобы перейти на более высокую орбиту и позволить командному модулю догнать себя. Пилот командного модуля Коллинз, по его собственным словам, пребывал в постоянной готовности, все время прокручивая в голове, какое «зеркальное» действие (притормозить и догнать лунный модуль на более низкой орбите) потребуется сейчас от него, если по каким-то причинам лунный модуль перестанет маневрировать. Начиная с «Аполлона-14» возросшая уверенность в надежной работе систем лунного модуля позволила заметно «спрямить» процедуру сближения [41]. С тех пор сближение и стыковка (правда, на *околоземной* орбите) стали в целом достаточно рутинным, хотя и ответственным маневром при каждом полете к любой космической станции (сейчас — МКС).

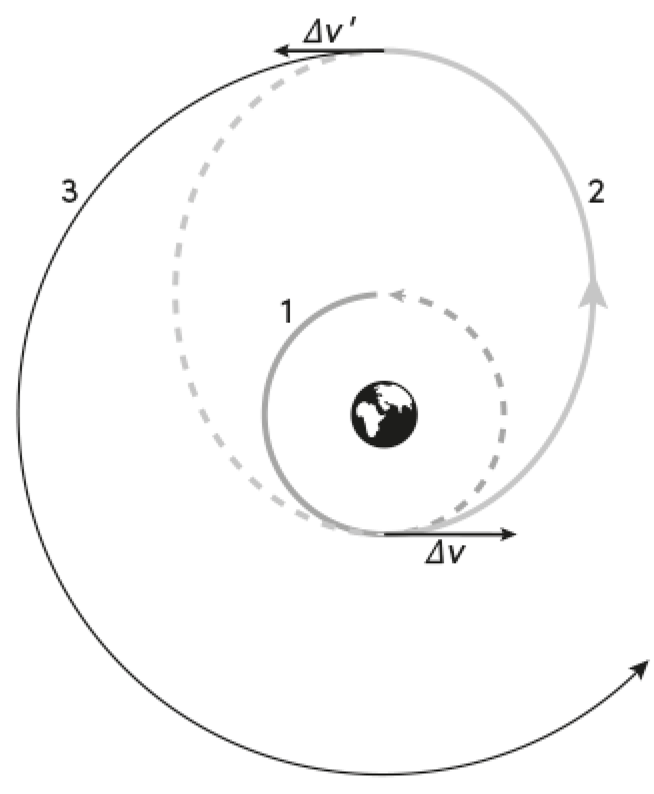



**Рис. 2.13.** Гомановская траектория — половина эллипса, соединяющего две круговые орбиты разного радиуса. Переход с одной орбиты на другую требует двух включений двигателя

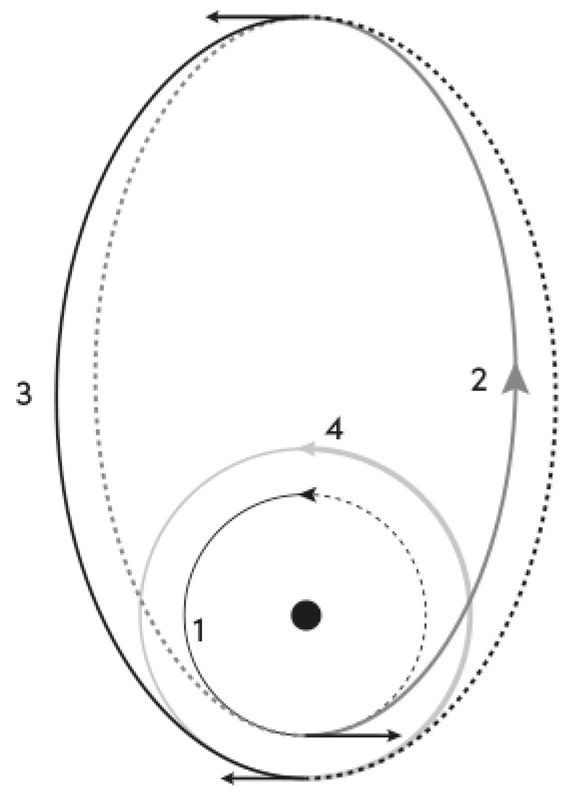



**Рис. 2.14.** Штернфельдова (биэллиптическая) траектория перехода между двумя орбитами требует трех включений двигателя, последнее из которых — для торможения. Если радиусы двух круговых орбит различаются в несколько раз (не как показано на рисунке), то такая траектория может быть экономнее гомановской в зависимости от того, насколько большим выбрано максимальное удаление в ходе маневра

Такие же гомановские переходные траектории «соединяют» орбиты Земли и Марса. Именно такой дорогой до Марса добрался и марсоход «Персевиранс», совершивший посадку 18 февраля 2021 г. На девять и восемь дней раньше до Марса долетели аппараты «Аль-Амаль» и «Тяньвэнь-1», но они, включив двигатели, поместили себя на орбиту Марса (подобно тому, как «Аполлоны» выполняли LOI для выхода на орбиту Луны). В отличие от них, «Персевиранс» с ходу вошел в разреженную марсианскую атмосферу и перешел к посадке; от этого маневра требовалась высокая точность, для чего предварительно были сделаны необходимые коррекции траектории с целью оптимального «контакта» с Марсом. Чего, пожалуй, не следует делать в межорбитальных маневрах — это доверять земной интуиции. Например, при большом радиальном расстоянии между двумя орбитами сэкономить топливо позволит другой маршрут, несмотря на требуемые для него три включения двигателя, — маршрут по половинкам двух эллипсов, выходящих довольно далеко за более высокую орбиту (рис. 2.14); такой маневр позволяет обойтись меньшим полным значением $\Delta v$, но занимает большее время; и он тоже был придуман задолго до того, как мог стать реальностью (см. [101]). Переход через удаленную точку дает также несколько более экономный способ изменить плоскость орбиты.

*****

**Танец с небесами.** «Аполлон-8» все-таки *не совсем* разорвал хватку земного тяготения: не было необходимости разгонять его до такой скорости, чтобы он в принципе смог стать спутником Солнца [42]. Коллинз допустил художественную вольность, чтобы передать свои чувства. В том, что это именно так, едва ли стоит сомневаться в отношении человека, в обязанности которого входили ключевые маневры, включая умение довести «Аполлон-11» от Луны до входа в земную атмосферу под нужным углом в том случае, если по каким-то причинам будет потеряна связь с центром управления. В одном интервью, данном в уже очень почтенном возрасте, Коллинз сетовал, что в NASA наловчились превращать все высказывания в рутинные, и именно так в его устах звучала фраза «Есть готовность к переходу на траекторию к Луне», обращенная к экипажу «Аполлона-8». А потом глаза его загорелись, и он сказал:

Мне бы так хотелось снова пережить этот момент, потому что тогда я бы крикнул им: «"Аполлон-8", покинь мрачный плен Земли и танцуй с небесами. "Аполлон-8", вперед, танцуй с небесами!»

По-видимому, каждый американский военный летчик тех лет знал стихотворение 19-летнего пилота Джона Гиллеспи Мэги-мл., служившего в Военно-воздушных силах Канады и погибшего в декабре 1941 г. Это стихотворение *летчика*, но начинается оно так:

Покинув мрачный плен Земли,
Я с небом танцевал на крыльях радости,
Взбираясь к Солнцу…
(Oh! I have slipped the surly bonds of Earth
And danced the skies on laughter-silvered wings;
Sunward I've climbed…)

## Добавления к прогулке 2

**Легко ли прицелиться в Луну.** Аналогия с боулингом, вскользь упомянутая ранее в главе, не очень корректна (как и большинство аналогий), в первую очередь из-за того, что на движение шара в боулинге влияют силы сопротивления / трения, а на космический корабль, летящий от Земли к Луне, — постепенно слабеющее притяжение Земли и (ближе к финальной части пути) возрастающее притяжение Луны, которая к тому же движется. Из-за всего этого скорость корабля непостоянна — она заметно уменьшается до момента попадания в окрестности Луны, после чего несколько увеличивается. Тем не менее я хочу продолжить эту аналогию с целью передать *масштаб* (который, как я уже говорил, совсем не выдержан на рис. 2.1). Я собираюсь уменьшить все расстояния в 10 000 раз — разумеется, выполняя вычисления довольно приближенно, — и посмотреть на то, что получится, как если бы это был боулинг.

Итак, у вас в руке *маленький* шар для боулинга (если — что не так важно — размер космического корабля тоже делить на 10 000, то диаметр шара будет порядка миллиметра, но вполне можно представлять себе что-то более приближенное к реалиям боулинга). Вы отпускаете шар от себя со скоростью 1 м/ с. Мишень, в которую шар(ик) должен попасть, движется, причем *в* десять раз медленнее — со скоростью всего 10 см / с. Мишень вроде бы большая — это шар (или диск, как вы его видите) радиусом 170 м, но попасть именно в него ни в коем случае нельзя, потому что это означало бы жестко разбиться (задача для «Луны-1», решенная затем «Луной-2»). Требуется послать ваш маленький шар так, чтобы он оказался на расстоянии 10 метров от края мишени, с точностью, скажем, до одного метра. Все бы ничего, но расстояние до мишени — 38 *кило*метров.

Реальная Луна еще и притягивает к себе. Определенно необходим сэр Исаак Ньютон за рулем.

**Еще о космическом музее будущего.** В продолжение темы о телескопе «Кеплер»: кандидат в музей искусственных гелиоцентрических объектов — *первый* искусственный спутник Солнца. Это станция «Луна-1», летающая вокруг звезды с 1959 г. Поместить ее в музей будет намного труднее, чем телескоп «Кеплер», из-за большой неопределенности с ее орбитой. Всего же вокруг Солнца обращается несколько десятков рукотворных (made on Earth by humans, «сделанных на Земле людьми», как сформулировали в SpaceX) изделий, часть из которых оказалась там относительно случайно, например из-за потери связи на пути к Венере или Марсу, часть — по «техническим» причинам, как, например, третьи ступени ракет «Сатурн V», использованных при запуске некоторых из кораблей «Аполлон», и *даже* один лунный модуль — другой очевидный кандидат на то, чтобы когда-нибудь быть выловленным. Там же — исследователи комет и астероидов, инфракрасный телескоп «Спитцер» и родстер Tesla (рис. 2.15).


**Рис. 2.15.** Фрагмент электронной платы родстера Tesla, запущенного на гелио-центрическую орбиту

**Экстремальный маневр Оберта.** Выигрыш в энергии, который достигается при маневре Оберта, зависит от того, насколько глубоко удается нырнуть в «гравитационный колодец»: степень сближения с планетой определяет, до какой скорости разгонится космический корабль к моменту включения двигателя, а потому и влияет на энергию движения, которую он приобретет в результате этого включения. Схема, которую рассматривал сам Оберт, состояла в том, чтобы, начав с высокой круговой орбиты, включить двигатель против скорости, спуститься как можно ближе к планете, а на участке максимального приближения включить двигатель «по ходу» и в результате уйти от планеты с впечатляющей скоростью. Предельно возможное сближение — радиус планеты (хотя если речь идет о полноценной планете с атмосферой, то эта последняя является ограничителем, потому что взаимодействие даже с ее верхними слоями может произвести эффект, далекий от желаемого). Вот если бы планета той же массы была меньше в размерах! Делая радиус планеты все меньше и меньше, но *сохраняя ее массу неизменной,* мы черпали бы из гравитационного колодца все бóльшую и бóльшую прибавку к энергии движения. Но что значит уменьшить радиус, а массу оставить прежней? Это значит сделать тело (планету, звезду, …) более плотным. Известны несколько стадий уплотнения материи далеко за пределы представимого: белый карлик и нейтронная звезда. Ни то ни другое решительно невозможно создать по нашему желанию, однако в космосе эти сверхплотные объекты существуют и дают о себе знать. В случае еще более сильного уплотнения материя в известных нам формах исчезает, оставляя вместо себя область пустого пространства с чрезвычайно сильной гравитацией. Такая область пространства называется черной дырой (они ждут нас на нескольких последующих прогулках).

Что, если бы вместо Луны по той же самой орбите вокруг Земли летала черная дыра той же массы, что и Луна? Это было бы прискорбно для влюбленных и, возможно, для некоторых организмов с ночным образом жизни, однако с точки зрения тяготения на Земле ничего не изменилось бы: например, происходили бы практически точно такие же приливы и отливы (о них мы подробнее говорим ниже, на прогулке 4). Движение Земли вокруг общего центра масс Земля — Черная Луна тоже не изменилось бы. Но Черная Луна имела бы радиус около 0,1 мм против 1 737 400 000 мм для Фактической Луны. Формулы ньютоновой механики для выигрыша энергии (согласно которым отношение 1 737 400 000 : 0,1 превращается в увеличение энергии более чем в сто тысяч раз) применять вблизи черной дыры уже нельзя, да и подлетать к самому горизонту черной дыры — не очень хорошая идея, как мы увидим на прогулке 7, но, как бы то ни было, наличие черной дыры вместо Луны, вероятно, позволило бы нам отправлять Настоящие Космические Ракеты за пределы Солнечной системы с по-настоящему высокими скоростями. Вернуться, правда, они бы не могли, если только где-то близко к месту назначения для них не был бы обеспечен запас черных дыр, подходящих для гравитационных маневров.

**Штернфельдовы биэллиптические траектории.** Переходные траектории, изображенные на рис. 2.14, рассчитал пионер космонавтики (и изобретатель самого слова «космонавтика», как и слова «космодром») Штернфельд в своей работе «О траекториях полета к центральному светилу со стартом с определенной кеплеровской орбиты» [101] (в авторском переводе ее заглавия с французского). В заметке [41] Штернфельд приводит, в частности, такие подробности об этой работе:

> Доклад «О траекториях полета…» нашел широкий отклик в английской, французской и немецкой научной прессе. Хорошего мнения о нем был Герман Оберт. Вальтер Гоман направил мне письмо (от 22 марта 1934 г.), в котором он оценил мой доклад как «интересную работу о наиболее выгодных кеплеровских траекториях для достижения областей, близких к центральному небесному телу». Эту работу, а также мой предыдущий доклад, представленный Французской академии наук, я послал К. Э. Циолковскому, с которым меня уже несколько лет связывала дружеская переписка.

Удивительные «предкосмические» времена! В конце 1930-х гг. Королев приглашал Кондратюка к совместной работе, но тот отказывался (возможно, опасаясь ареста за использование поддельных документов).

## Признания и литературные комментарии

«Энергия в поле притяжения» — это потенциальная энергия (да, в поле притяжения). Она имеется всегда, когда два тела притягивают друг друга. В поле притяжения Земли она зависит от массы тела и расстояния до центра Земли (и от того, насколько массивна сама Земля, но тут уж что есть, то есть).

Путешествия к Луне — предмет статей, собранных в книге [29] с изображением ракеты «Сатурн V» на обложке, и отчасти — тема более «визуальной», в смысле иллюстраций и оформления, книги [38]. В обеих книгах много подробностей, которые я оставил в стороне. Астронавт, по совместительству обладающий литературным даром, написал прекрасную книгу [59], впервые вышедшую в 1974 г. и переиздававшуюся к 40-летнему и 50-летнему юбилею полета «Аполлона-11». Оттуда я взял все цитаты Коллинза, кроме той, что приведена в самом конце главы — она прозвучала в одном из данных им интервью, и этот фрагмент присутствует на нескольких ресурсах, например https://www.pbs.org/video/how-nasas-apollo-8-left-earths-orbit-asi5z6/. Хронология полета «Аполлона-8» представлена на сайте NASA: https://history.nasa.gov/SP-4029/Apollo_08i_Timeline.htm. Выходя после радиомолчания из-за Луны на «Аполлоне-8», успешно помещенном на траекторию возвращения, Ловелл успокоил центр управления фразой «Имейте в виду, Санта-Клаус существует» (дело было 25 декабря). С начальными элементами космонавтики (включая гравитационную пращу) в современном изложении можно познакомиться по популярным лекциям [30], где, впрочем, космонавтика только одна из многих затронутых тем. Дополнительные возможности, предоставляемые анимацией, да и не только они, использованы в лекциях https://scfh.ru/lecture/kosmonavtika/. Оттуда же взяты рис. 2.10 и рис. 2.12. Более подробно традиционные вопросы космонавтики освещены в книге [17]; «классическое», но существенно более продвинутое изложение имеется в книге [2]. Использование звезд, белых карликов и нейтронных звезд для ускорения космических аппаратов («межзвездных зондов») обсуждается в [26]. Жизнь астероидов затрагивается среди прочего в книге [28]. Орбита космического телескопа JWST описана по ссылке https://jwst-docs.stsci.edu/jwst-observatory-characteristics/jwst-orbit. Жизнеописания Кондратюка и Штернфельда заслуживают того, чтобы познакомиться с ними по доступным в интернете источникам.

## Движение на прогулках 1 и 2

Из наблюдений за движением планет и смелой идеи, что причина движения и Луны, и падающего яблока одна и та же, выросло понимание тяготения — силы, которая организует всю «большую» Вселенную. Возникшее до появления первой паровой машины, это понимание уже в век первых компьютеров позволило совершать действия, которые незадолго до того были предметом фантастики: например, отправить тело в такое движение, чтобы оно без дальнейшего вмешательства облетело Луну и повернуло к Земле; высадиться на Луне и вернуться на Землю; использовать планеты для разгона космических аппаратов. Как ни для чего другого, для движения космических аппаратов актуальны теоретические представления, накопленные за десятилетия и даже столетия до того, как они понадобились в практическом плане. Предсказанные за 150 лет до первого искусственного спутника Земли специальные траектории в системе двух тел, движущихся одно вокруг другого, сейчас используются как космические парковки для телескопов и других аппаратов со специальными задачами наблюдения. Маневры с целью тем или иным образом изменить характер орбитального движения — упражнение по преодолению «само собой разумеющихся», очевидных представлений; основные идеи на их счет были сформулированы еще в первой половине XX в., а во второй его половине космонавтов и астронавтов пришлось специально обучать схеме «контринтуитивных» действий. Примерно такой же отрезок времени разделяет идею и реализацию в случае гравитационной пращи и эффекта Оберта. Одна из составляющих космонавтики — теоретическое знание, развивавшееся в ответ на старые вопросы о причинах и характере движения планет в Солнечной системе.

## Прогулка 3

# Невидимое — из движения видимого

**Маршрут:** *Тысячи планет из движения. — Планета как объяснение. — Гармония целых чисел. — Тайна девятой планеты. — Тайна первой планеты. — Несогласное вращение.*

**Главный герой:** *невидимые причины*

---

**Тысячи планет из движения.** Вода довольно капризна: она не желает оставаться жидкостью ни в вашем морозильнике, ни в кипящем чайнике — интервал температур между которыми совершенно чепуховый по космическим меркам. Как бы мало мы ни знали о механизмах, благодаря которым зародилась жизнь даже в единственном известном нам варианте, особенно трудно представить себе, как она могла бы возникнуть где-то еще, кроме планеты, похожей на Землю в первую очередь наличием воды. Тут требуется не просто изрядное число молекул $H_2O$, а именно жидкая фаза. Однако весь наш опыт с планетами до относительно недавнего времени ограничивался Солнечной системой, и не было никакой возможности оценить их распространенность за ее пределами. Задача увидеть планету у другой звезды — маленький и тусклый объект рядом с большим и ярким — представляется довольно безнадежной. А как можно говорить о *подходящих* для жизни планетах, когда неясно, насколько часто вообще встречаются хоть какие-нибудь планеты?

Способом увидеть невидимое оказалось движение. Взаимность движения притягивающихся тел может быть ключом к тому, чтобы догадываться о существовании доселе неизвестных частей мира. Ситуации, когда «что-то движется не так», — ситуации несоответствия между теоретической картиной мира и наблюдаемыми фактами — могут означать наличие скрытой от глаз причины, но могут, конечно, указывать и на недостаток наших знаний о законах, которым подчинено движение. В одном случае надо искать какую-то невидимую часть мира, а в другом — приводить теоретическое знание в соответствие с миром. Эта дилемма никогда не дает расслабиться.

Если у звезды имеется планета или планеты, то может оказаться, что из-за движения вокруг общего центра масс звезда то приближается к нам, то удаляется от нас, т.е. перемещается вдоль луча зрения (никакого движения вдоль луча зрения мы не обнаружим в том случае, когда смотрим на звезду с планетами перпендикулярно плоскости их орбит; что ж, не повезло с этой звездой, попробуем с другими). Дело в том, что когда звезда движется по направлению к нам, ее свет прибывает несколько более синим — смещенным в синюю часть спектра — по сравнению с тем, какой был испущен, а когда источник удаляется, приходящий от него свет, наоборот, краснеет. Это дает способ обнаружения планет, которые движутся, может, и быстро, но сами практически не видны, через движение звезд, которые «едва ерзают», но зато видны хорошо.

*Планеты выдают себя через движение своих звезд*

Поскольку звезды во много раз массивнее планет, их движения действительно сравнительно малы; но метод определения скорости по спектру позволил добиться впечатляющей точности. «Более синий» свет означает чуть меньшую длину волны по сравнению с той, что была испущена, а «более красный» — наоборот, несколько бóльшую. Уже в начале 1990-х по изменению длин волн можно было определять скорости до 7 *метров* в секунду — меньше, чем у бегуна на стометровке. Наблюдая звезду, мы интересуемся тем, как с течением времени изменяется длина волны приходящего от нее света, и таким образом узнаем, не ведет ли она себя так, как полагается звезде с планетой (или планетами). Чем планета массивнее (и чем ближе к звезде), тем сильнее она заставляет шевелиться свою звезду, поэтому легче всего удается обнаружить признаки существования массивных планет типа Юпитера [43]. Первая планета, которую открыли таким способом, и оказалась так называемым горячим юпитером — юпитером из-за своих размеров, а горячим из-за близости к своему светилу (в отличие от нашего Юпитера, который никак не назовешь горячим; существование — и, как со временем выяснилось, в избытке — горячих юпитеров стало неожиданностью для наивных землян, которые до того могли рассуждать о планетных системах только на основе своего единственного опыта знакомства с таковыми). Половину Нобелевской премии по физике 2019 г. получили ученые, внесшие определяющий вклад в развитие этого метода и еще в 1995-м открывшие с его помощью первую экзопланету у звезды типа Солнца. В известном смысле это была премия за умение использовать движение и извлекать из него информацию, чтобы узнать о ранее неизвестных частях мира. Планеты, видимые глазом на нашем небе, названы словом с греческим корнем, обозначающим блуждания, но и те, которые находятся в миллионы раз дальше, тоже выдают себя движением — хотя их самих не видно даже в телескоп. Движение буквально рассказывает нам об устройстве Вселенной в самой, пожалуй, «практической» части — в том, что касается мест, потенциально пригодных для обитания.

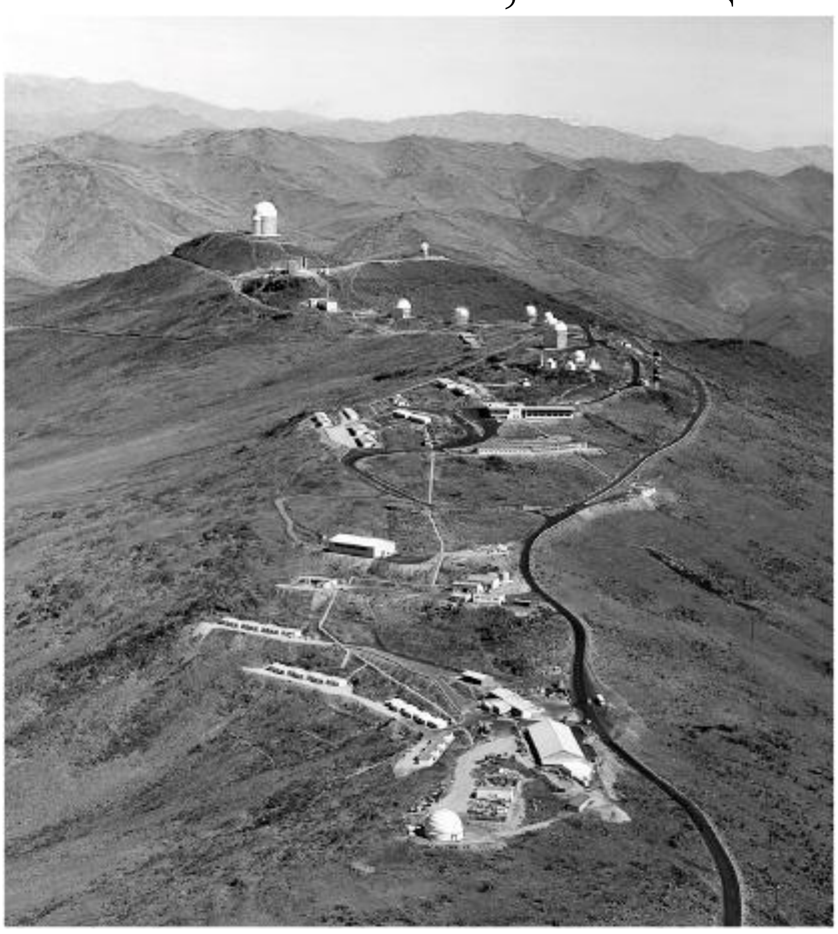


**Рис. 3.1.** В не самом гостеприимном месте нашей планеты расположена обсерватория, где открывают далекие от нас планеты. Обсерватория Ла-Силья (Чили) управляется Европейской организацией астрономических исследований в Южном полушарии, известной также как Европейская южная обсерватория

Техника определения скоростей звезд совершенствовалась и совершенствуется, и спектрограф (прибор, который точно фиксирует спектры, на основе чего вычисляется скорость) в обсерватории Ла-Силья в Чили (рис. 3.1), заработавший в 2003 г., определяет скорости уже с точностью до 30 сантиметров в секунду — грудной ребенок быстрее машет кулачками. И это не предел, причем совершенствуется как технология получения данных, так и методы их обработки, а именно алгоритмы, по которым из изменений скорости мы делаем выводы о числе планет и некоторых их характеристиках. Эта задача — восстановление характера движения по путаным данным наблюдений — достойный

XXI столетия вариант той задачи, которой занимался Иоганн Кеплер четыре века назад.

*****

**Планета как объяснение.** Даже в нашей собственной Солнечной системе не все имеющиеся планеты были известны всегда. Солнце, Меркурий, Венера, Луна, Марс, Юпитер и Сатурн — вот и все (не считая эпизодически появляющихся комет) странники по небосводу, известные нам до времени, когда всерьез развились систематические наблюдения неба в телескоп. Кеплер стремился понять не только каковы орбиты планет по форме, но и чем определяется *размер* каждой орбиты — расстояния от планет до Солнца. Он, более того, желал ответить на вопрос, *почему* их шесть (Меркурий☿,Венера♀,Земля♁,Марс♂, Юпитер♃и Сатурн♄). Число планет, обращающихся вокруг Солнца, казалось фундаментальной данностью, для которой так соблазнительно было найти объяснение. Отражения совершенства небес Кеплер искал в нетленном — в математике. Он надеялся, что *пять* последовательных соотношений между орбитами шести планет определяются тем, что существует в количестве пяти и только пяти, — правильными многогранниками. Кроме всем известного куба, это еще тетраэдр, октаэдр, додекаэдр и икосаэдр; других нет и никогда не будет (и про планеты тоже, казалось, следовало так считать!). Если один из этих многогранников описать вокруг сферы и одновременно вписать в другую сферу, то отношение радиусов большой и малой сфер окажется однозначно фиксированным (рис. 3.2). Можно ли разместить правильные многогранники в такой последовательности, чтобы они воспроизводили относительные размеры орбит, по которым движутся все шесть планет? После Кеплера едва ли многие занимались подобными геометрическими упражнениями, и даже число планет оказалось в действительности не равным шести. Седьмая планета, сейчас известная как Уран, робко появлялась в поле зрения наблюдателей несколько раз начиная, во всяком случае, с конца XVII в., но четко зафиксированное наблюдение движущегося по небу объекта принадлежит Гершелю (1781), который, правда, воспринял этот объект как комету и некоторое время продолжал считать его кометой, даже когда другие астрономы, извещенные об открытии, стали склоняться к тому, что это нечто «подобное планете» — да, собственно, и есть планета [44].

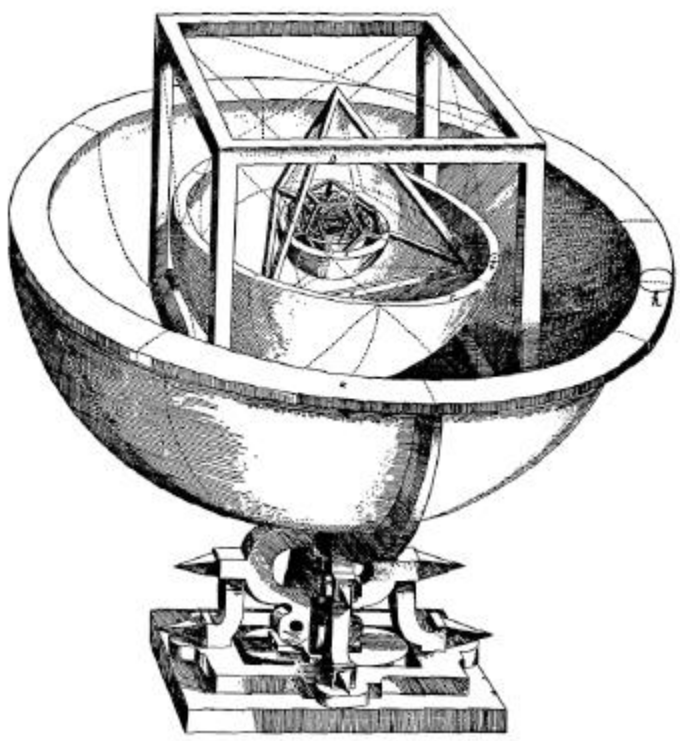


**Рис. 3.2.** Конструирование причин (по Кеплеру) того, что орбиты всех шести планет в Солнечной системе имеют именно такие относительные размеры

Через несколько десятков лет после своего открытия Уран (интересный и сам по себе, что мы здесь полностью игнорируем) стал трамплином — можно сказать, батутом — для дальнейшего познания Солнечной системы. Однако способ, каким это случилось, был, видимо, не совсем привычен современникам (зато к нашему времени обрел практически бесконечную популярность, не в последнюю очередь из-за своей относительной дешевизны). У этой планеты есть два массивных соседа, Сатурн и Юпитер, которые не могут не влиять на ее движение. К 1821 г., как раз когда все большее распространение получало название «Уран», движение этой планеты стало предметом значительного внимания. Бувар по результатам своих вычислений опубликовал таблицы орбиты Урана на годы вперед. Это значит, что он решил задачу о движении Урана с учетом притяжения не только к Солнцу, но и к двум большим планетам; такое решение требует начальных условий (см. главу «прогулка 1»), которые Бувар фиксировал по результатам имеющихся наблюдений. Идея вычислений состояла в том, чтобы последовательно находить отклонения от кеплерова эллипса из-за влияния соседей, которые при этом сами не стоят на месте. Со времен «Начал» Ньютона прошло 130 лет, в течение которых методы таких вычислений непрерывно совершенствовались, и не было никаких причин сомневаться, что Уран будет с течением времени виден на небе именно там, где ему «велел» находиться Бувар. Уран, однако, не стал этого делать. Разумеется, он двигался примерно по кеплерову эллипсу, но отклонения не точно соответствовали тем, которые предсказал Бувар. В частности, Уран ускорялся в своем движении сильнее, чем ожидалось.

*Соседние планеты слегка искажают кеплеровы эллипсы*

Как всегда в таких случаях, возможны варианты; о них легко рассуждать задним числом, когда вы дочитали детектив до конца, но участники расследования (в данном случае — ученые) не могут подсмотреть в конец книги и вынуждены угадывать причину несоответствия, которая вообще-то может оказаться какой угодно. Это могут быть ошибки в вычислениях (а такие ошибки иногда оказываются довольно тонкими, и их нелегко выловить). Вариант более серьезный — используемая теория не совсем правильна. Наконец, вспомним, что познание мира после «Начал» Ньютона было нацелено на *причины*. Какая причина может приводить к несогласию между предсказанным и наблюдаемым поведением планеты, когда влияния всех известных планет уже учтены? Влияние неизвестной.

Бувар скончался в июне 1843 г. Запущенная им цепочка событий — выразительная иллюстрация того, как работает наука: она публична и открыта, приглашая каждого воспользоваться ее результатами в меру сил (и, не будем наивными, в меру квалификации). Бувар подозревал наличие неизвестного тела довольно значительной массы, которое находилось *где-то* (точнее говоря, двигалось *как-то*) и оттуда влияло на Уран. Полезно представлять себе пространственный масштаб: оно могло находиться на расстоянии от трех до пяти миллиардов километров от нас. За математическую охоту на это тело с начала 1840-х гг. со всей серьезностью принялся Адамс, которому тогда едва исполнилось 20 лет (основные участники событий представлены на рис. 3.3). Адамсу нужны были не только таблицы Бувара, но и максимально точные данные наблюдений Урана. Сравнивая табличные значения и данные наблюдений, он надеялся решить *обратную задачу*: не по известным причинам определить движение, а, наоборот, по наблюдаемому движению восстановить недостающую причину (я думаю, Ньютон должен был бы испытывать полнейший восторг). Адамс написал королевскому астроному сэру Джорджу Эйри, который попросил ответных разъяснений, так что дело шло не быстро. В конце концов Адамс получил некоторые данные и к 1846 г. высказал предположение (собственно, несколько уточняющих друг друга предположений) о том, где может находиться неизвестная «планета X».

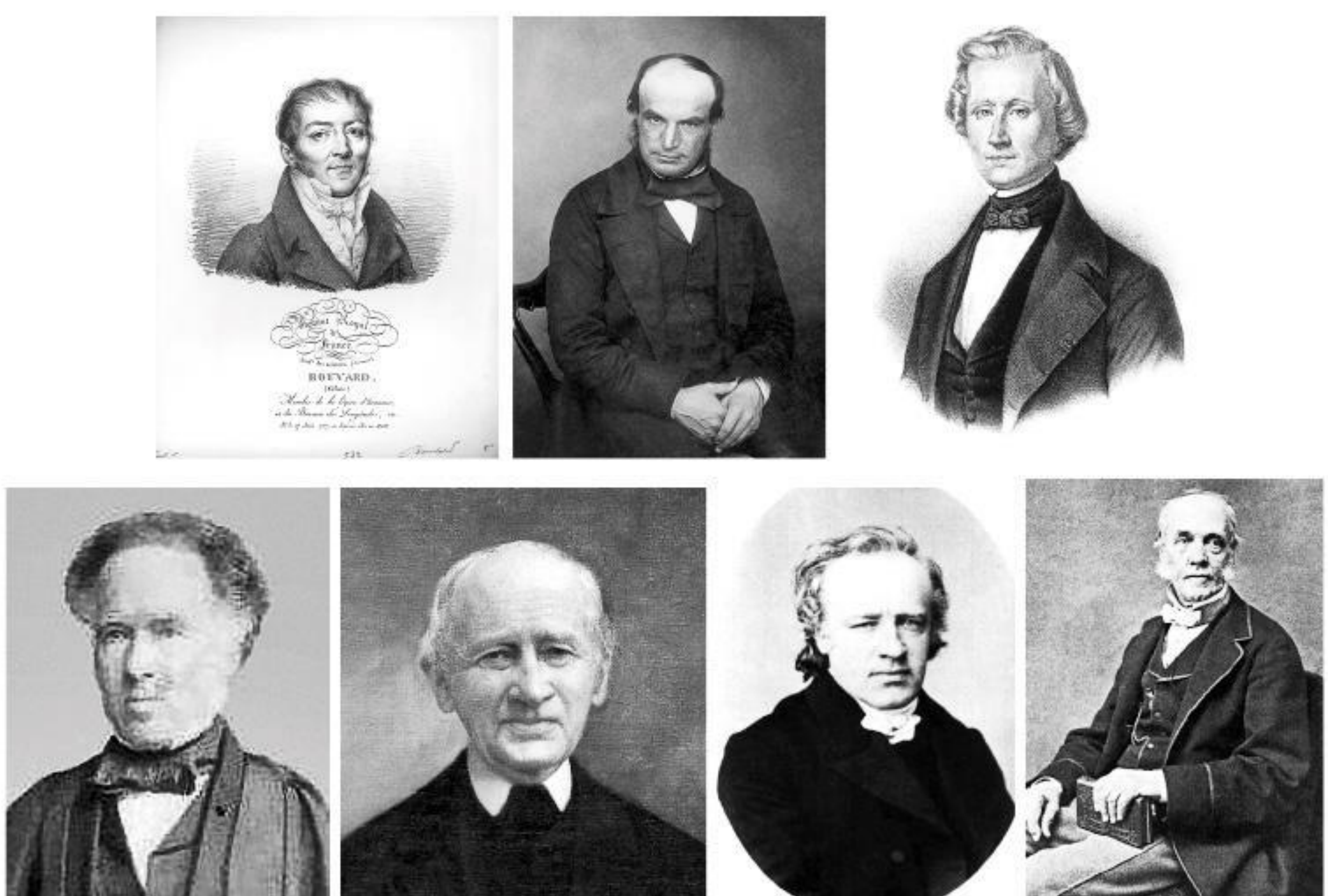


**Рис. 3.3.** Алексис Бувар, Джон Куч Адамс, Урбен Леверье, Джеймс Чэллис, Иоганн Готтфрид Галле, Генрих Луи д'Арре, Уильям Лассел

Наука приглашает к решению проблемы всех заинтересованных и при этом не замыкается в одной стране: независимо от Адамса француз Леверье проделал вычисления с той же целью — узнать, как могла бы двигаться неизвестная планета, чтобы ее влияние отвечало в точности за «аномалии» в движении Урана. Когда французские (!) коллеги отнеслись к его идеям прохладно, Леверье написал директору Кембриджской обсерватории Чэллису. Примерно в этот момент на сцене появляется Джон Гершель, сын первооткрывателя Урана, который с энтузиазмом поддержал необычную идею, что планету можно открыть математически, и убедил Чэллиса приняться за наблюдения, что тот и сделал в августе 1846 г. «Найти» планету на фоне многочисленных звезд означает зафиксировать ее наличие там, где ее определенно не было некоторое время назад. Это не единовременный акт «взглянул, увидел, открыл», и новостей от Чэллиса не поступало. Наука же не только интернациональна, но и конкурентна. Леверье написал еще и директору Берлинской обсерватории Галле, рядом с которым в обсерватории случился быть, выражаясь современным языком, аспирант, предложивший не откладывать дело в долгий ящик, а сравнить сделанную ранее карту ключевого участка неба с тем, что видно в телескоп *прямо сейчас*. Они вдвоем — Галле и д'Арре — открыли планету (известную нам как Нептун) ночью того же дня, когда Галле получил письмо, 23 сентября 1846 г. Она обнаружилась в 1° в стороне от положения, которое предсказал для нее Леверье, и в 12° от предсказания Адамса. Наука и правда делится своим результатами для того, чтобы их можно было развивать: через 17 *дней* после открытия планеты Лассел открыл ее спутник (который много позднее получил имя Тритон).

### *Нептун — планета, предсказанная в вычислениях*

Восьмая планета выдала себя движением, но не своим собственным, а чего-то другого, что видно лучше, — почти так же, как сейчас выдают себя экзопланеты, только способом, доступным для технологий XIX в. Постфактум выяснилось, что с «вычислением» Нептуна повезло: большую часть времени между открытием Урана в 1781 г. и серединой следующего столетия Уран и Нептун находились почти максимально близко друг к другу, из-за чего влияние

Нептуна и оказалось столь заметным. Если бы ситуация была противоположной — две планеты располагались по разные стороны от Солнца, то никаких заметных аномалий в движении Урана не обнаружилось бы и пришлось бы ждать открытия Нептуна каким-то менее регулярным образом; оно, несомненно, состоялось бы, ведь как опять-таки стало ясно в ретроспективе, его наблюдал (и оставил запись, приняв за неподвижную звезду) уже Галилей, когда изучал Юпитер в свой телескоп. Да и Чэллис, как оказалось, дважды видел Нептун в начале августа 1846-го, но не «открыл» его из-за сочетания двух факторов: у него не было подходящих звездных карт для сравнения, а голова была занята текущим интересом — исследованием комет. Вычисления, проделанные Адамсом и Леверье, позволили неплохо предсказать положение Нептуна на небе, несмотря на то что рассчитанные ими орбиты новой планеты заметно отличаются от истинной, как мы теперь знаем. Из рис. 3.4 видно, что оба вычисления давали близкие к действительности результаты для орбиты в той ее части, где планета находилась в тот период, но неверно оценивали, насколько вытянут эллипс (и, чего не видно из рисунка, ошибались в предсказании массы планеты, причем эта ошибка некоторым образом коррелировала с ошибкой в форме орбиты, что и давало близкое к верному текущее положение планеты). В открытии нового важнее не идеальность с первой же попытки, а сам факт того, что выбранный подход привел к результату.

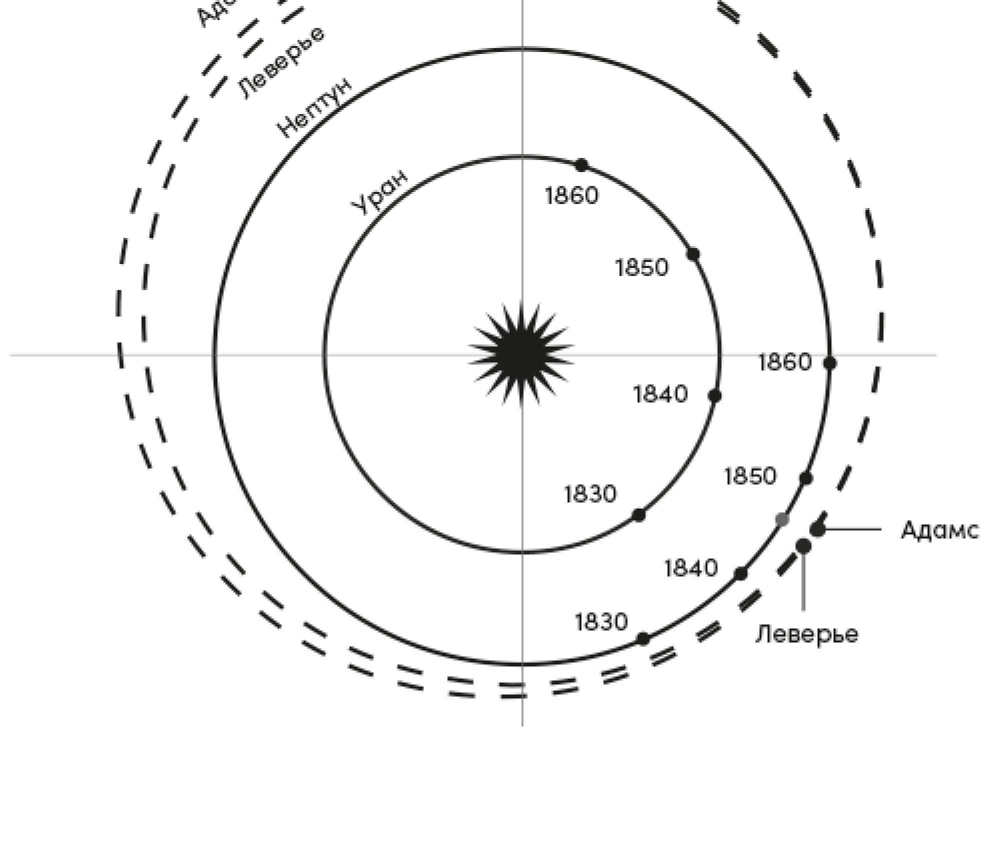


**Рис. 3.4.** Орбиты Урана и Нептуна с отмеченными положениями планет в выбранные годы. Уран движется по своей меньшей орбите быстрее, чем Нептун. В первой половине XIX в. две планеты находились в достаточной близости друг от друга. Дополнительно показаны орбиты, построенные по вычислениям Адамса и Леверье, а также предсказанные каждым из них положения новой планеты летом 1846 г.

Наука интернациональна как предприятие, но национальна по действующим лицам: постфактум разгорелось франко-британское соперничество за признание первенства в предсказании новой планеты. Название же установилось относительно быстро, хотя и не с первой попытки: Галле предложил Янус, Чэллис — Океан. Леверье был бы рад названию Леверье (из-за чего во Франции было вспомнили, что Уран — это Гершель), но в конце концов предложил вариант Нептун, и название закрепилось [45].

**Рис. 3.5.** Вид с «Вояджера-2» примерно через три дня и шесть с половиной часов после его максимального сближения с Нептуном. После этого сближения аппарат движется к окраинам Солнечной системы под углом 48° к плоскости земной орбиты

«Вояджер-2», запущенный 20 августа 1977 г., после промежуточной коррекции траектории приблизился к Нептуну в августе 1989-го. (Перед тем аппарат получил прибавки к скорости за счет гравитационной пращи у Юпитера, Сатурна и менее значительную — у Урана.) Курс был проложен так, чтобы заодно наблюдать и Тритон (рис. 3.5). Для этого потребовалось пройти над северным полюсом Нептуна, из-за чего гравитационная праща вывела «Вояджер-

2» из плоскости эклиптики (плоскости земной орбиты, вблизи которой лежат и орбиты большинства планет), поэтому сейчас его скорость относительно Солнца меньше, чем скорость «Вояджера-1». «Вояджер-2» открыл кольца и новые спутники Нептуна. Эти спутники (все — маленькие) получили имена божеств, связанных с водой: Наяда, Таласса, Деспина, Галатея, Ларисса, Протей и т.д. Кольца оказались сильно разреженными и поэтому с трудом различимы с Земли. Тем не менее они есть, и их несколько. Среди присвоенных им имен — Адамс, Лассел, Леверье и Галле. Больше вблизи Нептуна никто не был. В последние полтора десятка лет название *«нептуны»* стали использовать для экзопланет примерно такой массы, чтобы отличать их от более массивных юпитеров.

*****

**Гармония целых чисел.** Притяжение соседей заметно отличает реальную Солнечную систему от набора идеальных эллипсов, а в молодости отличало еще сильнее: эволюция под действием взаимного притяжения происходила так, что серьезные участники событий (планеты) успокоились, только расположившись на подходящих орбитах — таких, которые тем или иным способом обеспечивают подобие стабильности. У каждого своя орбита, на которой больше нет сколько-нибудь крупных и даже средних по размеру тел, кроме как, возможно, в точках Лагранжа $L_4$ и $L_5$, а влияние соседних планет никогда не делается слишком сильным. Те комбинации орбит, на которых оно делалось «слишком сильным», перестраивались до тех пор, пока конфликт соседей тем или иным образом не разрешался. Планеты мигрировали, иногда захватывая с собой и тех, кто напрямую в конфликте не участвовал.

Самое наивное решение для прекращения перестройки орбит — разведение планет на достаточное расстояние. Сила притяжения убывает по мере удаления, и орбиты в большинстве случаев действительно разделены значительными расстояниями. Например, минимальное расстояние между легкими Землей и Марсом — 55,76 млн километров, а между массивными Юпитером и Сатурном —

655 млн километров; при этом планеты редко сходятся на эту минимальную дистанцию, а большую часть времени пребывают заметно дальше друг от друга (максимальное расстояние от Юпитера до Сатурна — 2,21 млрд километров). Но есть и менее наивное решение. Орбиты, периоды обращения по которым соотносятся как небольшие целые числа (например, 3 : 2), могут быть устойчивыми даже несмотря на тревожащую близость. Орбиты Плутона и Нептуна (рис. 3.6) почти пересекаются: планеты могли бы приблизиться друг к другу на 2 а.е. (астрономическая единица — исторически принятое среднее расстояние от Солнца до Земли, около 149,6 млн километров), но в действительности никогда не сходятся ближе чем на 16 а.е. из-за установившегося *резонанса* — отношения периодов обращения 3 : 2. В их «невстрече» играет роль и наклон орбиты Плутона, но главное — это резонанс. Это в данном случае не музыкальный термин, описывающий, например, возникновение стоячей волны в корпусе скрипки, а именно отношение периодов обращения, выражаемое целыми числами. Внутри скрипки, впрочем, целые числа тоже некоторым образом присутствуют, потому что между стенками должно помещаться как раз целое или полуцелое число звуковых волн; вполне можно сказать поэтому, что резонанс между орбитами — определенный вид гармонии.

*Резонанс — целочисленная гармония между орбитами*

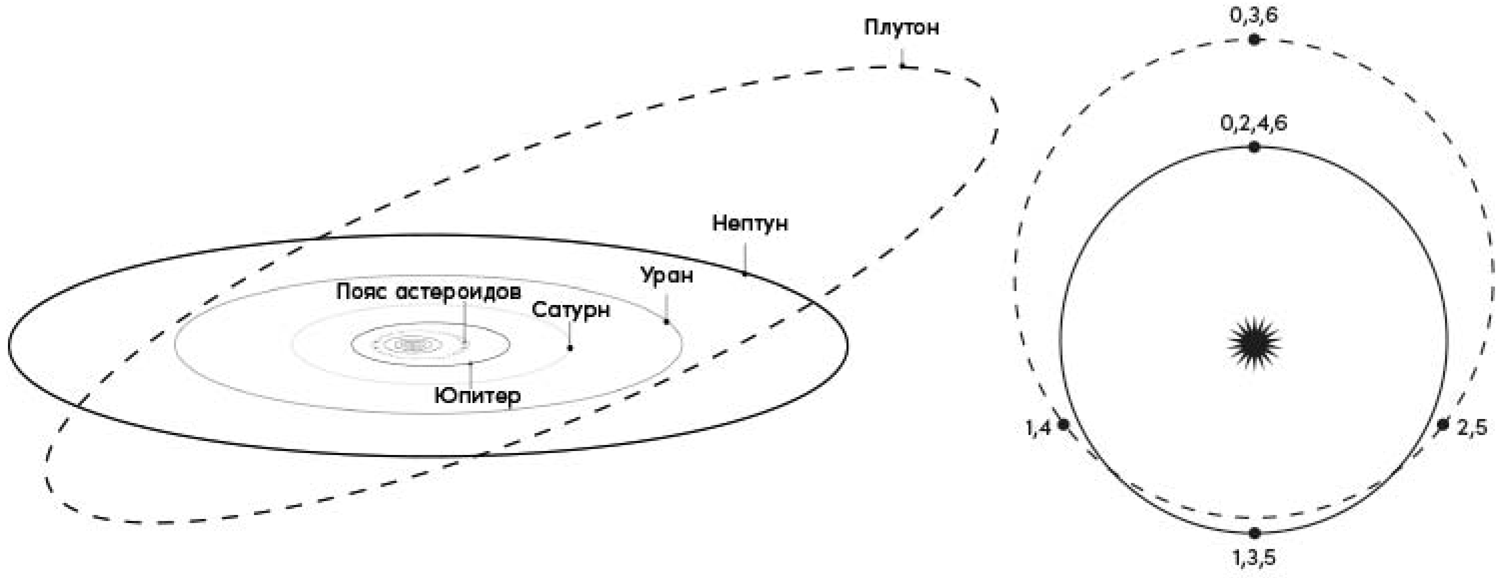



**Рис. 3.6.** Орбиты Нептуна и Плутона. *Слева:* орбита Плутона более вытянута, чем орбита Нептуна, и заметно (на 17°) наклонена к плоскости эклиптики. *Справа:* в проекции орбита Плутона заходит внутрь орбиты Нептуна. Одни и те же цифры около точек, отмеченных на орбитах,

указывают положения планет в один и тот же момент времени

Для Нептуна и Плутона целые числа 2 и 3 работают вот как. Когда какие-то две планеты оказываются примерно на одной линии с Солнцем по одну сторону от него, внутренняя планета тянет внешнюю в сторону Солнца, т.е. прибавляет свое притяжение к притяжению Солнца. Если расстояние между планетами при этом невелико, то внешняя планета может и не остаться на своей орбите. Можно ли избежать выстраивания в линию там, где орбиты близки друг к другу? На первый взгляд нет. Быстрая гоночная машина раз за разом обгоняет медленную на разных участках кольцевой трассы, и если подождать достаточно долго (а для Солнечной системы терпение — не вопрос), то какой-то очередной обгон случится наконец прямо напротив трибун. То же самое и с планетами: если «сейчас» внутренняя обгоняет внешнюю там, где их орбиты заметно разнесены, то в следующий раз это случится в другом угловом положении и так далее, а рано или поздно произойдет там, где расстояние между орбитами мало и планеты могут «зацепиться» друг за друга своим притяжением. Повторение таких встреч приведет к заметной перестройке орбит. Но положение спасают резонансы. Картина в случае резонанса 3 : 2 становится ясной при разглядывании рис. 3.6. Одни и те же цифры около точек, отмеченных на орбитах, указывают положения планет в один и тот же момент, а единицей времени выбрана половина периода обращения Нептуна. В момент 0 планеты действительно находятся на одной линии с Солнцем, но там и расстояние между орбитами максимальное, и удаление каждой планеты от Солнца тоже максимально. А когда Нептун подходит ближе всего к Солнцу (моменты 1, 3, 5), Плутон оказывается то впереди, то позади него на изрядном расстоянии. Картина относительного положения двух планет повторяется с периодом 6 в выбранных единицах — каждые два оборота Плутона и три оборота Нептуна; публика понимает, что обгон неизменно происходит в скучной части трассы, и расходится.

## *Устойчивость близких орбит поддерживается резонансами*

«Встраивание» целых чисел в орбиты планет — не знак предустановленной гармонии, а результат эволюции. Орбиты деформировались до тех пор, пока не происходило одно из двух: планеты расходились или периоды их обращения устанавливались в подходящем соотношении. Какие именно резонансы установятся (и установятся ли) в сложной системе нескольких тел, сказать заранее крайне трудно. Сэр Исаак Ньютон управляет этим процессом, так сказать, из-за кулис: и само существование резонансных состояний, и возможная (вовсе не обязательная, конечно) эволюция к одному из них — это следствия все тех же законов движения и тяготения, только ход эволюции крайне чувствителен к деталям текущего состояния, пока оно еще не стало устойчивым. Три из четырех открытых Галилеем спутников Юпитера — Ио, Европа и Ганимед — находятся в резонансе 1 : 2 : 4. Спутники Нептуна Таласса и Наяда, уже упоминавшиеся чуть выше, быстро обращаются вокруг планеты (три с лишним раза за земной день) и находятся в редком резонансе 73 : 69, благодаря которому им удается удерживаться на очень близких орбитах. Две их практически круговые орбиты наклонены под углом 5° друг к другу и «почти пересекаются». Если бы оба небесных тела одновременно оказались вблизи одной из «точек пересечения», то их взаимное притяжение увело бы их с этих орбит. Но резонанс решает задачу невстречи: они проходят опасные точки на расстоянии около 1850 км по радиусу (Наяда внутри) и спасительных 2800 км в направлении, примерно перпендикулярном плоскости орбит. И никогда не подходят друг к другу ближе этого [46].

На какие еще ухищрения способны движение и притяжение, выразительно демонстрируют спутники Сатурна Янус и Эпиметей. Они занимают предельно близкие друг к другу орбиты, которые по радиусу разделяет всего 50 км (!), причем без сколько-нибудь заметного относительного наклона: орбиты буквально лежат рядом на всем своем протяжении, а просвет между ними меньше диаметра каждого из спутников (которые вообще-то небольшие: более крупный Янус — это кусок 203 × 185 × 152,6 км). Поскольку движение по внутренней орбите происходит быстрее, чем по внешней, столкновение кажется неминуемым (поистине безрассудные спутники!). Столкновению, однако, препятствует орбитальная механика — та самая, которую мы обсуждали в главе «прогулка 2» в связи с маневрами космических кораблей. В случае естественных спутников в ней есть дополнительный элемент — взаимное притяжение. Из-за *притяжения* Янус и Эпиметей, сближаясь, никогда не подходят друг к другу ближе чем на 10 000 км — что выглядит парадоксально, потому что при приближении быстрого к медленному взаимное притяжение начинает тянуть каждый спутник в сторону другого. Сейчас столкнутся? Даже раньше, чем если бы притяжения между ними не было? Смотрим внимательнее: из-за притяжения друг к другу более быстрый — догоняющий — приобретает дополнительную скорость, а более медленный ее теряет. Лучше говорить даже не о скорости, а о количестве движения — это произведение скорости на массу, что в данном случае существенно, потому что один из спутников (Янус) в четыре раза массивнее другого. Два спутника обмениваются количеством движения: сколько прибавляется у одного, столько же вычитается у второго [47]. Если бы это были автомобили с растянутой между ними пружиной, которая норовит сжаться, то столкновение произошло бы только скорее, чем без пружины. Но на орбите все ровно наоборот. Прибавка количества движения у быстрого спутника означает прибавку к энергии, а мы помним, что добавленная на орбите энергия не идет в энергию движения. В действительности энергия движения делается даже меньше, а увеличивается энергия в поле притяжения. Из-за этого более быстрый (догоняющий) спутник *переходит* на более высокую орбиту и *замедляется*, не успев догнать своего компаньона. Тот же, наоборот, отдав некоторое количество движения, а потому и энергии, переходит на более низкую орбиту и ускоряется, убегая «вперед» от своего преследователя. Нестрого можно сказать, что два спутника меняются орбитами, — нестрого потому, что массы у них все-таки разные и орбита более легкого изменяется сильнее (если бы их массы были одинаковы, они бы буквально менялись орбитами) [48]. Понятно, что происходит потом: тот, который стал более быстрым, рано или поздно начинает подбираться «сзади» к более медленному и обмен орбитами повторяется (или происходит в обратном направлении, если вам так больше нравится). *Интересно* было бы наблюдать такое в земном небе — мифология разных народов наверняка интерпретировала бы эту картину очень изощренными способами.

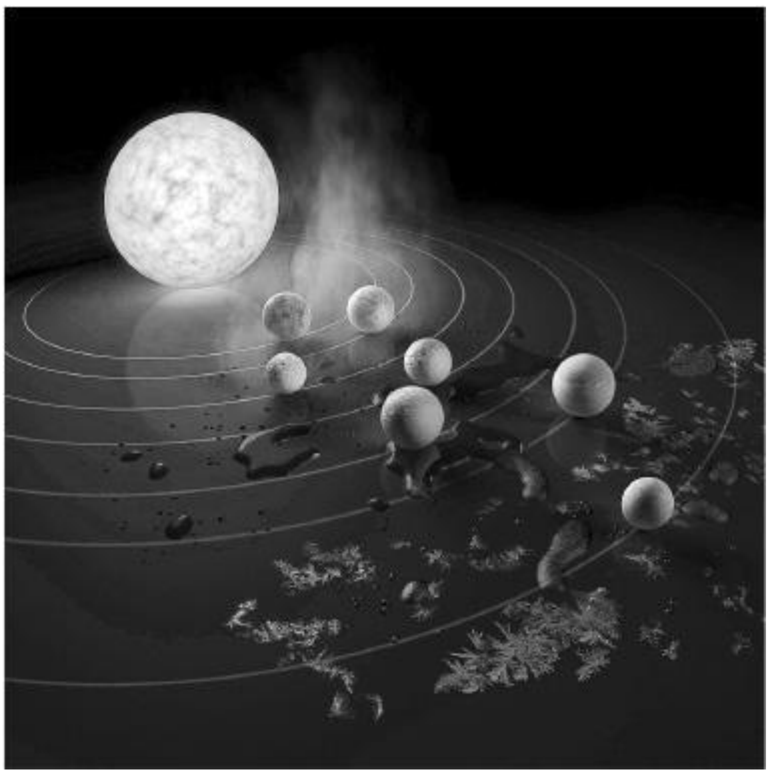


**Рис. 3.7.** Система TRAPPIST-1 в видении художника. Размеры звезды и планет показаны не в масштабе в сравнении с расстояниями

Чемпион по резонансам — не Солнечная система, а звезда TRAPPIST-1 и ее планеты. Эта звезда — ультрахолодный красный карлик, имеющий пять планет размером почти как Земля и еще две несколько меньшие, хотя и превосходящие по размеру Марс (рис. 3.7). Все эти планеты находятся *существенно* ближе к своей звезде, чем наш Меркурий к Солнцу, но из-за того, что звезда светит очень слабо, целые три планеты (e, f и g) расположены в зоне, потенциально пригодной для жизни [49]. При этом самая близкая к звезде планета обращается *вокруг звезды за время около полутора земных суток*, а самая дальняя — за неполные 19 суток, так что картина в небе каждой из планет выглядит оживленно. Планеты b и c обращаются по таким близким орбитам, что одна должна быть практически постоянно видна с другой, временами становясь даже больше, чем Луна в земном небе. И все вместе — это пир резонансов: планеты c, d, e, f, g, h находятся с самой внутренней планетой b в резонансах 8 : 5, 8 : 3, 4 : 1, 6 : 1, 8 : 1 и 12 : 1. *Гармонии* в этом оказалось достаточно для того, чтобы положить ее на музыку (см. литературные комментарии к этой прогулке).

Командовать естественными спутниками нам не под силу, но мы в состоянии распорядиться целочисленными отношениями для собственной пользы, если речь идет об орбитах космических аппаратов в системе нескольких тел. 18 апреля 2018 г. ракета «Фалькон-9» компании SpaceX вывела в космос сменщика «Кеплера» в деле поиска экзопланет — космический телескоп TESS [50]. Он отправился к ранее никогда не использовавшейся орбите в резонансе 2 : 1 с Луной. Для этого телескоп сначала дождался свидания с Луной, летая по сильно вытянутым эллипсам (рис. 3.8). Лунная гравитационная праща отправила его на переходную орбиту, откуда он в конце концов перебрался на орбиту вокруг Земли с периодом обращения 13,7 суток — это ровно половина периода обращения Луны; такая пара орбит и называется резонансной в отношении 2 : 1. Максимальное удаление от Земли на этой орбите на 11 000 км меньше среднего расстояния до Луны. Неконтролируемого (различного от витка к витку) влияния Луны удается в этом случае избежать потому, что в момент наибольшего удаления телескопа от Земли Луна при взгляде с земной поверхности находится под углом 90° к нему. Начав с этого положения, стоит попробовать «анимацию для бедных»: поводить пальцами по рис. 3.8, следя за правилом 2 : 1 — делая два оборота спутника на каждый оборот Луны вокруг Земли (у меня это получилось в варианте «половина оборота Луны на каждый полный оборот спутника»). Картина полностью повторяется с каждым следующим оборотом Луны — ничего нового не происходит, чего, собственно, и хотелось. Как видно, половину своего периода обращения Луна находится по одну сторону от орбиты TESS, а половину — по другую, в результате чего ее усредненное влияние на орбиту телескопа оказывается близким к нулю. И заодно диск Луны не мешает наблюдениям.

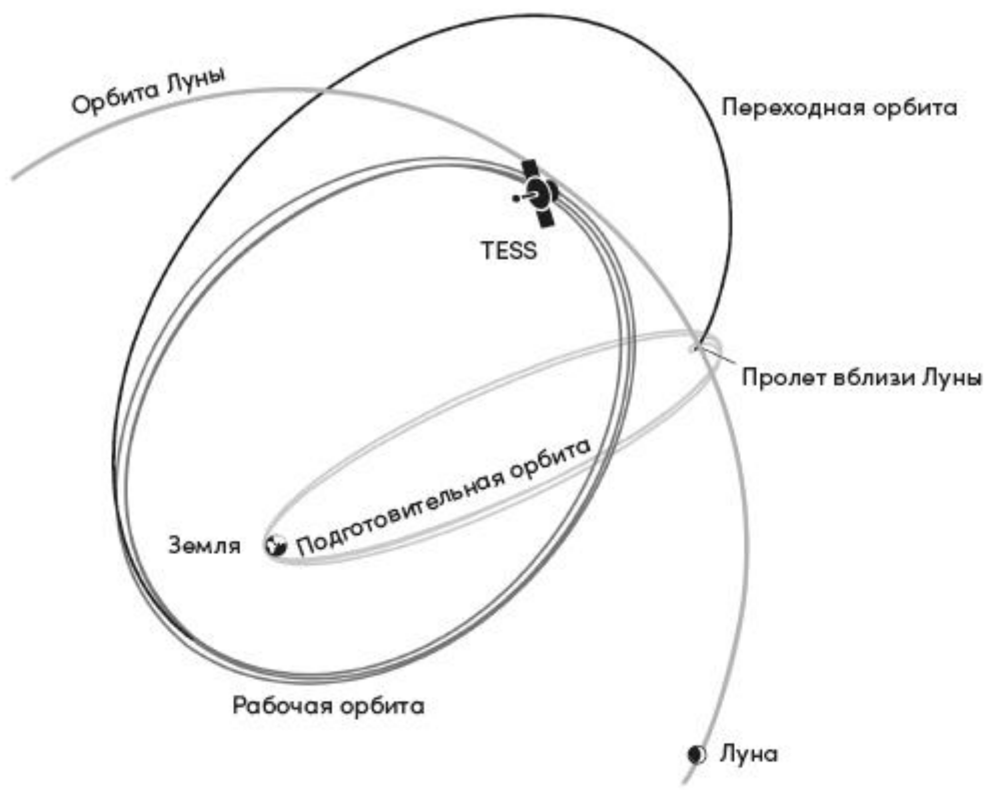



**Рис. 3.8.** Путешествие телескопа TESS к орбите в резонансе 2 : 1 с Луной

TESS ищет планеты в основном не дальше 200 световых лет — намного ближе, чем это делал «Кеплер», который обнаружил основную массу своих планет на расстояниях от 300 до 3000 световых лет (пожалуй, чем ближе, тем интереснее). В начале января 2020 г. TESS, счет которого на планеты к этому моменту уже перевалил за 1500, обнаружил свою первую планету, близкую по размеру к Земле (лишь немного ее превосходящую) и, главное, обращающуюся на таком расстоянии от своей звезды, что там может существовать жидкая вода (правда, год там примерно в десять раз короче нашего — звезда тусклая, из-за чего подходящий температурный режим и оказался возможным на планете, обращающейся совсем близко к звезде). Находится этот мир (TOI 700 d) всего в сотне световых лет отсюда. По итогам первых трех лет работы, подведенным в январе 2022 г., телескоп обнаружил пять с лишним тысяч кандидатов в экзопланеты; мы ждем от него новых экзопланет земного типа еще ближе к нам.

*****

**Тайна девятой планеты.** Резонанс — не обязательно демократическое мероприятие с примерно равными партнерами (скажем, двумя планетами или двумя спутниками). Большие планеты во главе с Юпитером командуют тем, в каком резонансе с ними двигаться более мелким телам — в первую очередь астероидам; примеров в Солнечной системе в избытке. Юпитер, собственно говоря, не дал сформироваться планете там, где сейчас находится пояс астероидов (это не обломки того, что когда-то развалилось, а строительный материал, который не пошел в дело). Но что, если «подчиненное» положение нескольких тел усмотреть можно, а причины его не видно? «Нептун наших дней» то ли угадан, то ли нет по признакам более тонким, чем несоответствие кеплерову эллипсу. Наоборот, потребовалось несколько эллипсов. Эта детективная история развивается в той области, которая была открыта и осознана как неотъемлемая и интересная часть Солнечной системы только в конце XX в.

Солнечная система состоит не только из планет и вовсе не заканчивается последней планетой — Нептуном, находящимся на расстоянии около 30 а.е. от Солнца. Далеко за его орбиту простирается мир из тысяч каменно-ледяных кусков разного размера, которые неспешно летают вокруг Солнца и все вместе называются транснептуновыми объектами. (Еще дальше расположено — строго говоря, гипотетическое — облако Оорта, о котором мы говорить здесь не будем.) Подавляющее большинство из них значительно меньше километра в диаметре, но есть и карликовые планеты; впрочем, статус некоторых объектов может меняться по мере их изучения, которое в целом представляет собой сложную задачу из-за того, что они и достаточно малы, и далеко находятся, и медленно движутся (последнее означает трудности с определением их орбит). Самые большие из идентифицированных транснептуновых тел показаны на рис. 3.9. «Вояджер-1» и «Вояджер-2» не исследовали это собрание, потому что о его существовании перед их стартом еще не подозревали. На рис. 3.10 показано, как космический телескоп «Хаббл» видит некоторые карликовые планеты.

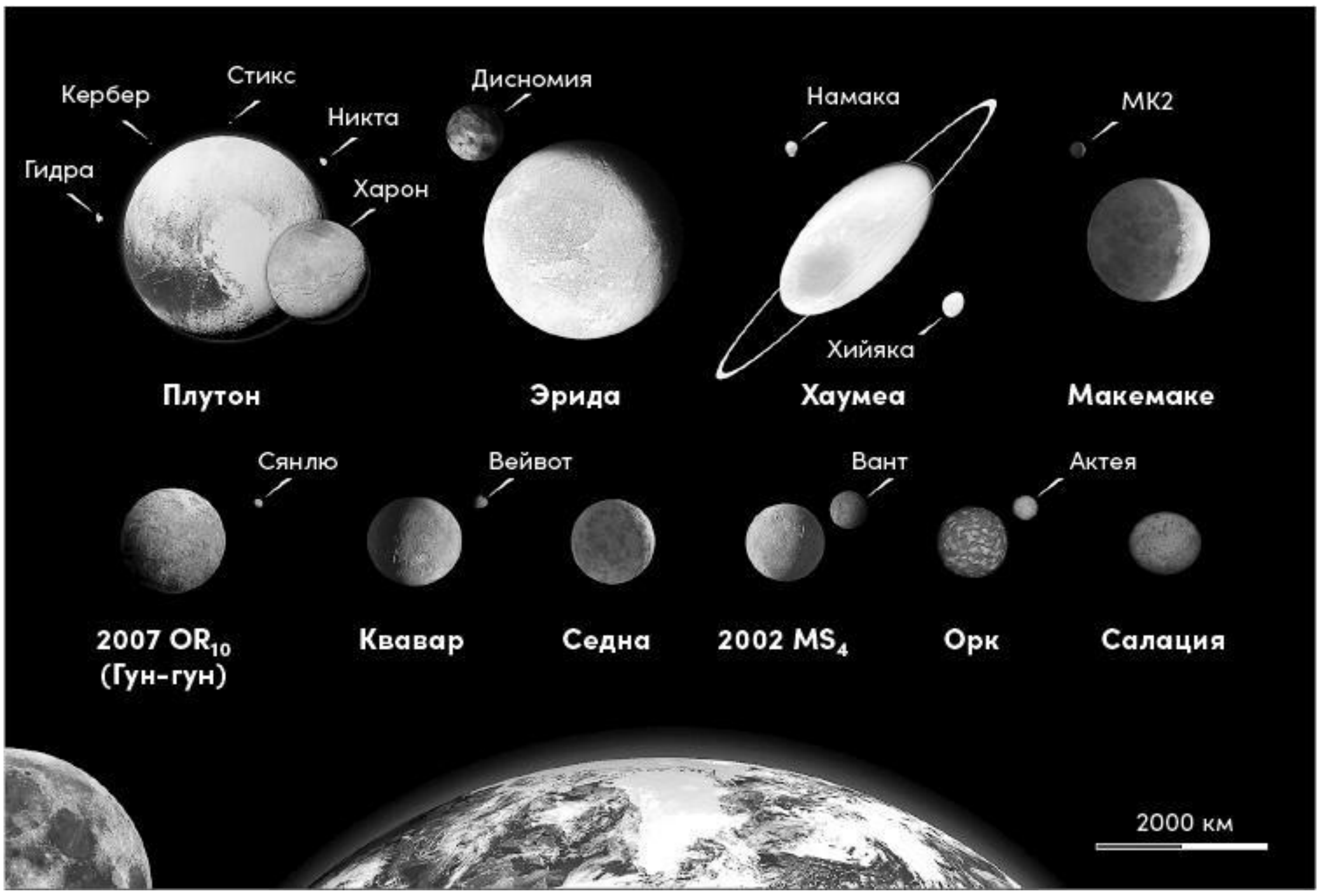



**Рис. 3.9.** Сравнительные размеры Земли, Луны и самых крупных транснептуновых объектов, включая пару Плутон/Харон. У некоторых других занептунных тел тоже установлено наличие спутников

**Рис. 3.10.** Как космический телескоп «Хаббл» видит карликовые планеты: Седна, Макемаке и Эрида со своим спутником Дисномия

Те транснептуновые объекты, на движение — т.е. на орбиты — которых тем или иным способом повлияла последняя из планет (Нептун, разумеется), относят к так называемому поясу Койпера. Некоторые из этих замерзших кусков состоят в разнообразных резонансах с Нептуном. Те, которые устроились в резонансе 3 : 2, называются плутино (мн. ч.) по той причине, что именно в таком резонансе с Нептуном пребывает и сам Плутон, который относится не к «настоящим», а к карликовым планетам и по характеру своего движения тоже представляет собой плутино (ед. ч.). По мере удаления от Солнца встречаются тела и в других резонансных соотношениях, наиболее широко из которых представлены 5 : 3 и (еще дальше от Солнца) 2 : 1. А между ними (в интервале больших полуосей примерно от 42 до 48 а.е.) лежат орбиты большинства *нерезонансных* обитателей пояса Койпера: они «просто» летают, не приближаясь слишком сильно к Нептуну, который поэтому оказывает на них эпизодическое, нерегулярное воздействие. По этой причине параметры их орбит — если смотреть на весь этот класс в целом — распределены довольно хаотическим образом. А из-за того, что суммарная масса объектов пояса Койпера очень невелика — всего около 2% массы Земли, друг на друга они влияют слабо. В целом в транснептуновом мире картина орбит, большие полуоси которых лежат в пределах 100 а.е., *понятна* в том отношении, что так или иначе отражает известное нам влияние больших планет Солнечной системы.

Тела на орбитах, проходящих еще дальше от Солнца, за пределами пояса Койпера, распределены более редко и составляют так называемый рассеянный диск; они максимально приближаются к Солнцу на расстояния в интервале от 30 до 38 а.е., но их наибольшее удаление составляет многие десятки и первые сотни астрономических единиц. Карликовые планеты, кстати, встречаются в разных категориях: например, Хаумеа и Макемаке относятся к поясу Койпера, Эрида — представитель рассеянного диска, а Седна лежит в отдельном подклассе «*обособленных* объектов» — тех, которые даже при своем максимальном приближении к Солнцу остаются на расстоянии не менее 40 а.е. от него. Кроме обособленных объектов, имеется и «смешанный класс» тел, названных по этому поводу кентаврами: их орбиты сильно вытянуты, из-за чего они время от времени ныряют в область влияния планет (на расстояния около 30 а.е. от Солнца), но потом надолго уходят очень далеко, до расстояний, измеряемых первыми тысячами астрономических единиц. Эти обособленные и «почти обособленные» объекты — встречающиеся, хотя и не очень широко распространенные в далекой занептунщине — и оказались главными свидетелями в развивающейся детективной истории.

Обособленные объекты и отчасти кентавры имеют «незагрязненные» орбиты: воздействие Нептуна на них слишком слабо и для того, чтобы установить резонансы, и для того, чтобы «хаотизировать» общую картину орбит, которые в резонанс не попали. Поэтому если в орбитах обособленных объектов удается усмотреть какую-то регулярность, то стоит задуматься о ее причине. В 2016 г. — когда гипотезы о неизвестных телах, оказывающих влияние на занептунщину, уже несколько лет обсуждались научным сообществом — Браун (среди прочего первооткрыватель Седны) и Батыгин собрали вместе несколько наблюдаемых примеров таких регулярностей и предложили им единое объяснение. Вообще-то все эти орбиты имеют только один гарантированно общий элемент — Солнце в фокусе — и при этом раскиданы в пространстве самыми разными способами: они вовсе не лежат в плоскости эклиптики, линии пересечения орбит с плоскостью эклиптики имеют различные ориентации, а каждый эллипс в большей или меньшей степени «повернут на бок» в своей плоскости по отношению к плоскости эклиптики. Однако шесть транснептуновых объектов (Седна, 2012 $VP_{113}$, 2004 $VN_{112}$, 2010 $GB_{174}$, 2007 $TG_{422}$ и 2013 $RF_{98}$) — достаточно далеких, летающих по вытянутым эллипсам с большими полуосями не менее 250 а.е. — демонстрируют интригующую согласованность: если плоскость каждой орбиты мысленно совместить с плоскостью эклиптики, поворачивая вокруг линии пересечения двух плоскостей, то неожиданно близкими друг к другу окажутся направления от Солнца на перигелии — точки максимального приближения каждого тела к светилу. И это не все! Эллипсы, по которым летают объекты из частично другой шестерки (Седна, 2012 $VP_{113}$, 2004 $VN_{112}$, 2010 $GB_{174}$, 2000 $CR_{105}$ и 2010 $VZ_{98}$), сходны в том, в какой степени они «повернуты на бок» по отношению к плоскости эклиптики: двигаясь от точки пересечения с эклиптикой до перигелия, каждое из этих тел совершает поворот на примерно один и тот же угол, если смотреть от Солнца. Конечно, никто еще не видел эти объекты в перигелиях (для этого пришлось бы ждать *сотни или даже тысячи* лет), но, как только несколько последовательных наблюдений позволяют определить эллипс, большого выбора не остается — мы знаем про этот эллипс все, в том числе и скорость движения по нему. Имеются, кроме того, и другие признаки сходства между рядом орбит, включая их наклонение к плоскости эклиптики.

### *Некоторые транснептуновые орбиты организованы неожиданно регулярно*

Беспричинные совпадения такого рода не просто маловероятны; например, концентрация направлений на перигелии *не может сохраняться* даже в течение времени в одну десятую возраста Солнечной системы: за такой период времени перигелии «разбредутся» кто куда по всем 360 градусам из-за прецессии. Прецессия орбиты — это (медленный) поворот самого эллипса, в данном случае вызванный наличием больших планет в Солнечной системе. Да, планеты оказывают на обособленные объекты только усредненное воздействие, но создаваемая ими добавка к притяжению Солнца, пусть численно и небольшая, качественно меняет движение: кеплеровы эллипсы начинают поворачиваться [51]. Скорость поворота каждого эллипса зависит от того, каков в точности этот эллипс, поэтому для каждого тела скорость «ухода» перигелия получается своя собственная, и за время существования Солнечной системы от концентрации перигелиев, если она когда-то и имела место, не останется и следа — если только тут нет какого-то постоянно действующего механизма, поддерживающего эту концентрацию. И еще одна загадка обособленных тел связана с их орбитами как таковыми: как они, эти орбиты, получились такими «обособленными»? Наши представления об образовании и эволюции Солнечной системы подсказывают, что сформироваться эти тела должны были не там, где они находятся сейчас, а ближе к Солнцу, но в таком случае какое-то гравитационное взаимодействие должно было «закинуть» их на такие далекие орбиты, а Нептун на эту роль не подходит именно из-за того, насколько далеко за орбитой Нептуна находятся их перигелии.

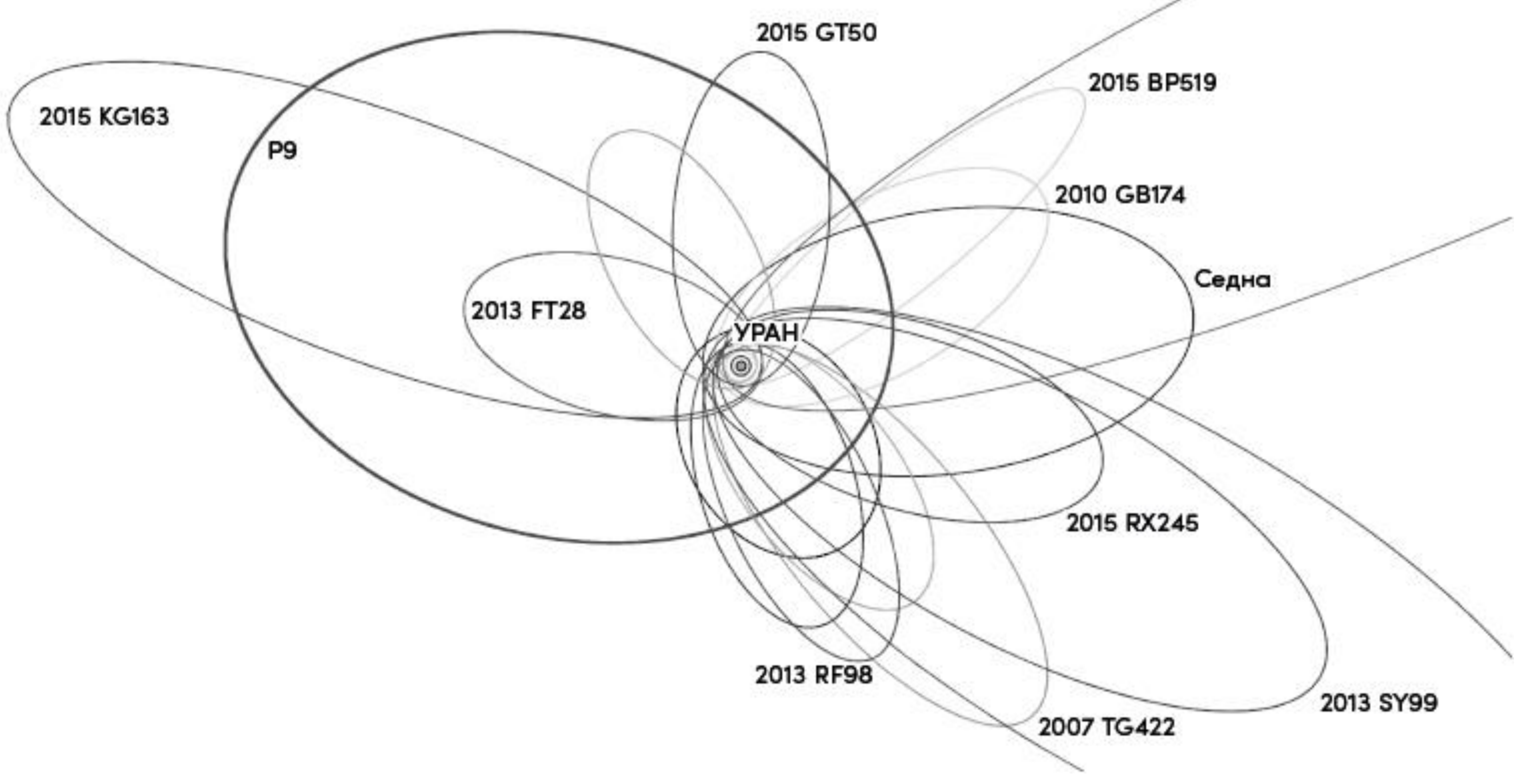



**Рис. 3.11.** Орбиты нескольких транснептуновых тел и возможная орбита Планеты 9, которая их «выстраивает» (P9, показана более толстой линией). Полезно представлять себе масштаб: характерное расстояние от Солнца до Планеты 9 превышает расстояние от Солнца до Земли в полтысячи раз; орбиту Земли показать здесь в масштабе невозможно. Максимальное удаление объекта 2015 $KG_{163}$ от Солнца — около полутора тысяч расстояний от Земли до Солнца

Браун и Батыгин предложили механизм для ответа на весь этот набор вопросов в виде неизвестной планеты (рис. 3.11), которая определила особенности этих орбит своей гравитацией. Она — ничем более не известная Планета 9 — должна для этого улетать на максимальное расстояние от 400 до 800 а.е. от Солнца и иметь массу около пяти масс Земли. «Предложили» означает построили компьютерную модель, внутри которой сэр Исаак Ньютон распоряжается совместным поведением группы тел в далекой области Солнечной системы, из чего в результате видно, что при некоторых предположениях об орбите Планеты 9 ее гравитационное влияние примерно так и выстраивает орбиты этих тел, даже если вначале они были распределены каким-то случайным образом. Орбита самой «девятки» извлекается отсюда в довольно приблизительном описании; а в какой части этой орбиты планета находится сейчас, не может быть известно в принципе — поэтому неизвестно, куда смотреть, чтобы ее обнаружить. Этим ситуация, развивающаяся на наших глазах, отличается от истории с открытием Нептуна. Отличаются, кроме того, постановка задачи и метод рассуждений: ищется не причина аномалии, а, наоборот, причина «повышенной регулярности». И доверие к математическому подходу для поиска причины несравнимо с тем, которое только пробивало себе дорогу во времена Леверье: гипотеза Брауна и Батыгина широко обсуждается, предлагаются (как и полагается в науке, где скепсис — основа долгосрочного здоровья) альтернативные модели разной степени успешности, а планету тем временем *ищут*. Слабость отраженного света, испускаемого таким небольшим телом на столь большом расстоянии от Солнца, делает задачу его нахождения на фоне звезд поистине сложным испытанием для инструментов и методов наблюдательной астрономии. Дальнейшие вопросы возникнут, когда (если) Планету 9 найдут: каким образом такая планета смогла оказаться на такой далекой орбите? Как/где она сформировалась, притом что строительного материала в такой далекой области, судя по всему, недостаточно? (Пришла от другой звезды? Мигрировала из внутренних областей Солнечной системы? …?) На вопросы о причинах различных совпадений придется отвечать как-то иначе, если Планету 9 так и не найдут. И ее, наверное, перестанут активно искать, если появится радикально лучшая гипотеза, объясняющая «излишнюю упорядоченность» далеких орбит.

Мне бы хотелось, чтобы Планета 9 была обнаружена примерно в момент выхода этой книги из печати.

*****

**Тайна первой планеты.** Не все аномалии или другие особенности в наблюдаемом движении объясняются влиянием гипотетических новых тел, таких как Нептун или Планета 9. Очередное расхождение между наблюдениями и теорией возникло в середине XIX в. не на дальних рубежах Солнечной системы, а в непосредственной близости к Солнцу. В 1859 г. не кто иной, как Леверье, анализируя наблюдения за прошедшие полтора века, заметил, что Меркурий — первая планета от Солнца — движется по кеплерову эллипсу с небольшой неувязкой: сам этот эллипс медленно поворачивается, как это с огромным преувеличением показано на рис. 3.12. Причина или причины? Некоторые были известны Леверье: влияние других планет и несферичность Солнца. Самый точный, какой только был возможен, учет этих факторов сократил неувязку, но не убрал ее. Оставались лишние — никак не объясненные — 43″ (угловые секунды) *в столетие*. Я боюсь и пытаться вообразить, как должен был себя чувствовать человек, чуть более десяти лет перед тем уже выследивший неизвестную планету на самом краю (как тогда считалось) Солнечной системы, когда теперь ему в руки верно шла еще одна, на этот раз в тесном соседстве с Солнцем; с каким замиранием сердца он должен был проверять свои вычисления, по которым предстояло обнаружить планету *Вулкан*! По удивительному стечению обстоятельств такие вычисления хорошо «сходятся» к вполне определенному результату, подсказывая массу планеты около трех масс Земли и период ее обращения вокруг Солнца в трое суток. *Быстрая и горячая* планета [52].

### *Орбита Меркурия — не эллипс, а поворачивающийся эллипс*

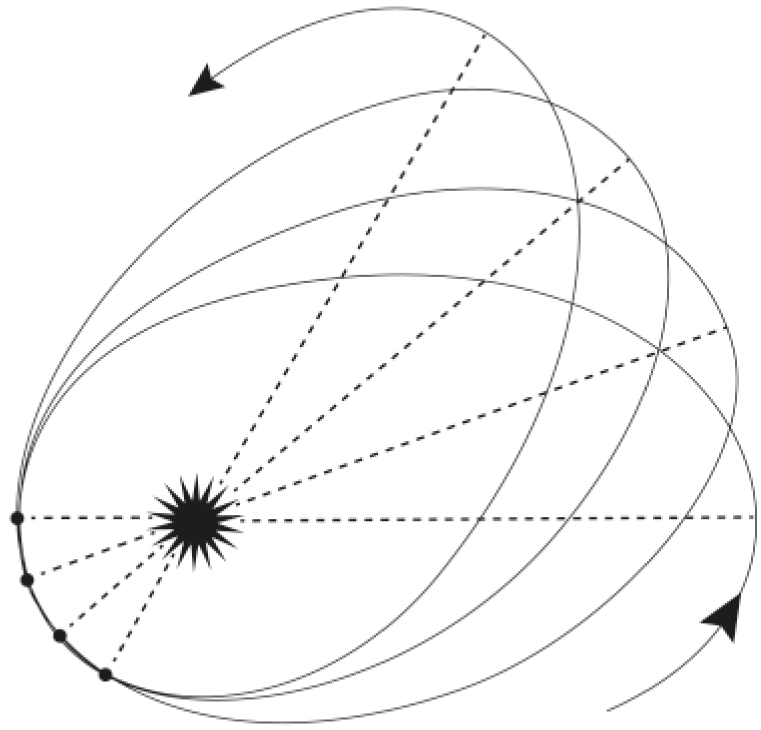


**Рис. 3.12.** Прецессия перигелия Меркурия — медленный поворот самого эллипса, представляющего собой орбиту Меркурия. Эффект показан с колоссальным преувеличением

Но испытанный прием — невидимая масса, которая сама движется таким образом, что вызывает наблюдаемую аномалию в движении Меркурия, — не сработал. Ничего похожего на планету или даже на рассеянные в близкой окрестности Солнца более мелкие тела обнаружено не было. Но что еще может портить прекрасную общую картину лишь для *одной* планеты, причем без внешнего вмешательства? Откровенно говоря, далее я рассуждаю не очень честно — задним числом, зная ответ. И тем не менее: самая близкая к Солнцу планета автоматически и самая быстрая, и в качестве виновницы аномалии можно было бы заподозрить скорость — достаточно большую, чтобы закон тяготения Ньютона требовал каких-то поправок. Правда, данных маловато. Если бы быстрых планет в Солнечной системе было несколько, то, вероятно, можно было бы сопоставить скорости поворота их эллипсов и скорости движения самих планет и отсюда сделать какое-то предположение о характере зависимости одного от другого. Получилось бы что-то вроде законов Кеплера — выжимка из наблюдений без углубления в механизмы, говорящая, что в зависимости от скорости планеты эллипс поворачивается вот на столько. Удалось ли бы внести зависимость от скорости в формулу собственно закона тяготения — большой вопрос. Как бы то ни было, других быстрых планет в Солнечной системе не нашлось, а никакие иные эксперименты по быстрому движению в гравитационном поле доступны не были. Разрешение загадки пришло не из наблюдений, а из очень концентрированных рассуждений, в результате которых ньютоновский закон тяготения (1.1) подвергся модификации, причем серьезной. Это случилось через 40 лет после смерти Леверье, для которого тайна Меркурия так и осталась неразгаданной. Новая, более изощренная теоретическая схема называется «общая теория относительности» (она же — теория гравитации Эйнштейна). Мы отложим подробности до позднейших прогулок; сейчас нам важно, что Меркурий, в отличие от Урана, нельзя было «спасти» неизвестным Вулканом и вместо этого пришлось серьезно модифицировать наши представления о том, как работает гравитация.

*****

**Несогласное вращение.** Идея о наличии во Вселенной невидимого вещества, которое выдает себя движением видимого, заявляла о себе на протяжении большей части XX в., только от нее долго отмахивались. На этот раз речь идет о расстояниях, в миллионы раз превышающих размер Солнечной системы, да и масштабы происходящего — не пара планет. Невидимая материя присутствует не в каком-то одном месте, а практически *везде*, где есть что-то видимое, причем неведомой и невидимой материи раз в пять больше, чем ведомой и видимой. Это поучительный момент в истории нашего открытия мира. Первые наблюдения в телескоп (Галилей) обнаружили подробности устройства небес, до того даже не предполагавшиеся (спутники Юпитера, например). Инерция человеческого восприятия и деления явлений на «естественные» (понятные) и «неестественные» (непонятные) даже породила в тот момент дискуссии, в какой степени наблюдаемое в телескоп можно отнести к свойствам самого телескопа. Далее выяснилось (Ньютон), что и яблоко, и Луна — вещь обыденная и вещь небесная — подчиняются одним и тем же законам движения и тяготения. После этого средства наблюдений за «небом» (Вселенной, как с этого момента лучше говорить) безостановочно совершенствовались, сообщая нам о многообразии структур и явлений, которые иногда не видны в обычный оптический телескоп, но ярко проявляют себя в других частях электромагнитного спектра. Дискуссии о том, до какой степени наблюдаемое с помощью радиотелескопа «является свойством радиотелескопа», уже не затевались, даже в связи с широко распространившейся «фотографией» черной дыры (рис. 3.13) [53]. Казалось бы, мы научились неплохо видеть, что происходит во Вселенной, и при этом нам в общем понятно, чем она наполнена; в результате трехсотлетнего развития науки вся Вселенная выглядит доступной наблюдению и изучению (про сложные объекты в ней понятно, конечно, далеко не все, но по крайней мере ясно, что это за объекты и в каком направлении надо их изучать дальше). И тем не менее Вселенная в подавляющей степени состоит из того, что увидеть нельзя *в принципе*. «Небесное» в основной своей массе состоит не из того же, что и вещи вокруг нас, и даже не из того, что звезды или более диковинные, но так или иначе видимые объекты.

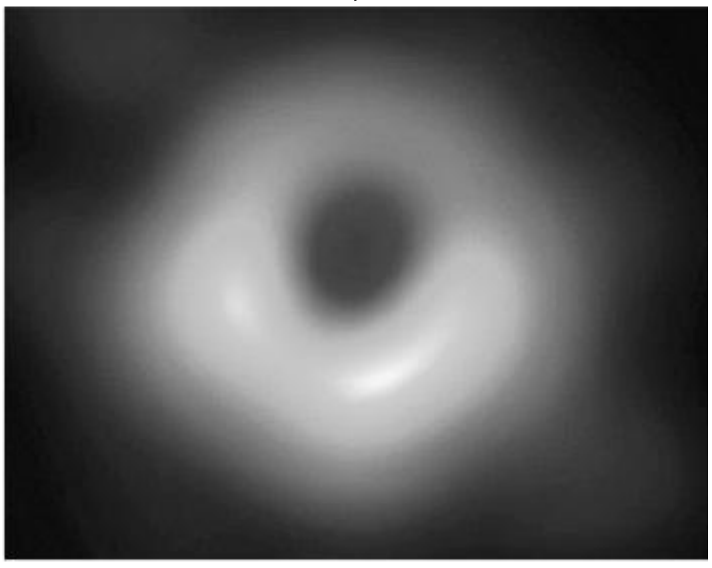


**Рис. 3.13.** «Фотография» гигантской черной дыры в центре галактики M87, полученная путем обработки результатов наблюдений с помощью системы синхро-низированных радиотелескопов

По крайней мере, мы так думаем, пытаясь объяснить движение того, что наблюдать можно и что мы научились наблюдать. Ключ к происходящему — галактики. Та материя, которую мы в состоянии видеть в телескопы (включая радио- и другие виды телескопов), не распределена во Вселенной равномерно, а собрана гравитацией в гигантские острова — галактики. В нашей галактике Млечный Путь находится Солнце; кроме него, там еще сотня (или несколько сотен) миллиардов звезд. Все это образование имеет плоскую форму (с разнообразными подробностями, которые мы опускаем) и в первом приближении представляет собой диск диаметром около 100 000 световых лет. Стоит представить себе, во сколько раз это больше Солнечной системы. Если провести границу Солнечной системы не там, где «Вояджер-1» недавно вышел из сферы доминирования солнечного ветра в спину и начал встречать галактический ветер в лицо, а взять, например, расстояние, на которое уходит от Солнца орбита транснептунового тела 2014 $FE_{72}$ — куда «Вояджеру-1» лететь еще 700 лет, — то Галактика окажется больше Солнечной системы примерно в миллион раз.

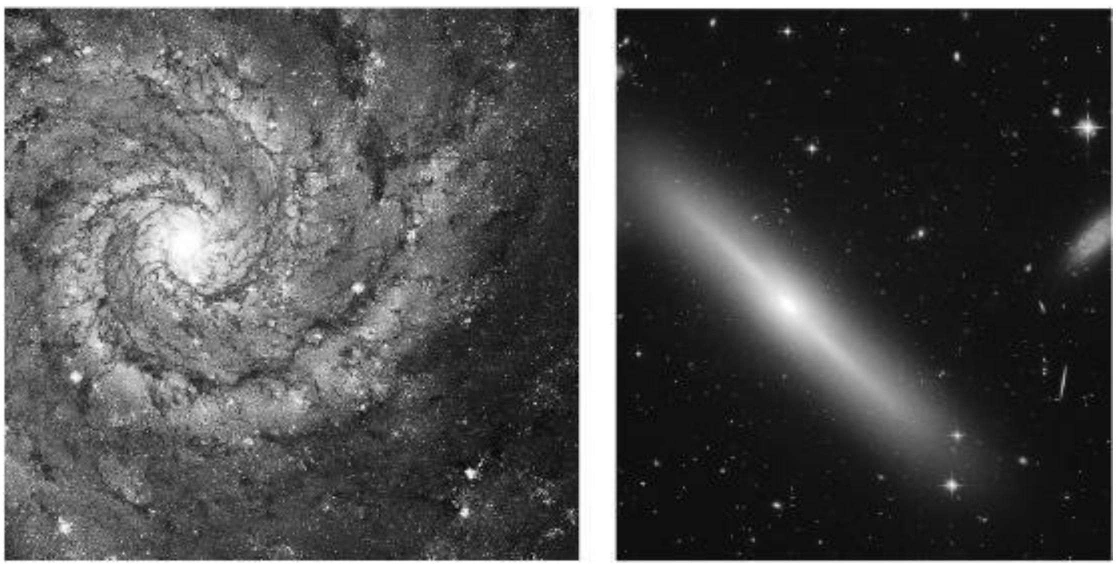


**Рис. 3.14.** Спиральная (Вертушка, она же NGC 5457, она же Мессье 101) и линзовидная (NGC 5308) галактики

Галактик много. Сравнительно близкая Андромеда находится от нас на расстоянии 2,5 млн световых лет, а одна из очень далеких — галактика MACS0647-JD — на расстоянии 13,3 млрд световых лет. Число галактик в наблюдаемой Вселенной оценивается в два триллиона (примерно десятая часть которых в принципе доступна наблюдению с помощью космического телескопа типа «Хаббл»). Среди галактик есть дисковые (их больше всего) — те, в которых в качестве основной структуры усматривается относительно плоский диск. Дисковые галактики не обязательно спиральные, как наша, бывают еще линзовидные (рис. 3.14). Но как бы то ни было, в дисковых галактиках звезды «организованным образом» обращаются вокруг центра масс всей галактики. С этим-то и проблема.

Как всегда, чтобы что-то обращалось вокруг центра, а не улетало прочь, требуется сила, направленная к центру. В космосе нет других вариантов для такой силы, кроме гравитации — в данном случае притяжения ко всему тому веществу (звездам и газу), которое в галактике имеется. Для какой-нибудь выбранной звезды или группы звезд притяжение «к центру» примерно обеспечивают все остальные звезды, находящиеся ближе к центру/оси вращения, чем данная звезда. Величина этой силы на разных расстояниях от центра определяется поэтому распределением вещества по галактике. Не сразу, но постепенно в течение XX в. появились средства измерения двух разных величин: скоростей, с которыми звезды участвуют во вращении, и количества вещества в галактиках на разных расстояниях от центра. Определяя их независимо, разумно проверить, всё ли сходится с законами Ньютона: действительно ли массы столько, что ее суммарного притяжения как раз хватает, чтобы поддерживать обращение с наблюдаемой скоростью. Результат: не сходится, причем сильно. Звезды движутся слишком быстро. Можно еще сказать, что наблюдается «нехватка гравитации»: ее недостаточно для поддержания наблюдаемого движения. И происходит это не в одной или нескольких галактиках, исследуемых на одном и том же телескопе (где могли бы закрасться какие-то систематические ошибки), а во множестве галактик. И не только внутри галактик: еще до того, как появилась возможность сопоставлять одно с другим внутри галактик, наблюдались слишком большие скорости самих галактик в скоплениях — слишком большие в том же смысле, что для поддержания такой скорости недостаточно видимого вещества. Движение в космосе упорно демонстрирует аномалию.

*Звезды в галактиках обращаются быстрее, чем это могут обеспечить видимые причины*

Со времен аномалии Урана наука стала более искушенной в оценке возможных способов разрешения таких ситуаций, но базисных вариантов все равно три: неправильные наблюдения, невидимые части мира, неправильная теория. Временно назовем эти варианты «ошибка», «нептун» и «меркурий». С «ошибкой» все понятно. В отношении обращения звезд вокруг центров галактик слишком много независимых данных говорит не просто о несоответствиях, но и о том, что они наблюдаются повсеместно, и возможную ошибку в *наблюдениях* уже несколько десятилетий едва ли кто обсуждает. Вариант «нептун» — это разрешение аномалии за счет угадывания того, какая часть или особенность мира, доселе невидимая или неизвестная, является ее причиной. В данном случае речь идет не об одной пропущенной планете в одной звездной системе, а о чем-то, проявляющем себя систематически и повсюду. Поэтому требуется угадать такое неизвестное, которое широко распространено, но — вот же чудо! — никак иначе себя не проявляет. Наконец, вариант «меркурий» — это признание неадекватности теории. Ведь в данном случае мы усматриваем несоответствие, не просто сравнивая наблюдения, одно из которых говорит, что предмет синий, а другое — что он красный; нет, сопоставляя наблюдения *разных* величин, мы опираемся на теоретическое знание о связи между ними. Что, если это знание требует уточнения?

Вообще-то, как уже было сказано мимоходом, на смену закону тяготения Ньютона пришла более общая схема — общая теория относительности. Но некоторая ирония состоит в том, что построенная там теория гравитации практически неотличима от ньютоновской для таких гравитационных полей, которые создаются совокупной массой галактики ближе к ее периферии, где и наблюдаются основные несоответствия. В тех физических условиях, которые применимы к обращению звезд в галактиках, закон гравитации Ньютона не подвергся сколько-нибудь значимому уточнению в рамках общей теории относительности. Если с теорией гравитации все-таки предстоит что-то сделать для разрешения проблемы со скоростями звезд в галактиках, то это будет заход с несколько иной стороны, чем общая теория относительности.

Выбор между двумя возможностями для приведения знаний в соответствие с наблюдениями — новая, неизвестная материя или модификация теории гравитации на больших расстояниях — не решен «окончательно окончательно», но все более склоняется в сторону неизвестной материи. С одной стороны, модификация теории гравитации оказалась делом сложным — и вообще сложным, и особенно сложным ввиду того, что в масштабе Солнечной системы, от Меркурия до облака Оорта, никакая починка имеющихся воззрений не требуется; наоборот, надо оставить все как есть, потому что там ничего не сломано — все работает очень хорошо. Улучшать же работающую теорию непросто, потому что делать это надо систематически (подправленная теория не может по нашему выбору действовать в этих двух галактиках и не действовать в трех других), но при этом нельзя испортить колоссальное число случаев, где никакого улучшения не требуется [54]. С другой стороны, свидетельства в пользу неизвестной материи изобильны. С этой гипотетической материей имеется, по существу, только одна, но зато серьезная проблема: она должна из чего-то состоять и это что-то должно быть обнаружено напрямую — не по косвенным данным обо всех наблюдаемых аномалиях, а примерно так, как обнаруживают элементарные частицы, рождающиеся в ускорителях или космических лучах. Этого сделать пока не удается. Мы продолжаем считать, что эта неизвестная материя сложена из принципиально иных типов элементарных частиц, чем все нам известные.

### *Темная материя отделена от света*

Она получила название «темная материя» — не самое удачное, но тут уж ничего не поделаешь. Смысл названия не в том, что она «имеет черный цвет», а в том, что эта материя (если угодно, *вещество*) не взаимодействует со светом. Она не поглощает и не излучает (и тем самым не отражает) свет. Скорее можно было бы назвать ее «прозрачной», хотя о прозрачном на бытовом уровне мы думаем как о чем-то, что в целом *видно*, но хорошо пропускает свет. Впрочем, я подозреваю, что многие хоть раз наталкивались на стеклянную дверь или стену; но на темную материю и натолкнуться нельзя, потому что твердость твердых тел вокруг нас имеет электромагнитную природу, а как раз в электромагнитном взаимодействии темная материя не участвует. Темная материя полностью «отвязана» от света — ее ни в каком смысле, кроме гравитационного, не «видно» и не «ощущается». Слегка парадоксально, но ближайший пример чего-то хорошо известного, что ведет себя похожим образом, — это сам свет. Два луча света проходят один сквозь другой *не взаимодействуя* (если не рассматривать случаи колоссальной интенсивности, которые все-таки представляют собой некоторую экзотику). Нельзя посветить прожектором и по отраженному или поглощенному свету узнать, что луч по дороге пересек *луч* другого прожектора или, скажем, радиоволну. В точности та же ситуация —

никакого отклика — имеет место, если вместо луча второго прожектора в пространстве находится темная материя.

Кстати, что она делает, когда где-то «находится»? Только что приведенную аналогию со светом (смысл которой был в отсутствии взаимодействия) не надо воспринимать буквально: частицы темной материи *не* летают как свет. Судя по ряду косвенных данных, их скорости (относительно видимого вещества) сравнительно невелики. На своем жаргоне физики выражают это словом «холодная». Именно модель эволюции Вселенной, в которой с очень ранних пор имеется холодная темная материя, лучше всего объясняет, как происходило развитие от плотной горячей расширяющейся Вселенной (Большой взрыв) к современному состоянию. «Холодная» — это жаргон в квадрате, потому что темная материя, по всей видимости, как раз лишена возможности остывать. Когда облака обычного газа в космосе нагреваются — скажем, от гравитационного сжатия или внутреннего трения, — они могут остывать, излучая свет (электромагнитные волны), буквально как любая железка, которую вы захотите нагреть *докрасна* или даже *добела* на огне. Материя, оказавшаяся достаточно близко к черной дыре, разогревается за счет трения и светится (рис. 3.13 — это картина радиоволн, испущенных такой нагретой материей). Но то обычная материя. Темная же материя, по-видимому, лишена возможности тереться сама о себя и соединяться в какие-либо структуры, потому что все эти процессы основаны на взаимодействиях, в которых она не участвует. Заодно с «отвязанностью» от электромагнитных волн/света она, скорее всего, лишена и сколько-нибудь значимого взаимодействия сама с собой — кроме, разумеется, гравитационного. Темная материя — это облака проходящих друг через друга частиц, собранных вместе собственным притяжением. Частицы долетают до периферии облака, пока его общая гравитация не возвращает их обратно. Картина получается малоинтересной для нас, избалованных разнообразным структурированием материи (протоны и нейтроны, атомные ядра, атомы и бесчисленные их соединения), но, как выясняется, она совершенно необходима для существования структур, милых нашему глазу. Каждая (почти каждая) галактика, светящаяся в оптическом, и/или радио-, и/или рентгеновском диапазоне, окружена сферическим «облаком» примерно в десять раз большего размера, состоящим из темной материи. Это облако обеспечивает притяжение, позволяющее звездам в галактиках обращаться вокруг центра с должной быстротой. Оно называется *гало* темной материи. Для ряда галактик даже удается экспериментально определить форму гало, например степень его эллиптичности. Гало изображено на рис. 3.15; я хочу подчеркнуть, что этот рисунок по смыслу (и, само собой, по предмету) существенно отличается от рис. 3.13: там невидимое глазом восстановлено по результатам (радио)наблюдений, здесь же изображено то, чего нельзя увидеть в принципе ни радио-, ни оптическим, ни рентгеновским телескопом (а то, что можно увидеть, — светлое вещество галактики, наоборот, показано лишь условно).

### *Организация темной материи определяется движением и гравитацией*

Изменение наших взглядов на состав Вселенной оказалось вполне драматическим: основными элементами, из которых «собрана» наблюдаемая Вселенная, являются не видимые галактики — космические острова из гигантского числа протонов, нейтронов и электронов в виде звезд или газа, а именно гало темной и, по-видимому, бесструктурной материи, подчиняющейся только одному — гравитации. Когда мы говорим о предстоящем столкновении Млечного Пути и Андромеды, и не просто говорим, а пытаемся моделировать процесс этого столкновения, мы, конечно, принимаем в расчет темную материю, которая движется вместе с каждой из галактик. Еще правильнее постепенно привыкать высказываться так, чтобы сначала называть главное: это два скопления темной материи движутся навстречу друг другу, прихватив с собой немного видимого вещества; по этому последнему мы и определяем скорость любой галактики относительно нашей.

Существенная поддержка идеи о наличии темной материи пришла из нашего понимания эволюции Вселенной. Как и всё во Вселенной, галактики существовали не всегда, а собрались под действием притяжения — по сути, собственного притяжения: случавшиеся неоднородности в виде скоплений вещества притягивали к себе больше вещества, отчего притягивали сильнее и т.д. Увы — или, наоборот, не увы, — моделирование такого процесса не очень согласуется с наблюдаемой картиной: для собирания обычной, светлой материи в галактики просто недостаточно времени, прошедшего после Большого взрыва. Для того чтобы за отведенный срок галактики успели собраться примерно так, как это наблюдается, необходима «лишняя» материя в дополнение к той, которую мы тем или иным образом видим. Более того, чтобы «уложиться в график», эта дополнительная материя должна начать гравитационное «кучкование» еще до того, как видимую материю перестало распирать высокое давление (как удачно, что темную материю ничто не распирает!). Обычная материя затем «падает» в гравитационные ямы, уже подготовленные темной материей, — собирается к центрам притяжения, заодно дополнительно усиливая их притяжение.

**Рис. 3.15.** Гало темной материи в видении художника. Более ярким показано ожидаемое распределение темной материи, а в центре для масштаба условно изображена «светлая», видимая часть галактики

### *Без темной материи не успели бы сформироваться галактики*

И это еще не все. Не только вещество (как мы только что выяснили: видимое *и* невидимое) не распределено во Вселенной равномерно, а собрано в галактики, но и галактики не распределены равномерно: *скопления галактик* собраны в «нити» длиной в несколько сотен миллионов световых лет. Их разделяют самые уединенные места во Вселенной — гигантские пустоты, где почти нет галактик. Нити (красивее звучит калька с английского «филаменты») — это факт наблюдательной астрономии [55], но их образование неплохо моделируется в рамках имеющихся представлений о холодной темной материи. Наши идеи об организации Вселенной на самых больших масштабах представлены на рис. 3.16, и темная материя играет определяющую роль в формировании изображенной там структуры. Если все же окажется, что причина немалого числа явлений, указывающих на наличие темной материи, — *не* какая-то неизвестная материя, то я бы ожидал сопутствующую этому радикальную смену парадигмы (научную революцию, сравнимую с появлением специальной и общей теории относительности). Обычно такие изменения в фундаменте нашего понимания природы начинаются откуда-то «сбоку». Но в любом случае эта история погружения в глубину мира (вот уж буквально в *невидимое*) началась с наблюдения за движением.

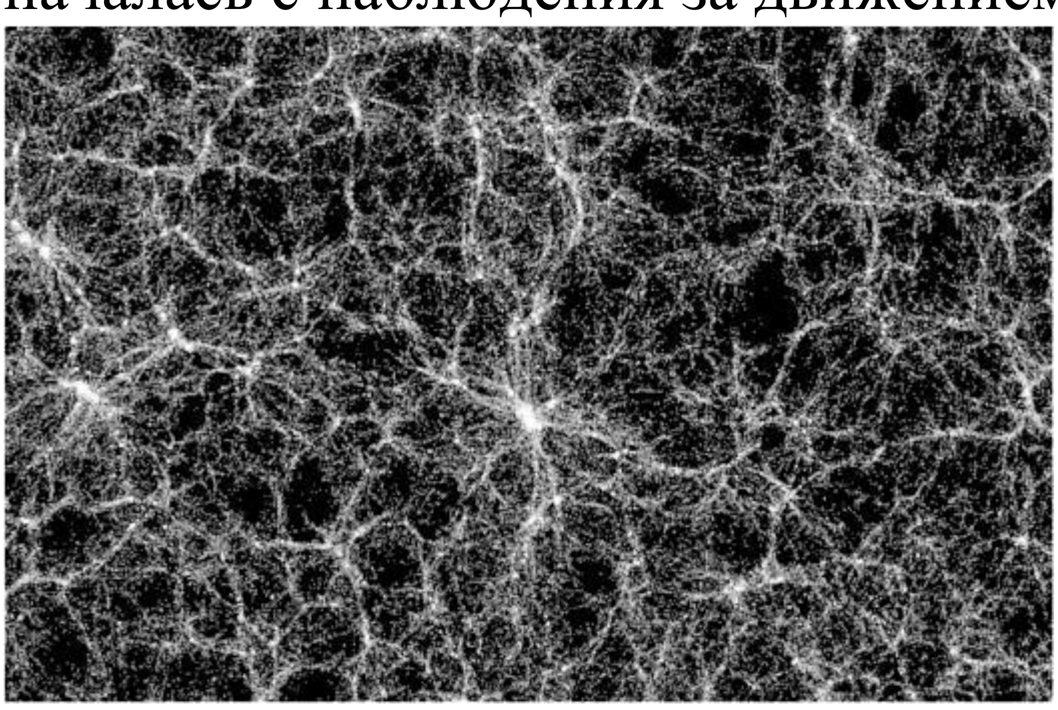


**Рис. 3.16.** Крупно-масштабную структуру Вселенной определяют гигантские, составленные в первую очередь из темной материи нити, которые видны благодаря светлому веществу скапливающихся там

галактик

## Добавления к прогулке 3

**Кеплер и вселенные.** Сейчас мы знаем, что «четвертого закона Кеплера», который определял бы *размеры* орбит планет в Солнечной системе, не просто нет, но и быть не может. Но Кеплер встретился лицом к лицу с Солнечной системой в тот момент, когда не вполне ясны были сами правила игры: какие из наблюдаемых свойств мира непосредственно отражают первопринципы и потому подлежат угадыванию, а какие нет? Успехи человечества в поиске законов природы опираются среди прочего на способность людей видеть закономерности даже там, где их нет; иначе не найти те, которые есть. Кеплер пытался протянуть нить от математики к известному ему миру, начав с пяти правильных многогранников (рис. 3.17). Взятые в каком-то порядке и вписанные между шестью сферами, они задают относительные радиусы этих сфер по неоспоримым, неотменяемым математическим причинам (см. рис. 3.2). Не проявляют ли себя эти же причины — некоторая математическая гармония, находящая свое выражение в существовании Пяти платоновых тел, — в орбитах Шести планет?

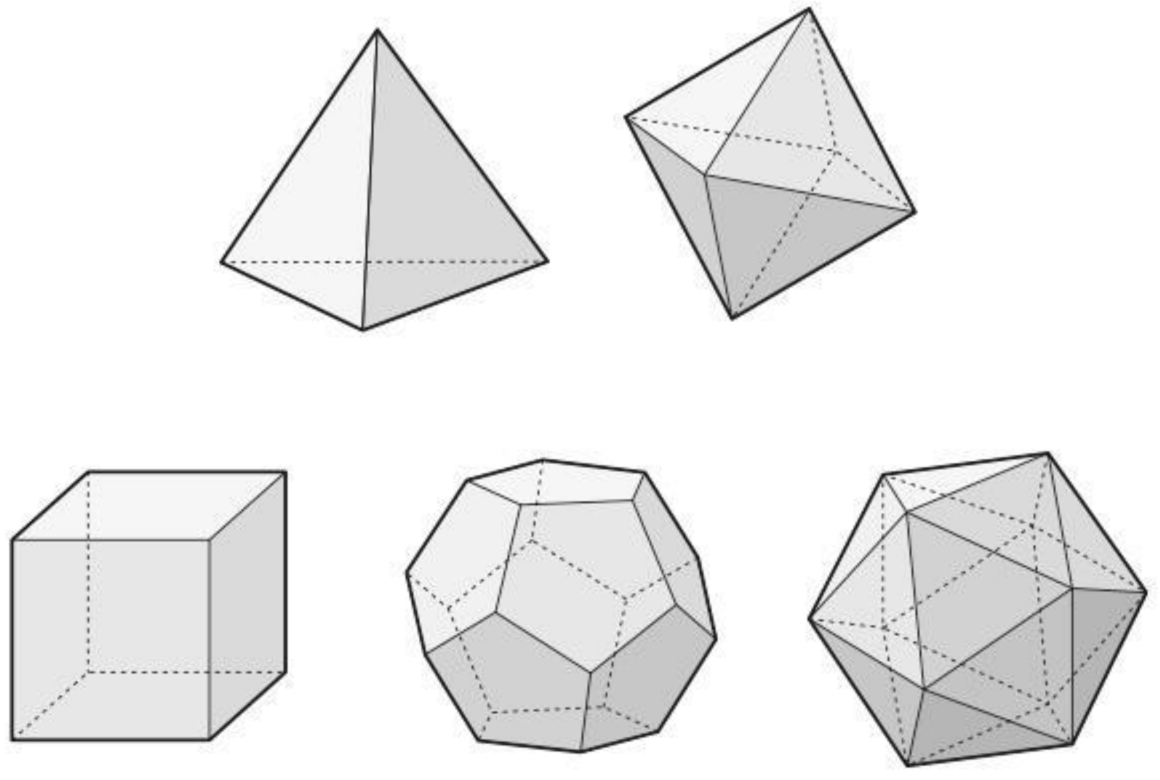


**Рис. 3.17.** Платоновы тела — правильные многогранники в трехмерном пространстве. Их только пять (изображены в порядке, соответствующем вычерчиванию буквы М): куб, тетраэдр, додекаэдр, октаэдр и икосаэдр. Это неизменяемый факт. Во времена Кеплера планет было шесть, но то

была лишь неполнота знания

В действительности конкретные расстояния от планет до Солнца и соотношения между этими расстояниями не определяются напрямую фундаментальными принципами, а устанавливаются под действием многих случайных факторов в ходе эволюции планетной системы. Со времен Кеплера довольно сильно сместилась граница между «проявлением фундаментальных первопринципов» и (в том или ином варианте) «игрой случайностей». Сейчас она проходит в нескольких местах, одним из которых стал вопрос, почему мировые константы — скорость света (см. главу «прогулка 5»), постоянная Планка (см. главу «прогулка 9»), гравитационная постоянная (см. главу «прогулка 1»), заряд электрона и другие — именно таковы, а массы элементарных частиц в точности такие, как наблюдаются (этот вопрос «слегка некорректен» в отношении *размерных* величин, вроде только что перечисленных, но никак уже нельзя придраться к постановке того же вопроса про их безразмерные комбинации). Существует ли математика — посложнее платоновых тел, но в некотором роде такая же, — которая могла бы их фиксировать? Или их значения — дело случая в том смысле, что они как-то распределены по очень большому числу разных вселенных, а мы просто возникли в одной из них? Напрашивается параллель с временами Кеплера: пока познание было заперто в пределах одной планетной системы, а действующие в ней механизмы причин и следствий были неясны, все ее отличительные черты можно было принимать за единственно возможные. Однако взгляд «наружу» (как и взгляд «вглубь», в причины и следствия) быстро показывает, что детали каждой из планетных систем достаточно случайны и не могут однозначно определяться фундаментальными законами природы. Но эта аналогия небезобидна, ведь мы заперты внутри одной-единственной вселенной, и способов выглянуть из нее наружу и познакомиться с другими вселенными не просматривается. Аргументы, вовлекающие другие вселенные, при всей своей способности будоражить воображение, опасно близки к традиционно понимаемым границам науки, которая имеет дело с тем, что воспроизводимо, и выводы которой должны допускать принципиальную возможность опровержения при столкновении с наблюдениями. За неимением взгляда «наружу» остается взгляд «вглубь», в теоретические построения по поводу *самых* фундаментальных механизмов, но состояние наших знаний на данный момент не позволяет прийти к сколько-нибудь однозначным выводам; интерпретации теоретических схем неизбежно смешиваются тут с некоторым философским выбором.

**Орбиты-подковы.** Механизм обмена количеством движения, который с завидным постоянством демонстрируют Янус и Эпиметей, должен был проявлять себя в молодой Солнечной системе, пусть и не с установившейся регулярностью, но в ситуациях иного масштаба и с намного более серьезными последствиями: большие планеты могли исходно сформироваться не на тех орбитах, которые они занимают сейчас, а потом *мигрировать*, обмениваясь количеством движения. Для небесных тел сравнимой массы изменения их орбит при этом взаимны; но если подобное происходит с двумя телами, одно из которых массивное, а другое — очень легкое, то вся «суета» выпадает на долю легкого.

Наша собственная планета, например, управляется своей гравитацией с несколькими астероидами, заставляя их менять орбиту. Происходящее иногда описывают словами «подковообразная орбита»; такая орбита показана на рис. 3.18. Хотя орбита такого астероида, очевидно, некеплерова, из рисунка ни в коем случае не следует заключать, что он летает вокруг Солнца «то вперед, то назад», реально описывая контур подковы. Всю картину надо рассматривать так же, как рис. 2.4: она *вращается* против часовой стрелки вокруг Солнца. Астероид догоняет Землю, находясь на орбите меньшего радиуса вокруг Солнца, и в точке A притяжение Земли делается существенным, из-за чего, как мы уже не раз обсуждали, астероид переходит (B) на более далекую от Солнца орбиту (C) и замедляется. При этом, конечно, он продолжает вращение вокруг Солнца и никогда не движется буквально в радиальном направлении А – С: радиальным это направление выглядит только с точки зрения астронома на Земле, в действительности же, пока астероид добирался из А в С, вся картинка повернулась как целое и астероид вместе с Землей пролетел заметный участок орбиты вокруг Солнца. Выбравшись на более далекую орбиту, астероид начинает отставать от Земли: оба продолжают, разумеется, вращаться вокруг Солнца, но астроном на Земле видит, что астероид удаляется от него, пройдя точку С и отставая все сильнее: его расстояние от Земли увеличивается, что с точки зрения астронома выглядит как возвратное движение по подкове. Это удаление от Земли происходит медленно, потому что оно определяется *разностью* двух скоростей, и оба тела успеют сделать немало оборотов вокруг Солнца (другими словами, успевает пройти много лет), пока астероид отстанет на почти полный оборот. Астроном на Земле (или, скорее, его внук) обнаружит астероид в точке D, начиная откуда события будут развиваться противоположно тому, как это описано в мемуарах деда: Земля, в действительности догоняя астероид, тянет его к себе, отчего тот переходит на более близкую к Солнцу и более быструю орбиту и, пройдя точку Е, получает прибавку в скорости и начинает удаляться от Земли. Скорость удаления — это снова разность скоростей астероида и Земли. Обгоняя Землю в ее движении, астероид в конце концов обгонит ее почти на целый оборот, сменившиеся поколения астрономов обнаружат его в точке А относительно Земли, и история повторится.

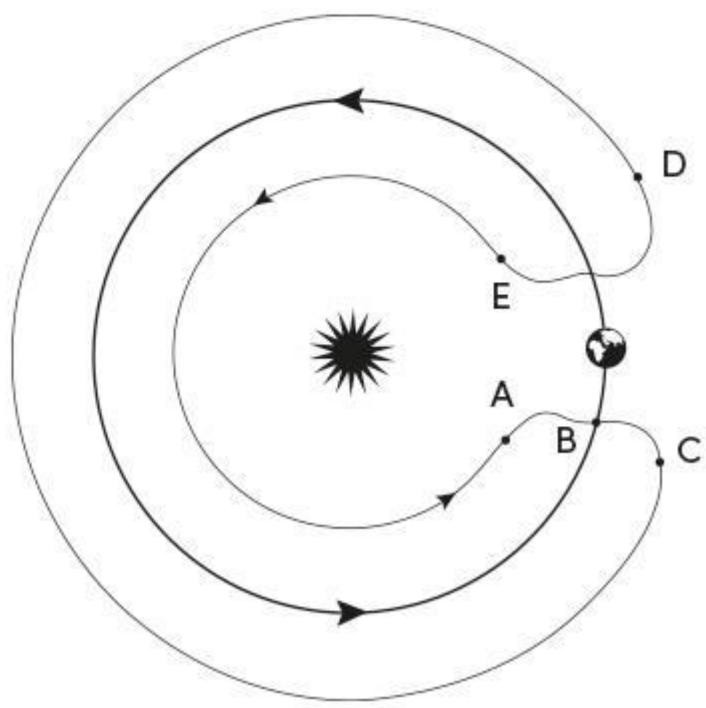


**Рис. 3.18.** Подковообразная орбита астероида. Такой она выглядит для астронома с Земли, который решил считать себя неподвижным. Вычерчивание астероидом всей подковы может занять пару сотен лет. Параметры подковы показаны с огромным преувеличением по сравнению с расстоянием от Солнца до Земли: в действитель-ности внутренний и внешний радиусы подковы различаются на несколько тысячных долей радиуса земной орбиты

### *Подкова описывает переходы между более внешней и более внутренней орбитами*

Подобное движение может оказаться более сложным, если орбита астероида наклонена по отношению к плоскости орбиты Земли и/или если эллипс, по которому пытается лететь астероид, пока в дело не вмешивается Земля, более вытянут, чем (почти круговая) орбита Земли; движение определенно оказывается более сложным из-за притяжения Венеры, ведь значительную часть времени астероид находится далеко от Земли, предоставляя соседней планете все возможности влиять на себя настолько, насколько она дотянется своей гравитацией. В результате тела на подобных орбитах могут демонстрировать поведение, которое сочетает несколько элементов и в целом оказывается не очень устойчивым: пробыв на «подкове» какое-то время, астероид может перестать исполнять этот танец. Выявление же небесных тел, реально движущихся подобным образом, — непростая задача, не только наблюдательная, но и вычислительная: не желая ждать пару сотен лет, пока какое-то тело без спешки догонит (или не догонит) Землю на орбите, а потом начнет (или не начнет) отставать, мы просим компьютер узнать, как же будут развиваться события, предварительно сообщив ему (компьютеру) все подробности, которые нам самим известны о ключевых участниках событий. Но для успеха ньютоново-компьютерных предсказаний требуется не только учет притяжения Венеры или даже Марса и Юпитера, но и точные измерения дуги текущей траектории, по которой движется тот или иной астероид. Тел, движущихся по орбитам, близким к земной, известно около двух десятков. Например, астероид 2015

$XX_{169}$ (камень с поперечником едва ли в 20 метров) после своего максимального сближения с Землей в декабре 2015 г. в течение не менее одного года менял свою орбиту в сторону увеличения и собирается совершить обратный переход примерно через 130 лет — *неспешная* манера рисовать подкову. Заниматься этим он будет, скорее всего, еще несколько тысяч лет. Этот астероид, собственно говоря, «не может определиться» между двумя классами орбитального поведения близких к Земле тел, пересекающих орбиту Земли. Сейчас он переходит в класс тех, чьи орбиты имеют большую полуось, несколько превосходящую земную, но, наоборот, подходят ближе к Солнцу, чем Земля, в точке максимального приближения. Представителем этого класса *было* и тело, ставшее челябинским метеоритом 15 февраля 2013 г.

**Пояс Койпера и мифология.** Первый открытый транснептуновый объект, не считая Плутона и Харона, долгое время фигурировал под рабочим названием 1992 $QB_1$, которое присвоили ему первооткрыватели (энтузиаст исследования занептунщины Дэвид Джуитт и его аспирантка Джейн Лу, работавшие в Обсерватории Мауна-Кеа на Гавайях). Та часть имени, которая идет после года открытия, читается примерно как «кьюбиван»; нерезонансные транснептуновые объекты иногда называют «кьюбивано» (мн. ч.) — *cubiwano*, что несколько созвучно с Оби-Ваном (Кеноби). Большинство идентифицированных транснептуновых тел фигурируют под обозначениями типа 2002 $TX_{300}$, которые ближе к СЗРО, чем к «настоящему» имени, но некоторые получают и полноценные имена, такие как Хаумеа. Для нерезонансных объектов из пояса Койпера по быстро установившейся традиции имена стали заимствоваться из мифологии коренных народов; например, Квавар (первоначально известный как 2002 $LM_{60}$) — это бог-творец мира у народа тонгва, исходно обитавшего в районе современного Лос-Анджелеса; Хаумеа происходит из гавайской мифологии, Макемаке — с острова Пасхи. Первый кьюбиван 1992 $QB_1$ получил также название Альбион по имени изначального (!) человека в мифологии Уильяма Блейка. Все время хочется проделать параллельный экскурс в этнографию. Это упражнение можно превратить в совсем сумасшедшее, если попробовать связать общим сюжетом богов самых разных народов — с довольно разными, наверное, характерами и историями деяний, — руководствуясь тем, что они летают где-то по соседству друг с другом. Троянцы и греки поблекнут.

## Признания и литературные комментарии

Видимая материя во Вселенной, в противовес темной, называется барионной, что несколько неуклюже напоминает о том, что ее массу почти целиком составляют протоны и нейтроны. Написание фамилии Эйри, а не чуть более приближенное к английскому звучанию Эри отражает мое воспитание: «функция Эйри» Ai постоянно на слуху. Впрочем, редакторам русского перевода книги [19] точно такая же осведомленность о функции Ai не помешала проявить принципиальность, и у них везде [сэр Джордж] Эри. После системы звезды TRAPPIST-1 был найден еще один замечательный пример резонансных орбит: пять из шести планет TOI-178 движутся в резонансе 12 : 9 : 6 : 4 : 2 [86] (это, кстати, одно из дополнений, сделанных научным редактором Владимиром Сурдиным, который заодно решительно не одобряет моего «Эйри»). Взаимоотношения Януса и Эпиметея обсуждались в статье [104], а Талассы и Наяды — в [48]. Астероид 2015 $XX_{169}$, орбита которого близка к орбите Земли, описан вместе с двумя другими астероидами в [73]. Рисунок 3.15 взят с сайта https://medium.com/starts-with-a-bang/dark-matter-rises-to-its-biggest-challenge-6aa4991572f6, где он приведен со ссылкой на NASA, ESA, T. Brown and J. Tumlinson (STScI). Уникальный набор резонансов, установившихся среди планет TRAPPIST-1, положен на музыку, которую можно услышать здесь: https://youtu.be/WS5UxLHbUKc (а на сайте https://system-sounds.com можно найти музыкальные интерпретации и других частей Вселенной). Схема на рис. 3.4 позаимствована из [44]. Из той же работы взято замечание о массе и периоде обращения Вулкана, на которые мог бы указывать поворот перигелия Меркурия.

Наблюдательные данные о прецессии перигелия Меркурия, приведенные в [58], показывают, что полный эффект составляет 574,10″ ± 0,65″ (угловых секунд) в столетие. Из них 532,3035″ и в самом деле удается объяснить влиянием других планет, 0,0286″ — несферичностью Солнца и небольшие –0,0020″, как известно сейчас, но не в XIX в., — эффектами специальной теории относительности. Не хватает упрямых 43 угловых секунд (42,9799″). Они и описываются теоретическим выражением, которое нельзя вывести из ньютоновской теории (см., например, [4], где не только приведен вывод, но и обсуждаются разнообразные сопутствующие аспекты): за один оборот планеты ее эллипс поворачивается на

$$360^\circ \frac{v^2}{c^2}\frac{3}{(1+\varepsilon)^2}.$$

Здесь *v* — скорость планеты в точке максимального приближения к Солнцу, *c* — скорость света, а ε — эксцентриситет орбиты, равный для Меркурия 0,2056. Числовая дробь (третий множитель) поэтому равна 2,064. Скорость *v* составляет 58,98 км/с, так что отношение скоростей в квадрате дает не очень большое число $3{,}87 \times 10^{-8}$. Чтобы найти поворот орбиты за один земной год, надо еще умножить все выражение на 4,15 — отношение периодов обращения Земли и Меркурия. Когда Эйнштейн получил из теории в точности ту поправку, которой и не хватало, он, по его собственным словам, «несколько дней был вне себя от восторга».

## Движение на прогулке 3

Движение видимых частей Вселенной — способ систематического получения информации о невидимых и неизвестных частях. Планета Нептун в Солнечной системе была предсказана, а затем открыта в середине XIX в. исходя из аномалий в движении известной планеты — Урана. В XXI в. планеты у других звезд открывают по наблюдаемому движению самой звезды, вызванному существованием планет; из этого движения иногда удается узнать даже о существовании планет, похожих на Землю.

Обращение звезд вокруг центра масс своих галактик во множестве случаев оказалось аномально быстрым для наблюдаемого в этих же галактиках количества вещества, притяжение которого должно обеспечивать движение звезд. Наблюдения такого рода привели к идее о существовании во Вселенной невидимого вещества (темной материи) в количестве, в несколько раз превышающем количество известной материи. Предположительные гало темной материи в несколько раз превосходят по размерам видимую часть галактик и образованы частицами, связанными между собой только гравитационно. Прямое обнаружение частиц, из которых состоит темная материя, или какой-либо другой способ разрешения загадки вращения звезд в галактиках — один из современных вызовов, стоящих перед наукой о Вселенной.

Планеты, карликовые планеты, астероиды и кометы, движущиеся вокруг Солнца, испытывают воздействие наиболее массивных участников этого движения. Из-за этого возникают регулярности в организации ряда орбит: они оказываются в резонансе друг с другом, т.е. периоды обращения по ним соотносятся как целые числа. Резонансы возникают и в орбитах ряда спутников больших планет; спутники, кроме того, могут периодически «обмениваться» орбитами. Резонансы в организации планетных систем обнаруживаются и у других звезд. Набор регулярностей (корреляций) в орбитах, по которым движутся некоторые транснептуновые тела в Солнечной системе, весьма вероятно, служит указанием на ранее никак не предполагавшееся существование Планеты 9, движущейся по неожиданно далекой от Солнца орбите.

## Прогулка 4

# Прочь от Кеплера: размер, форма и беспорядок

**Маршрут:** *Ничто не идеально. — Размер имеет значение. — От прилива до разрыва. — Движение откликается на форму.*

*— Спасение эллипсов поцелуями. — Борьба всех со всеми. — Драма для троих.*

**Главный герой:** *приливы*

---

**Ничто не идеально.** Окружности, сферы и шары — идеальные формы идеальных, как когда-то считалось, небес; Кеплер заменил окружности эллипсами, а Ньютон подтвердил вычислениями, что Кеплер угадал все правильно. Но и для Ньютона сферы и шары оказались важными. До сих пор, не всегда произнося это вслух, мы предполагали, что все небесные тела идеально круглые: имеют форму шара или же находятся настолько далеко друг от друга, что их можно считать точками. Именно тогда для одинокой планеты в качестве траекторий движения получаются математически строгие эллипсы (а сама постановка вопроса, как мы уже отмечали, называется задачей Кеплера). В действительности же движение под действием притяжения больших и неровных тел, как и движение крупных тел под действием притяжения любых других, — уже не вечная и идеальная «музыка эллипсов», а меняющийся мир довольно жестких реалий. Земля не идеальный шар, и, хотя на больших расстояниях от нее на это можно не обращать большого внимания, нарушения сферичности заметно проявляют себя в самом ближнем космосе — как раз там, где через два с лишним века после смерти Ньютона в избытке появились разнообразные летающие объекты. Реальная орбита искусственного спутника Земли имеет вид вроде показанного на рис. 4.1. Приходится признать, что это не сильно похоже на эллипс. *Форма* имеет значение — и в данном случае форма Земли разрушает кеплеровы эллипсы. Но это еще не все. *Размер* тоже имеет значение — но не для той стороны, которая действует, а для той, которая *подвергается* действию притяжения. Этот факт имеет два хорошо известных проявления, заметных невооруженным взглядом на берегу океана и при прогулках по Луне.

С размера и начнем.

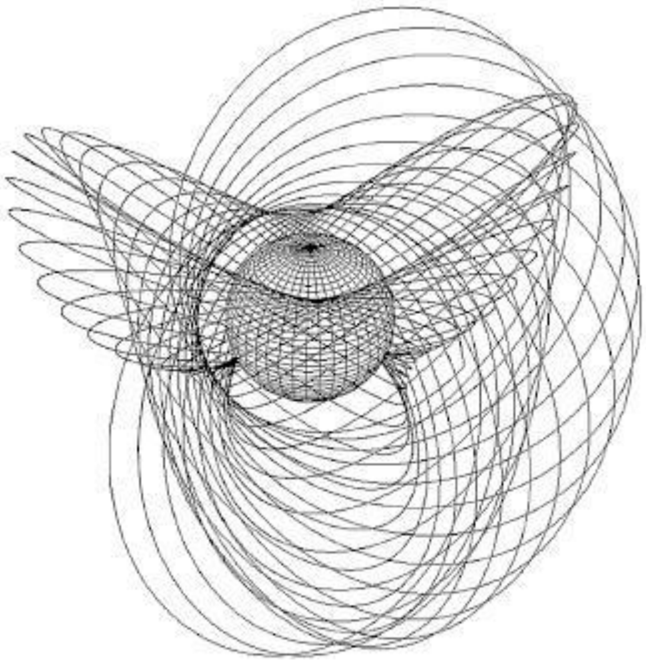


**Рис. 4.1.** Типичная орбита спутника (для наглядности расстояния между соседними витками сильно преувеличены). И где здесь Кеплер?

*****

**Размер имеет значение.** В лунном небе Земля не восходит и не заходит — висит над путником, гуляющим по Луне, постоянно в одном и том же месте. В качестве компенсации, правда, смотреть на нее не скучно, потому что она вращается вокруг своей оси. Если вы находитесь на Луне, Земля для вас делает полный оборот вокруг своей оси за 24 часа 50 минут, так что вы можете разглядеть ее всю, если вам хватит терпения, тепла и кислорода (и не забудьте запастись всем этим на «лишние» 50 минут). Для вашего удобства она «застыла» неподвижно в одной точке неба. К такому положению вещей вообще-то *все давно привыкли* — но только наблюдая его с противоположного конца: в земном небе Луна видна всегда повернутой одной стороной [56]. Эта кажущаяся неподвижность — «застывшая» Земля и «не поворачивающаяся» Луна — есть результат *движения* в «гравитационных объятиях». Сила таких объятий занятным образом зависит от (массы обнимающего и) размера *обнимаемого*. И объятия взаимны; на Земле они проявляют себя в виде приливов.

Взаимность начинается с взаимности обращения: Земля и Луна, как мы говорили в главе «прогулка 2», движутся вокруг общего центра масс; центр Земли при этом описывает окружность (эллипс, очень близкий к окружности) радиусом около 4600 км. (Полный оборот занимает примерно лунный месяц; это движение никак не связано с вращением Земли вокруг своей оси, про которое временно можно даже забыть.) Но для движения по окружности требуется постоянно тянуть то, что движется, к центру — иначе улетит прочь. Землю и все, что на ней, в данном случае тянет, конечно, Луна. Притяжение Луны сообщает *ускорение* каждому камню, каждой песчинке и каждой капле воды — всему, что есть на Земле, причем точно такое же ускорение, как если бы камень, песчинка и капля падали на Луну. Падения в буквальном смысле не происходит именно из-за взаимного обращения Луны и Земли; с учетом притяжения самой Земли как раз и получается движение вокруг общего центра масс, но нам сейчас важны подробности того, как действует именно притяжение Луны. Если бы Земля была размером с автомобиль или даже астероид, дальше рассказывать было бы нечего, потому что предмет такого размера притягивается Луной как единое целое. Однако Земля довольно большая и из-за этого притягивается к Луне уже не совсем как единое целое: становится заметным, что разные части Земли находятся на различном удалении от Луны. Ньютонов закон тяготения (1.1) — правило «обратных квадратов» — сообщает нам, что камень, лежащий на ближней к Луне стороне Земли, притягивается с силой примерно на 3,4% большей, чем притягивается «камень» той же массы в центре Земли, а на дальней от Луны стороне Земли такой же камень притягивается к Луне с силой почти настолько же (на 3,2%) меньшей, чем в центре.

Эти проценты берутся от силы, которая и сама по себе не слишком велика: в среднем лунное притяжение, ощущаемое на поверхности Земли, примерно в 300 000 раз слабее земного: во столько же раз ускорение в направлении Луны меньше земного ускорения свободного падения $g$ — того самого, которое делает нежелательными прыжки даже со второго этажа, да и подпрыгнуть вверх сколько-нибудь серьезно не позволяет. В действительности влияние Луны на зрелищность прыжков даже еще слабее: когда вы находитесь на Земле и видите Луну у себя над головой, ее вклад в ваш отрыв от поверхности при подпрыгивании определяется *разницей* в ускорениях, которые Луна сообщает лично вам и центру Земли (Луна норовит оттащить вас подальше от центра Земли). Аналогичная картина имеет место и в том случае, когда вы тренируетесь на противоположной от Луны стороне Земли: там ваше личное ускорение в направлении Луны меньше, чем ускорение центра Земли в том же направлении, и вам тоже *немного* легче подпрыгивать (центр Земли норовит «уйти к Луне» из-под ваших ног). Ни в том ни в другом случае, однако, у вас нет шансов это почувствовать: чтобы найти разницу между ускорениями, надо взять те самые три с небольшим процента от одной трехсоттысячной, что дает эффект «облегчения» на одну десятимиллионную долю (а одна десятимиллионная от веса человека — это сотая доля грамма; пылинка на одежде может весить больше). Мы не становимся сколько-нибудь *заметно* легче ни в лунные, ни в полностью безлунные ночи.

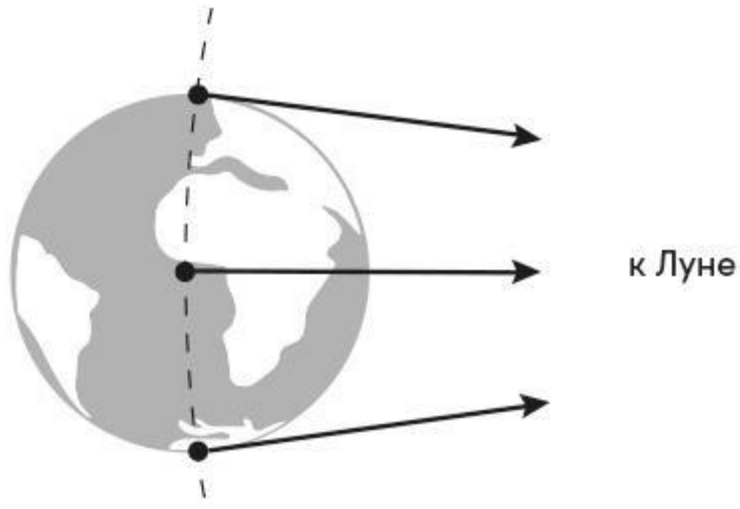



**Рис. 4.2.** Направления на Луну различаются в различных точках на поверхности Земли

Но это не конец истории: Земля достаточно большая еще и для того, чтобы направления на Луну не совпадали в различных точках земной поверхности. До сих пор мы пытались подпрыгивать в подлунной точке и в противоположной ей, «антилунной» точке; силы притяжения к Луне там различаются по величине, но не по направлению. Однако и направления, под которыми Луна видна из различных точек земной поверхности, различаются — сильнее всего для точек на «ободе», проходящем посередине между подлунной и антилунной точками. На рис. 4.2 показаны две такие точки; направление на Луну в каждой из них — не строго «вбок», по касательной к поверхности; оно имеет и небольшую (чуть более полутора процентов) составляющую, направленную внутрь Земли, вдоль радиуса. Из-за этого разбросанные там камни дополнительно прижаты к поверхности Земли — на величину даже меньшую одной десятимиллионной номинальной силы земного притяжения.

### *В разных частях Земли притяжение Луны различно и по величине, и по направлению*

Итак, кроме того, что с подлунной и антилунной сторон имеется эффект «облегчения», посередине между ними возникает эффект «прижимания» к поверхности. Оба — ничтожные, но погодите буквально минуту. Самое главное происходит в переходных областях, где дополнительное «лунное» ускорение, которое получают тела на земной поверхности относительно центра Земли, меняет свое направление с «к центру» на «от центра» (рис. 4.3). На значительном участке земной поверхности камни, песчинки и капли воды испытывают ускорение почти *вдоль* поверхности — появляется нечто вроде эффекта «поглаживания». Оно очень слабое и не имеет никакого значения ни для отдельного камня, ни для песчинки, ни для капли воды. Но малые эффекты могут складываться в нечто значимое, если воды *много*: передача давления от одних областей к другим создает эффект «насоса», накачивающего воду в сторону подлунной и антилунной областей, забирая ее из «срединных» областей. Вода — не в озерах или даже морях, которые слишком малы для этого, а в Мировом океане — испытывает силу, толкающую ее *вдоль поверхности*, по стрелкам на рис. 4.3. Получается почти буквально насос: на двух противоположных сторонах Земли вода нагнетается в горб (прилив), а между ними возникает впадина (отлив).

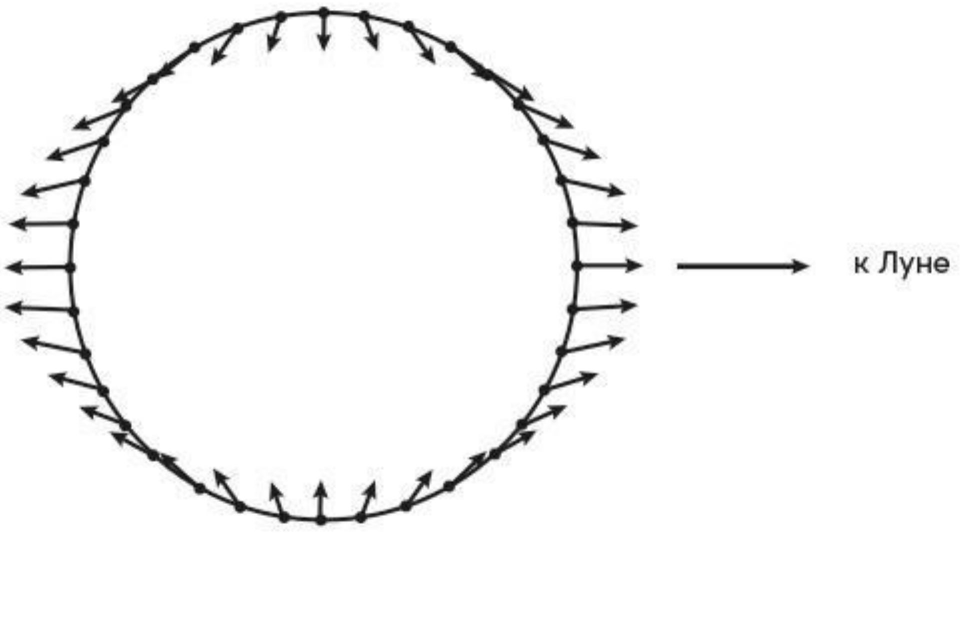


**Рис. 4.3.** Как направлены силы, которые возникают на земной поверхности из-за неоднородности притяжения к Луне

Один горб обращен к Луне, а другой — в противоположном от Луны направлении. Теперь, наконец, самое время вспомнить, что Земля вращается вокруг своей оси, поворачиваясь к Луне разными сторонами по очереди. Стрелки на рис. 4.3 сохраняют свою ориентацию относительно направления на Луну, но нарисованная под ними окружность вращается, просто потому что Земля вращается вокруг своей оси. Она делает полный оборот за 23 часа 56 минут (и 4 секунды), но это — относительно звезд; Луна же не стоит на месте относительно Земли, делая полный оборот за 27,3 суток, из-за чего Земля поворачивается к Луне в точности одним и тем же образом в среднем каждые 24 часа 50 минут и 28 секунд (Луна и в самом деле восходит каждый день примерно на 50 минут позже, чем накануне). Эти 24 часа и 50 (с половиной) минут составляют период вращения Земли вокруг своей оси для жителей базы на Луне, и за это же время на земной поверхности два приливных горба совершают путешествие вокруг Земли (или, если вам так больше нравится, Земля полностью проворачивается под деформированной поверхностью океана). Примерно два прилива и два отлива в сутки (рис. 4.4) [57].

**Рис. 4.4.** Сент-Майклс-Маунт (гора Св. Михаила) в Корнуолле (Англия), куда во время отлива можно пройти пешком по ведущей по дну каменной дорожке. Монастырь на острове основан бенедиктинцами в XII в.

Луна обнимает Землю океанскими приливами, и эти объятия тормозят вращение Земли вокруг своей оси [58]. За последние примерно 100 лет точных астрономических наблюдений сутки увеличились примерно на одну семисотую долю секунды. Процесс будет продолжаться до тех пор, пока приливные горбы не перестанут путешествовать, огибая Землю, а для этого продолжительность суток должна вырасти до периода обращения Луны вокруг Земли. Луна тогда будет видна постоянно над одной и той же точкой земной поверхности. Такой «захват» Земли лунным притяжением, впрочем, имеет шанс наступить настолько нескоро, что еще до того на Земле исчезнут океаны из-за возросшей энергии солнечного излучения, а то и погибнет Солнечная система. Но аналогичный захват Луны земным притяжением *уже произошел*! Все причины возникновения приливов, которые действуют применительно к Земле, действуют и в отношении Луны, только там они сильнее из-за того, что источник этих эффектов — Земля — намного массивнее. Замедление вращения Луны вокруг ее оси происходило до тех пор, пока Луна не перестала поворачиваться «под» двумя приливными горбами, т.е. пока ее вращение вокруг своей оси не синхронизировалось с обращением вокруг Земли. Для этого хватило того времени, пока на Луне имелась жидкая, расплавленная фаза. С тех пор «лунные сутки» и установились равными времени ее обращения вокруг Земли. Луна, другими словами, полностью захвачена гравитационным объятием Земли. Поэтому для того чтобы наблюдать восход Земли — появление ее из-за лунного горизонта, как это делали Борман, Андерс и Ловелл (см. рис. 2.2), требуется лететь вокруг Луны; «сама по себе» Земля над Луной не восходит и не заходит.

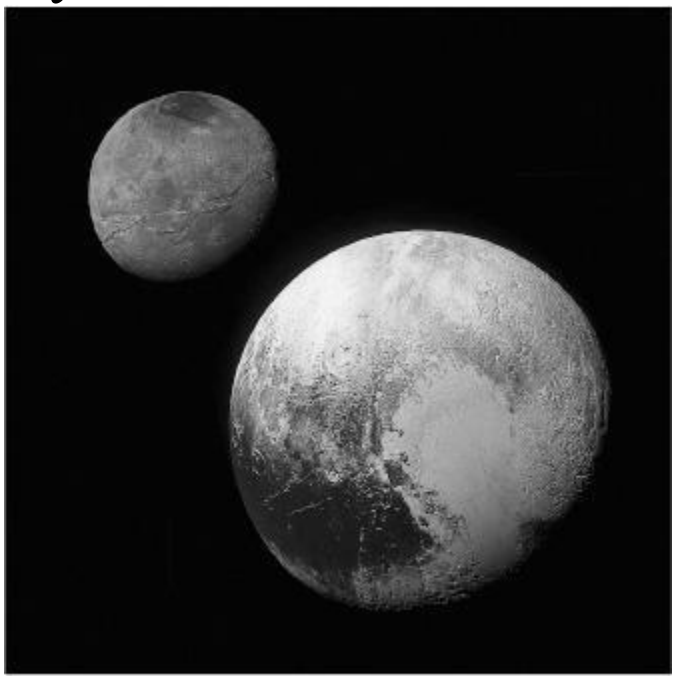


**Рис. 4.5.** Коллаж из фотографий Харона и Плутона, сделанных аппаратом NASA «Новые горизонты» 14 июля 2015 г.

Примеры *гравитационного захвата* наблюдаются в разных местах Солнечной системы. (Карликовая) планета Плутон и ее спутник Харон (рис. 4.5) — не совсем обычный пример планеты и спутника: их радиусы различаются всего в два раза, что несколько приближает эту пару к двойной планете [59]. Это позволило *обоим* телам гравитационно захватить друг друга. Сутки на каждом сравнялись с периодом обращения (6,387 земных суток — где-то между сутками на Земле и на Луне), и каждое всегда повернуто к другому одной стороной. Полное отсутствие сюжета в 5,9 млрд километров от Солнца; вся пьеса *уже* сыграна, а мы определенно опоздали на представление.

Юпитер превосходит свой спутник Ио (который сам несколько больше Луны) в 38 раз по размеру (и в двадцать с лишним тысяч раз по массе) и тоже держит его «лицом к себе». Другой спутник Юпитера, Европа (слегка меньше Луны — процентов на десять по размеру и в полтора раза по массе), судя по ряду признаков, имеет под ледовой корой жидкий океан, причем наличие жидкой фазы в отсутствие солнечного тепла объясняется приливным трением в условиях сильного притяжения Юпитера. Время от времени обсуждается идея поискать в этом океане жизнь. Имеется жидкая вода, кое-какие химические элементы и источник тепла — надо ли что-то еще? Возможно, через некоторое время мы узнаем — планы отправить к Европе исследовательский зонд постепенно принимают все более четкие очертания.

*****

**От прилива до разрыва.** Земля убедительно распорядилась Луной, синхронизовав два вида ее движения. Но возможны и более радикальные решения, примеры которых мы видим у больших (гравитационно сильных) планет в Солнечной системе: они окружены не только спутниками, но и кольцами. Мы тоже могли бы наслаждаться видом колец вместо Луны, если бы она оказалась слишком близко к Земле. Телу относительно большого размера нельзя подходить к другому массивному телу ближе, чем на некоторое критическое расстояние. Да, гравитация только притягивает; но она же, несколько парадоксальным образом, может и *разрывать* — из-за того что одни части тела (для повышения драматизма будем говорить о Луне) притягиваются сильнее, чем другие. Ближняя к Земле часть Луны испытывает более сильное притяжение к Земле, чем центр Луны, а дальняя часть — более слабое. Спрашивается, почему они не отрываются от центра? Конечно, потому, что Луна держит себя вместе своей собственной гравитацией. Так и происходит с Луной там, где она сейчас находится. Но по мере (воображаемого) приближения к Земле возрастает не только общая сила притяжения к Земле — возрастает еще и разница между притяжением ближних и дальних частей достаточно протяженного тела. На некотором расстоянии от Земли эта разница превосходит собственную гравитацию Луны, что и означает конец Луны как чего-то целого и круглого, превращение ее в обломки, которые летают по отдельности, образуя кольца, если смотреть на все это с должного удаления. Критическое расстояние опасного приближения называется пределом — или радиусом — Роша. Его численное значение можно определить, развив только что высказанные соображения (и вовсю пользуясь законом тяготения Ньютона). Естественный спутник Земли, имеющий размер Луны, если он, как и настоящая Луна, твердый, не может приблизиться к Земле ближе чем на примерно 9500 км и остаться единым целым. Это расстояние и есть предел Роша для системы Земля — Луна. Отсюда видно, что Луне ничего не грозит, потому что летает она на расстоянии в сорок раз большем. Предел Роша для жидкой Луны (а она ведь когда-то была такой) примерно в два раза больше, чем для твердой, но все равно текущая орбита Луны проходит на расстоянии, примерно равном 21 «жидкому» пределу Роша. Луна в полной безопасности!

*Гравитация может разорвать на части*

Жидкое тело поддается разрыву на большем удалении от центра притяжения, чем твердое: «жидкий» предел Роша больше «твердого» по причине, которую можно выразить фразой «Чем быстрее начинаешь поддаваться, тем скорее проигрываешь». Жидкое тело деформируется, вытягиваясь вдоль направления на притягивающую массу (в точности так, как вода в земных океанах). Но чем больше вытянут спутник в направлении притягивающей планеты, тем заметнее различие между силами притяжения самой близкой и самой далекой его частей. Другими словами, начавшееся удлинение только способствует увеличению разрывающего усилия! Все те тела, которые мы наблюдаем в Солнечной системе в виде тел, а не колец, так или иначе предотвратили свой разрыв, но следы происходивших битв заметны в приливных выступах, которые имеют некоторые спутники, например Харон (см. рис. 4.5): они испытывали приливную деформацию, пока были жидкими, все-таки избежали разрыва благодаря достаточной дистанции от планеты, но сохранили деформацию — приливные горбы, после того как застыли.

В Солнечной системе есть и пары, приближающиеся к рискованному радиусу. Спутники Сатурна, носящие имена Пан, Атлас, Прометей, Пандора, Эпиметей и Янус (два последних мы уже встречали на прогулке 3, когда они без устали менялись орбитами), имеют орбиты, лежащие *внутри* «жидкого» предела Роша. Даже в сравнении с «твердым» пределом Роша они находятся не слишком далеко от планеты: от менее полутора для Пана до примерно двух пределов Роша для Эпиметея и Януса. Наяда — спутник Нептуна — выделяется орбитой, проходящей в среднем на расстоянии всего 1,39 «твердого» предела Роша (и заведомо внутри «жидкого»). А вот кольца Сатурна (рис. 4.6), традиционно обозначаемые буквами D, C, B, A, F, G и E, [60] находятся внутри или (G и E) очень близко снаружи предела Роша для жидких тел, а D и C — даже внутри предела Роша для твердых тел. Если кольца Сатурна *не есть* результат разрыва когда-то существовавших тел, то это, во всяком случае, ясное свидетельство того, что пребывание ниже предела Роша или вблизи него не позволяет — и никогда не позволит — отдельным кускам собраться вместе под действием своей собственной гравитации, как когда-то собрались имеющиеся планеты и их спутники.

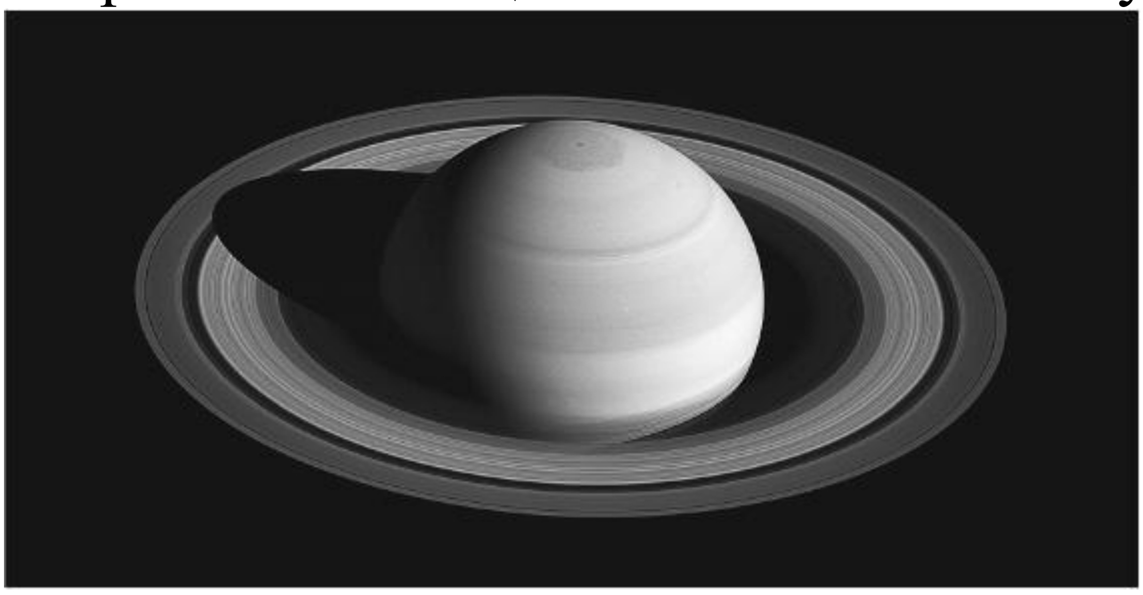


**Рис. 4.6.** Фотография Сатурна, сделанная аппаратом «Кассини»

Иногда мне кажется, что астрономы (да и астрофизики) излишне самоуверенны — смело рассуждают не только о вещах далеких и, в общем, не слишком хорошо видных (иначе зачем столько современных ухищрений?), но и о причинах того, что с этими вещами происходит. Но в такие моменты я спрашиваю себя: а как же не стать самоуверенным, если вычисления на бумаге способны предсказать правила игры для самых далеких космических объектов? Предел Роша был вычислен теоретически (в 1848 г.!) исходя из закона тяготения и ряда предположений, но это не «бумажная декларация». Он *работает.* В июле 1992 г. комета Шумейкеров — Леви 9 пересекла предел Роша, неосмотрительно приблизившись к Юпитеру, и *в самом деле была* расчленена на несколько фрагментов. Через два года эти фрагменты снова приблизились к Юпитеру, но на этот раз упали на него, что было первым наблюдаемым столкновением (естественных) тел в Солнечной системе. Скорость попадания была высока — близка ко второй космической скорости для Юпитера (59,5 км/с), что сделало событие не только крайне интересным для изучения Юпитера, но и *ярким*. К сожалению, фрагменты врезались в Юпитер на той его стороне, которая в этот момент не была видна с Земли, и наблюдать моменты удара мог только космический аппарат «Галилео» (который как раз направлялся к Юпитеру, но все еще находился от него на расстоянии большем, чем полтора расстояния от Земли до Солнца). Впрочем, Юпитер быстро поворачивается вокруг своей оси (примерно за 10 земных часов), и места попадания стали доступны наблюдению со стороны Земли буквально через несколько минут [61]. Этот случай привлек внимание к возможной роли Юпитера в поддержании жизни на Земле: гравитационно мощная планета-гигант защищает Землю от астероидов и комет, приходящих из более дальних областей Солнечной системы, перенаправляя их или забирая себе, а затем поглощая (комета Шумейкеров — Леви 9, вероятно, попала в объятия Юпитера и сделалась его спутником за 20–30 лет до своей кончины). Спокойствие на Земле (пусть даже *относительное* спокойствие, если вспомнить про столкновение, по всей видимости приведшее к вымиранию динозавров) требует наличия довольно мощного «вышибалы», курсирующего на подходящем расстоянии.

*На одну комету меньше из-за тесного сближения*

В январе 2019 г. космический телескоп TESS (см. рис. 3.8) зафиксировал последствия нарушения предела Роша на расстоянии 375 млн световых лет от нас. Там черная дыра с массой, равной 6 млн масс Солнца, расправилась со звездой предположительно сравнимого с Солнцем размера. Процесс превращения звезды в подобие кольца — яркий диск, вращающийся вокруг черной дыры, — наблюдался в течение 41 суток (этот временной отрезок и характер свечения в первую очередь послужили указанием на то, что причина выделения энергии — не сверхновая) [62].

*****

**Движение откликается на форму.** Движение естественных и искусственных спутников, залетевших в гости комет и астероидов, да и чего угодно вблизи планеты (скажем, Земли) определяется тем, как именно эта планета притягивает. Но закон тяготения Ньютона ничего не говорит о том, как притягивает конкретная планета. Собственно, закон тяготения сообщает, как притягивают друг друга две *точки*, волшебным образом содержащие в себе массы $M_1$ и $M_2$ и разделенные расстоянием $R$. Таких точек в природе существовать не может: любое количество вещества всегда занимает какой-то *объем*, а в геометрическую точку нельзя запихнуть никакую массу. По некотором размышлении начинаешь удивляться, что закон тяготения вообще работает, несмотря на настолько нефизическое допущение в его формулировке. В действительности ньютоновский закон тяготения для таких «волшебных точек» работает вместе с предписанием о суммировании. Требуется представить планету, со всеми ее внутренностями, как собрание несметного числа малых кусков — настолько малых, чтобы каждый *несильно отличался* от точки. Каждый из них находится на своем расстоянии от (например) искусственного спутника, которым мы интересуемся. Притяжения от всех кусков, с учетом массы каждого и расстояния от него до спутника, надо затем сложить. Если все куски достаточно малы, получится неплохое приближение к точному ответу на вопрос о силе притяжения со стороны всей планеты в целом. Если требуется действовать точнее, надо разбивать планету на еще большее число кусков. Точность растет по мере уменьшения размеров всех кусков и одновременного увеличения их количества в разбиении. Такое разбиение и суммирование выполняются практически буквально, когда мы решаем задачу на компьютере; правда, ответ в этом случае получается все равно до некоторой степени приближенным (его точность может нас устраивать, но в принципе ее всегда можно улучшить). Ньютон изобрел математическую процедуру, в рамках которой «уже выполнено» разбиение на такие куски, которые меньше любых, какие можно себе вообразить, а получающийся ответ — *точный*. Эта процедура — интегрирование, уже встречавшееся нам в главе «прогулка 1». Математические правила игры при этом полностью определены, и единственная (зато большая) проблема состоит в том, что совсем не часто результат можно записать «в обозримом виде» — конечной формулой, непосредственно выражающей ответ.

### *Закон тяготения прост только для воображаемых точек*

### *Однородная сфера притягивает точно к своему центру*

Автор закона всемирного тяготения математически выяснил, что шар, равномерно заполненный веществом, притягивает максимально простым образом: так, *как если бы* вся его масса была сосредоточена строго в центре. Достаточно даже, чтобы по каждому сферическому слою вещество было распределено равномерно. Для Земли это означало бы, что она не просто имеет форму шара, но и на любой выбранной глубине (скажем, 8,2 км или 3587 км — любой) кубический сантиметр объема содержит одну и ту же массу и под Чукоткой, и под Кубой, и под Северным полюсом — везде. Тогда Земля и притягивала бы в точности как одна «волшебная точка», в которой непостижимым образом уместилась вся масса планеты; такова математика. Но даже беглый взгляд на раскраску глобуса показывает, что Земля неоднородна: для начала на ней есть океан и не-океан. По крайней мере поверхностный слой толщиной в несколько десятков километров неоднороден. Да Земля и не имеет формы шара! Не могу удержаться, чтобы не процитировать Азимова:

### *Земля — не сферическая*

Когда люди думали, что Земля плоская, они ошибались. Когда люди думали, что Земля — шар, они ошибались. Но если вы считаете, что считать Землю шаром ошибочно в той же мере, в какой ошибочно считать ее плоской, то вы совершаете большую ошибку, чем те две ошибки, вместе взятые.

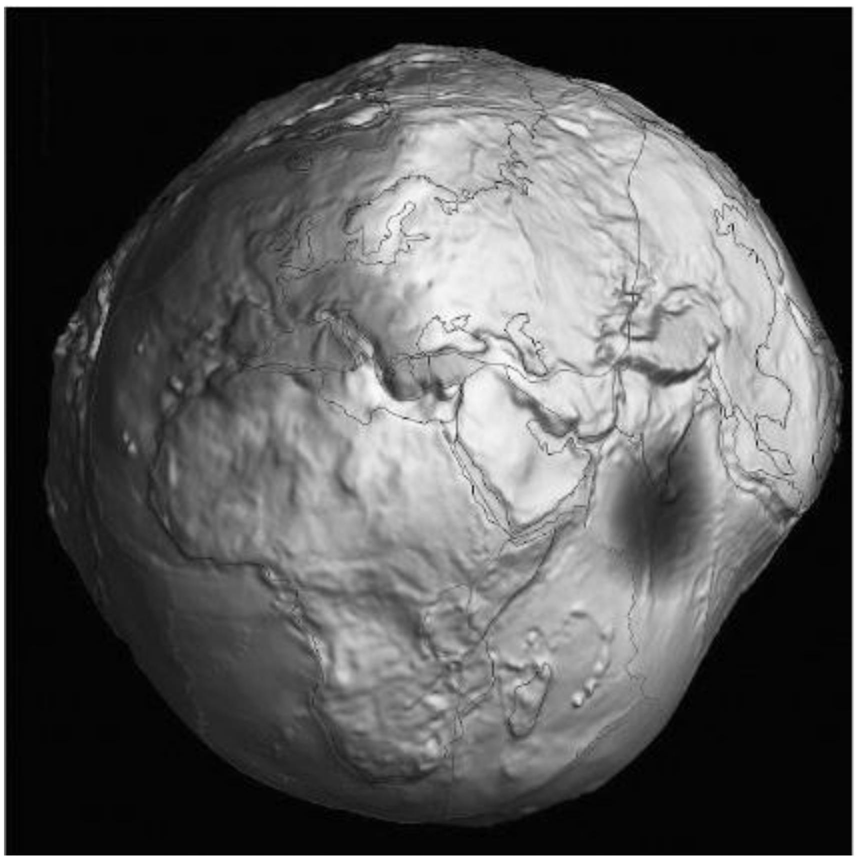


**Рис. 4.7.** Относительные отклонения земной поверхности от сферы преувеличены здесь в 10 000 раз. Выпуклости и вдавленности дополнительно показаны цветом. На черно-белом изображении оттенки красного (выпуклости) неотличимы от оттенков синего (вдавленности); см. цветное изображение: https://en.wikipedia.org/wiki/Figure_of_the_Earth#/media/File:Geoid_undulation_10k_scale.jpg

Отклонения Земли от сферичности и имеющиеся внутри нее неоднородности сказываются на ее притяжении: оно не такое же, как если бы вся масса Земли находилась точно в центре. Различия небольшие, но они радикально меняют *движение* искусственных спутников. Задача о движении спутников в реальности не является задачей Кеплера. Ни одну орбиту нельзя рассчитать на хотя бы десяток витков вперед, заменяя Землю точкой в ее центре, где сосредоточена вся масса Земли.

### *Орбиты спутников чувствительны к форме Земли*

А как надо действовать?

Если бы Земля имела пресловутую форму чемодана или, скажем, подчеркнуто грушевидной груши, то для описания движения малых тел под действием ее притяжения не было бы никаких средств, кроме таблиц, составляемых компьютерами, и визуализации этих таблиц в виде рисунков. Совершенная простота закона тяготения для «волшебных точек» дает сложные результаты, когда эти точки не распределены равномерно по сферическим слоям. Влияние же реальной формы Земли удается учитывать, делая последовательные приближения. Это означает, что отклонения от сферичности принимаются во внимание по очереди в зависимости от того, сколь масштабный эффект они вызывают: от «скособоченности» в целом к более мелким «выступам» и «впадинам». Это оказывается возможным потому, что Земля *все-таки* больше похожа на шар, чем на чемодан; она, более того, ближе по форме к мячу для футбола, чем к мячу для регби. Форма Земли с сильно преувеличенными отклонениями от сферичности показана на рис. 4.7.

Форма и неоднородности Земли — не фундаментальный факт природы, а случайность, особенности конкретной планеты, и для их описания надо придумать, как соединить конкретные данные с фундаментальными принципами. Отправная точка последовательных приближений — идеализированное предположение, приводящее к кеплеровой картине движения; здесь все понятно, и предмет нашего интереса — дальнейшие уточнения, но для единообразия явно сформулируем это предположение.

• **Идеально круглая и однородная Земля:** зависимость притяжения от расстояния $1/R^2$, зависимости от направления нет.

А теперь учтем самый главный эффект, отличающий Землю от идеального шара: сплюснутость у полюсов, или, что то же, выпуклость («вздутие») вблизи экватора. От центра Земли до полюса на 21 км ближе, чем от центра до экватора. Это около 0,335% радиуса Земли, что, в общем, совсем мало для практически всего, кроме спутников. Наладить производство *реалистичных* глобусов, передающих такие детали формы Земли, довольно проблематично: если радиус глобуса равен метру (что не так мало для интерьера — два метра в диаметре), то полюс надо дополнительно приблизить к центру на три с небольшим миллиметра, и это едва ли многие заметят. Но в этом же масштабе высота орбиты, скажем, МКС (практически равная расстоянию между Москвой и Нижним Новгородом) — около 6 см над поверхностью глобуса. Это *близко*, и если «один бок» Земли притягивает несколько сильнее, чем другой, то орбита живо на это откликается; «три миллиметра» (21 км) оказываются очень существенными для низких околоземных орбит. Чтобы описать, как эти 21 км проявляют себя, мы заменяем реальную Землю специальной математической фигурой, учитывающей только реальные значения полярного и экваториального радиусов. Она (эта фигура) называется эллипсоидом вращения, но главное не название, а то, что она передает *одно* знание о форме Земли: разницу между полярным и экваториальным радиусами. На полюсах и на экваторе мы совмещаем эту воображаемую поверхность и реальную поверхность Земли как можно более точно, а в остальном — что получится, то получится: поверхность воображаемого эллипсоида проходит где-то чуть выше, а где-то чуть ниже реальной земной поверхности; о точном совпадении мы прямо сейчас не заботимся. Эллипсоид же прекрасен именно тем, что это строго определенная математическая фигура, для которой можно (хоть и не без некоторых усилий) выполнить требуемую процедуру суммирования притяжений от «волшебных точек». Делая это, надо вспомнить, что мы уже учли притяжение идеально круглой Земли и поэтому сейчас интересуемся только тем, что еще надо *добавить* к силе притяжения.

И вот главное: добавка к силе притяжения, которая математически выводится для эллипсоида, составлена из многих компонентов, которые с разной быстротой ослабевают по мере удаления от Земли. Тот вклад в притяжение, который ослабевает медленнее других, зависит от расстояния как $1/R^4$ (происхождение именно такой зависимости обсуждается в добавлениях к этой прогулке). Это значит, что при увеличении расстояния в два раза такая сила притяжения уменьшается в 16 раз. Это, конечно, заметно быстрее, чем убывание «по закону обратных квадратов» (в два раза дальше — в четыре раза слабее), но все же медленнее всех остальных компонентов, которые в совокупности точно описывают притяжение эллипсоида вращения. А поскольку Земля *не* имеет в точности форму эллипсоида вращения, увлекаться математическими подробностями про притяжение этой фигуры совершенно ни к чему, и из всего притяжения эллипсоида мы оставляем только один компонент — этот самый, который ослабевает как $1/R^4$. Кроме того, математика определяет для этого вклада вполне конкретную *зависимость от направления*. В данном случае это зависимость только от широты, и она однозначно фиксирована. Подведем итог первого шага по переводу формы Земли в силу притяжения.

• **Сплюснутость у полюсов:** дополнительная зависимость притяжения от расстояния $1/R^4$, но еще и с определенной зависимостью от широты.

Широта — это угол, отсчитываемый от экватора (математически — положительный в Северном полушарии и отрицательный в Южном). Зависимость только от широты, но не от долготы означает, что спутник испытывает одинаковое притяжение, находясь на одной и той же высоте над Кабулом и над Осакой (которые расположены почти на одной широте). Помимо того что от широты зависит сила притяжения, направленная по радиусу к центру Земли, автоматически появляется и составляющая силы, направленная вдоль меридианов, — что неудивительно, потому что экваториальное «вздутие» притягивает спутник к себе. Математике при этом неважно, как называется сплюснутое у полюсов тело, которое мы захотели примерно описать как эллипсоид вращения. Точно такую же зависимость притяжения от широты мы получили бы для сплюснутого у полюсов Юпитера. Все, что остается от конкретной планеты (кроме ее массы), — это одно число, а именно коэффициент, с которым вся наша добавка, содержащая $1/R^4$ и вполне определенную зависимость от широты, прибавляется к «закону обратных квадратов». Это небольшое число выводится из упомянутых выше 0,335% (а также массы, среднего радиуса и угловой скорости вращения Земли).

Вперед — к груше! Образ груши отражает тот факт, что Северное полушарие реальной Земли слегка отличается от Южного. Действуем в том же духе: заменяем реальную форму Земли со всеми ее многочисленными подробностями специальной фигурой, более сложной, чем эллипсоид вращения, но все еще относительно простой математически, и вычисляем *добавку* к уже найденной силе притяжения. Здесь тоже получаем силу, составленную из многих компонентов, которые убывают по мере удаления еще быстрее, чем те, которые мы уже учли. Из всего нового оставляем только ту часть, которая уменьшается медленнее других при увеличении расстояния.

• **Неодинаковость Северного и Южного полушарий:** дополнительная зависимость притяжения от расстояния $1/R^5$, снова с определенной зависимостью от широты.

Такая зависимость означает, что при удвоении расстояния притяжение оказывается уже в 32 раза слабее. Математика снабжает этот вклад в притяжение вполне конкретной зависимостью от направления (и получающаяся сила притяжения опять оказывается направленной не строго по радиусу). Связь с реальной планетой Земля состоит в том, что все получившееся надо умножить на экспериментально установленный коэффициент — второе (очень небольшое) число, описывающее неидеальность формы Земли.

И таких чисел в развитых современных схемах — *тысячи*. Все больше подробностей реальной формы Земли и распределения массы внутри нее находит отражение в добавках к силе притяжения, зависящих от расстояния как $1/R^6$, $1/R^7$, …, — каждая со своей зависимостью от направления. При этом дело не ограничивается зависимостью от широты, имеются вклады в силу притяжения с зависимостью и от долготы — тоже с математически определенными выражениями и с экспериментально найденным числом для каждого. Первый вклад с зависимостью от долготы имеет вид дополнительной силы, ослабевающей с расстоянием как уже фигурировавшее выражение $1/R^4$ (но с существенно меньшим коэффициентом), и отражает тот факт, что сам экватор — не совсем окружность! Главное отличие от окружности — разница в 70 *метров* между двумя перпендикулярными диаметрами, больший из которых упирается одним концом в меридиан 15° западной долготы. Этот меридиан, если двигаться по нему с севера на юг, проходит через восточную оконечность Гренландии, Исландию и западную оконечность Африки (Западную Сахару, Мавританию, Сенегал, Гамбию, снова Сенегал, Гвинею-Бисау и принадлежащий просто Гвинее остров Тристан — но уже *не* заходя в Сьерра-Леоне). С противоположной стороны меридиан 165° восточной долготы проходит через Чукотский АО, Камчатский край, вблизи атолла Бикини в цепи Маршалловых островов, а также через Новую Каледонию. Вот там-то Земля и «выпуклая». На несколько десятков метров.

Добавляя все новые — и все более разнообразно устроенные математически — компоненты силы притяжения, мы все более точно описываем реальное притяжение Земли, уже необязательно задаваясь вопросом о том, какая именно скособоченность в каком направлении или повышенная плотность планеты где-то внутри описывается именно данным слагаемым в общей сумме. Математика заботится о том, какими могут быть возможные зависимости от направления (широты и долготы) для каждого слагаемого с заданной скоростью убывания по мере удаления, и остается только правильно определить коэффициент перед каждым из них. Здесь-то и вступает в дело вторая часть всей схемы: связь между силой притяжения (со всеми ее разнообразными зависимостями от расстояния и направления) и орбитами. Какое-то уже установленное выражение для силы притяжения — скажем, из пяти слагаемых — определяет, какими были бы орбиты, если бы Земля притягивала в точности как сумма этих пяти слагаемых (такие орбиты можно найти с помощью компьютера). Затем точно измеряют орбиты реальных спутников, чтобы узнать, где они отклоняются от предсказаний. Теперь требуется решить обратную задачу: определить, какие дополнительные вклады в силу притяжения отвечают за такое отклонение, и добавить их с такими коэффициентами, чтобы вычисляемая орбита совпала с реально наблюдаемой. Точность всех последующих предсказаний орбит тем самым повысится, а затем процесс повторяется для все более тонких уточнений. «Все более тонкие» означает эффекты, вызванные неоднородностями все меньшего масштаба: не общая скособоченность Земли, а что-то вроде «чуть более сильного притяжения» со стороны какой-то относительно небольшой области. Модель земного притяжения в виде набора коэффициентов, каждый для своего математического выражения из известного набора, дает наиболее полное выражение нашего знания о том, как притягивает к себе наша планета.

### *Движение — способ узнать форму Земли и распределение массы внутри нее*

Численные значения коэффициентов определяются из наблюдения за движением; наилучшие имеющиеся представления о форме Земли — это результат исследования движения в ее окрестностях. Все то же самое относится и к другому небесному телу, изученному в достаточных подробностях, — к Луне. Особенности ее гравитации, определяемые по движению искусственных спутников Луны, стали предметом интереса в середине 1960-х как часть подготовки к высадке человека на ее поверхность [63]. Неучтенные усиления и ослабления лунного притяжения увеличивали ошибку прилунения и вносили неточности в расчеты необходимых маневров на окололунной орбите. К настоящему моменту гравитация Луны (где в дело не вмешивается атмосфера, о роли которой для Земли мы еще скажем) изучена в немалых подробностях; на карте, приведенной на рис. 4.8, разрешение достигает 20 км. Луна более неоднородна, чем Земля, и быстро «губит» низкие орбиты: существенные изменения в них накапливаются за несколько дней. Майкл Коллинз оставался в одиночестве в командном модуле «Аполлона-11» около суток, начав с орбиты, имеющей максимальное удаление от Луны 122 км и минимальное 100 км; с учетом того, что было известно тогда о гравитации Луны, ожидалось, что к моменту встречи с лунным модулем, возвращающимся с поверхности, он окажется на круговой орбите радиуса 110 км, но в реальности стыковка произошла на орбите с максимальным и минимальным удалениями 117 км и 105,2 км. Позднее выяснилось, что имеются замечательные «замороженные» орбиты со строго определенными углами наклонения к экватору 27°, 50°, 76° и 86° — такие орбиты на удивление устойчивее других. Но вообще-то создавать постоянную станцию на низкой окололунной орбите — малоперспективная затея (это одна из причин, по которым для Лунной орбитальной платформы планируется орбита, связанная с точками Лагранжа системы Земля — Луна).

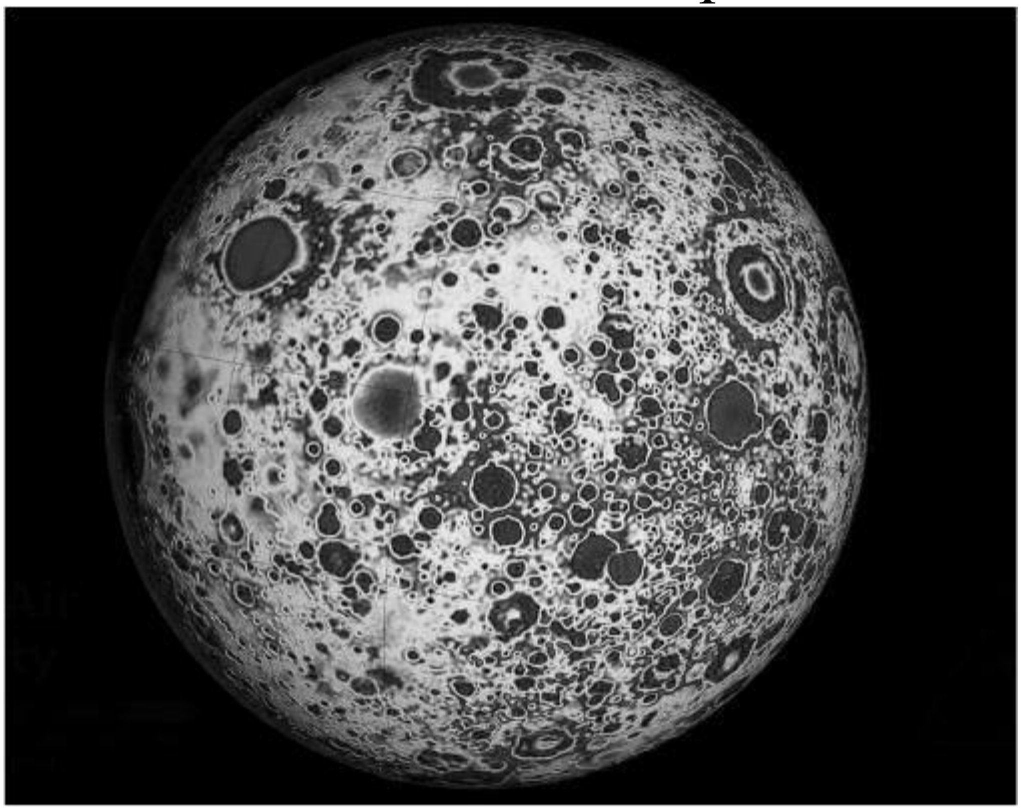


**Рис. 4.8.** Лунная гравитация, представленная цветами на поверхности. На черно-белом изображении оттенки красного (избыток массы) неотличимы от оттенков синего (недостаток массы); см. цветное изображение: https://www.nasa.gov/mission_pages/grail/multimedia/zuber4.html

Получение точных данных потребовало одновременного полета двух космических аппаратов. Они двигались по орбите высотой всего 50 км на расстоянии от 175 до 225 км друг от друга, и измерение этого расстояния с точностью до микрона позволило в подробностях картировать лунную гравитацию

*****

**Спасение эллипсов поцелуями.** Точная модель земного притяжения требуется для точных расчетов, которые неизменно оказываются вычислениями на компьютере. Их надо делать каждый раз заново для каждого космического аппарата, начиная вычисления с тех или иных «начальных условий» — конкретных данных о том, где находится и куда движется аппарат в выбранный момент времени. Но из компьютерных вычислений не так просто увидеть связь «причина — следствие» — скажем, насколько *именно этот* тип скособоченности Земли влияет, например, на поворот плоскости орбиты.

В отношении всех тысяч коэффициентов, в совокупности отражающих форму Земли, задавать такие вопросы довольно бессмысленно, потому что эффект от каждого — это та или иная вариация и без того тонких эффектов, определяемых «более старшими» коэффициентами (теми, которые отвечают за неоднородности большего масштаба). Но в том, что касается самых старших — и наиболее «влиятельных» — коэффициентов, крайне желательно было бы увидеть связи «причина — следствие». Как действуют причины, стоящие за безумием реальных орбит вроде той, что изображена на рис. 4.1? Какие орбиты более, а какие менее чувствительны к главным проявлениям несферичности Земли? При планировании космических миссий такое знание позволяет делать общие выводы еще до того, как вычисление необходимых подробностей передается компьютеру. Получение этого знания — поучительная история о том, как можно разобраться в сложном движении. Ряд некеплеровых орбит удалось остроумно описать, не расставаясь с Кеплером окончательно и бесповоротно (да, мы любим кеплеровы орбиты — уже за то, что с ними все понятно, а рассуждать в их терминах удобно; это-то удобство и хочется по возможности сохранить). На помощь приходит трюк с «поцелуями».

Глядя на спутник, который движется вокруг реальной Земли, быть может, по траектории, вроде показанной на рис. 4.1, попробуем (как верные последователи Галилея в том, что касается мысленных экспериментов) представить себе, что вся несферичность Земли вдруг пропала. С этой самой секунды спутник продолжит двигаться по эллипсу. Реальный же спутник, притягиваемый реальной Землей, полетит по несколько иной траектории, но мы намереваемся описывать происходящее с ним как наложение друг на друга двух сюжетов: 1) спутник каждую секунду движется по тому эллипсу, который наблюдался бы, если бы несферичность исчезла; 2) весь эффект несферичности проявляется в том, что сам этот эллипс непрерывно меняется. Здесь, конечно, важно не переборщить. Если вы двигаете бусинку по проволочному кольцу в форме эллипса и одновременно поворачиваете и/или вытягиваете сам эллипс, то это второе надо делать не слишком быстро. Если кольцо неузнаваемо меняется быстрее, чем бусинка пройдет по нему сколько-нибудь заметную долю полного оборота, то от эллиптической формы этой проволоки большой пользы нет. Но из-за того, что Земля все-таки *достаточно* круглая, для спутников эта схема работает.

Заветный эллипс — то ли придуманный, то ли реально существующий, хоть и постоянно меняющийся — называется оскулирующим. Именно так — не «осциллирующим». Не самый распространенный английский глагол *osculate* означает, как ни странно, «целовать» [64]. В механике и математике термин (не совсем без оснований) стал указывать на плавное касание — такое, когда две линии имеют в точке соприкосновения общую касательную. Чтобы идея постепенно эволюционирующего эллипса оправдала наши надежды, а именно позволила бы увидеть, какие факторы влияют на эволюцию орбит и каким именно образом, необходимо получить *уравнения* для этих меняющихся эллипсов. Эта задача была поставлена и решена только в середине XX в. Неизвестными в таких уравнениях *для орбит* являются вовсе не координаты спутника, а параметры эллипса в целом.

А как, собственно, эллипс может оскулировать? Во-первых, может меняться его геометрия — размер и степень вытянутости: каждую из полуосей эллипса можно, в принципе, растягивать или сжимать. Одновременно эллипс может «гулять» вокруг Земли, оставаясь будто бы закрепленным в ее центре своим фокусом. Попробуйте взять в руку проволочный эллипс достаточно большого размера, поместить внутри него глобус и представлять себе, что один из фокусов эллипса закреплен на волшебном шарнире в центре глобуса (настоящий спутник обходится без волшебства). На ваше усмотрение остаются разнообразные размахивания эллипсом как единым целым вокруг этой точки — в дополнение к уже отмеченной возможности сжимать или растягивать эллипс по двум направлениям. Как же на все эти движения эллипса влияет своей гравитацией главная неоднородность Земли — сплюснутость у полюсов?

Ранее мы выразили сплюснутость Земли в виде поправки к силе притяжения с зависимостью от расстояния $1/R^4$ и с некоторой конкретной зависимостью от широты. И вот наконец награда: обработка этой поправки математическими средствами и некоторая степень остроумия при выводе уравнений для оскулирующего эллипса позволяют ясно увидеть, что происходит с любой начальной орбитой. Из формул, без которых я изо всех сил (хоть и не всегда с полным успехом) стараюсь обходиться, следует, что из-за сплюснутости Земли *геометрия эллипса не меняется*: он никак не растягивается и не сжимается. Выразим это короткой анкетой:

| | |
|---|---|
| Размер эллипса | ✘ |
| Степень вытянутости эллипса | ✘ |

Зато в другом отношении события развиваются довольно живо — плоскость, в которой лежит эллипс, поворачивается с постоянной скоростью навстречу движению спутника: спутник, обращающийся вокруг Земли в направлении ее собственного вращения, пересекает экватор на каждом следующем витке несколько западнее, чем на предыдущем (рис. 4.9). Это означает, что траектория движения спутника *размыкается*. Следующий виток ложится не на предыдущий, а примерно так, как получается при сматывании в клубок толстой шерсти: рядом с предыдущим, на некотором расстоянии от него. Все упражнение с оскулирующими эллипсами затевалось для того, чтобы понять, на каком именно и от чего оно зависит. Мы вознаграждены, потому что расстояние между витками можно вычислить, и оказывается, что оно вполне определенным (и несложным) образом *зависит от наклона орбиты* к экватору: оно значительно для малых углов наклона и исчезает для орбиты с максимальным углом наклона — полярной орбиты, проходящей над полюсами.

Измерять сдвиг орбиты удобнее всего по положению той точки, где орбита пересекает экваториальную плоскость (конечно, эту точку надо описывать с привязкой не к самой Земле, а в терминах, например, направлений на звезды). Для типичной орбиты эта точка пересечения сдвигается на несколько градусов в сутки. Например, если «несколько» — это три или шесть, то точка пересечения обойдет Землю по экватору за четыре или два месяца соответственно, а вместе с ней будет поворачиваться и орбита. Вы запускаете орбитальную станцию на одну орбиту, а она, не спрашивая вас, отправляется в незапланированное странствие, наматывая «попятные» витки. Эта информация оказывается критически важной для любой планируемой стыковки со станцией, потому что активное изменение плоскости орбиты, как мы говорили на прогулке 2, обходится крайне дорого в отношении топлива. Скорость прецессии зависит еще и от высоты, и даже если космический корабль, направляющийся к станции, выходит на «правильную» плоскость, но заметное время остается на более низкой орбите, то плоскость его орбиты неминуемо «разойдется» с плоскостью орбиты станции. Впрочем, достигнутое понимание этого эффекта позволяет им пользоваться: для почти полярных орбит скорость поворота плоскости орбиты можно сделать равной примерно одному градусу в сутки, что означает около 360° в год, а это, в свою очередь, означает, что спутник сохраняет неизменной свою ориентацию *по отношению к Солнцу*. Другими словами, участок земной поверхности, над которым пролетает спутник, освещен примерно одинаково от витка к витку. Такие *солнечно-синхронные* орбиты востребованы для задач систематического наблюдения за поверхностью Земли; сама возможность их планирования — очевидный успех описания некеплеровых околоземных орбит с помощью оскуляции.

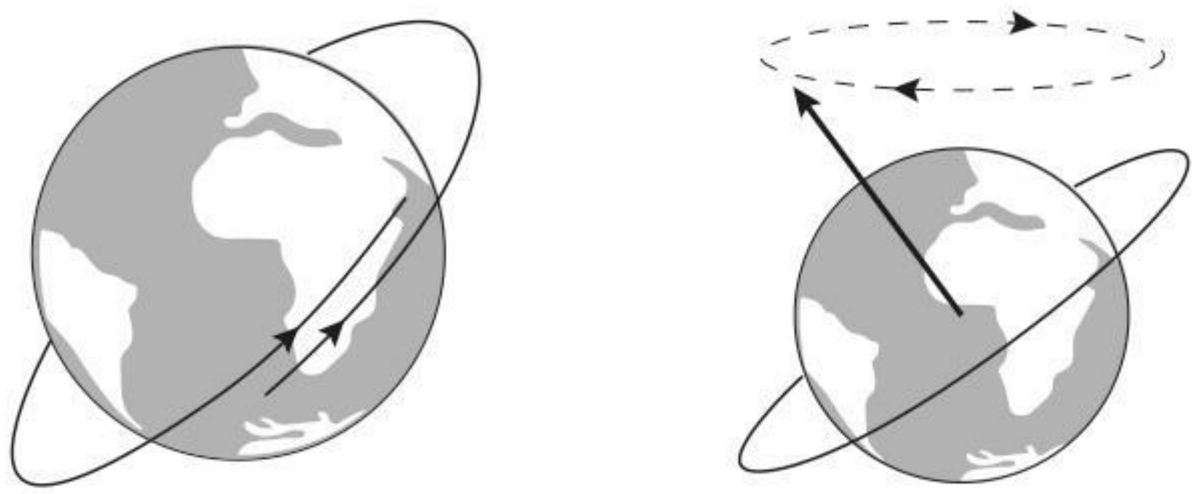


**Рис. 4.9.** Поворот (прецессия) орбиты из-за сплюснутости Земли у полюсов. Плоскость орбиты поворачивается в сторону, противоположную направлению движения спутника, что делает его орбиту незамкнутой. Поворот плоскости орбиты можно представить себе как вращение острия стрелки, проведенной из центра перпендикулярно орбите

## *Солнечно-синхронные орбиты — продукт некеплеровой эволюции кеплеровых орбит*

Но вращение плоскости орбиты — еще не все. Наблюдая за спутником с самой вращающейся плоскости, т.е. как будто бы поселившись где-то на ней и не глядя по сторонам, мы, конечно, перестанем замечать это вращение. Но мы увидим, что орбита поворачивается *в этой плоскости*: точка наибольшего приближения к Земле совершает обход вокруг планеты, относительно неспешный [65]. Запустив, скажем, спутник связи так, чтобы точка его наибольшего приближения была в Южном полушарии, а большую часть времени он проводил на высокой орбите над Северным, мы через некоторое время обнаружим, что спутник пребывает главным образом над Южным полушарием, потому что орбита повернулась. Как скоро это случится? Скорость поворота (прецессии) эллипса тоже зависит от наклона орбиты к экватору, но зависит иначе, чем скорость вращения плоскости орбиты. Она велика для малых углов наклона, а нуля достигает при наклоне около 63,4°. При близких к этому углах скорость прецессии невелика — скажем, полградуса в сутки для спутника на высоте несколько сотен километров; диаметральный разворот эллипса тогда займет около года. Орбиты с таким наклоном (наклонением, как обычно говорят) иногда называют орбитами «Молния» по названию серии советских спутников связи: они достигали наибольшего удаления от поверхности (около 40 000 км) над Северным полушарием, где и проводили большую часть времени из каждого 12-часового витка. Продолжим нашу анкету:

| | |
|---|---|
| Поворот плоскости орбиты | ✓ |
| Поворот эллипса в плоскости орбиты | ✓ |

А вот «наклонение» — наклон орбиты к экватору — из-за сплюснутости Земли не меняется. История с оскулирующими орбитами позволяет проследить, в каком месте каких уравнений и из-за чего появляется нуль:

| | |
|---|---|
| Наклонение орбиты | ✗ |

Полученные уравнения для некеплеровой эволюции орбит и следующие из них выводы едва ли стоит классифицировать как «закон природы». Законы, которые здесь действуют, — это законы Ньютона, а далее используются конкретные сведения о форме Земли. В итоге математической обработки получаются «правила», которым следуют все космические аппараты вблизи конкретной сплюснутой планеты. Другие параметры несферичности Земли тоже можно внедрять в уравнения для оскулирующих эллипсов; формулы становятся все более громоздкими, и в конце концов все равно требуется компьютер. Но и то, что доступно на бумаге, впечатляет не только разнообразием эффектов по сравнению с решением задачи Кеплера, но и возможностью принимать решения на основе явной зависимости от параметров несферичности.

Правда, еще раньше, чем дополнительные поправки к форме Земли, следует учитывать влияние ее атмосферы. Это второй по значимости (после сплюснутости) фактор, влияющий на многие типичные орбиты спутников. На высотах больше 100 км атмосфера очень разрежена, но влияние ее накапливается. Такое влияние на космические аппараты описывается достаточно сложно, но один эффект стоит упомянуть качественно, потому что за ним стоят те же принципы, что и за гравитационной пращой (см. главу «прогулка 2»). Взаимодействие с атмосферой происходит в первую очередь на участке наибольшего приближения к Земле. Но это именно та точка, где изменение скорости на фиксированную величину сильнее всего влияет на высоту орбиты в противоположной точке — точке максимального удаления. «Зеркально» ситуации поэтапного разгона и подъема орбиты космического аппарата на основе эффекта Оберта здесь происходит поэтапное — виток за витком — торможение на ближнем к Земле участке орбиты и вызванное этим понижение точки максимального удаления. Последствия торможения заметнее всего не там, где оно происходит, а через полвитка орбиты [66].

А на примерно круговых орбитах в верхних слоях атмосферы спутники демонстрируют эффект, который даже называется «парадокс спутника»: из-за трения об атмосферу космический аппарат ускоряется — и чем больше сопротивление атмосферы, тем сильнее, — одновременно снижаясь. Объяснение — в особенностях орбитальной механики, с которыми мы уже встречались: потеря энергии движения, в данном случае из-за трения, приводит к переходу на более низкую орбиту, а более низкая орбита означает бóльшую скорость. Математика работает так, что из-за трения об атмосферу спутник разгоняется *точно* в такой степени, как будто сила трения поменяла направление и превратилась в силу тяги. Этим же объясняется парадоксальная картина, когда после отделения спутника на низкой орбите ракета-носитель, с уже не работающими двигателями, обгоняет спутник: из-за своих размеров ракета-носитель испытывает большую силу трения об атмосферу, а потому и ускоряется в точно такой же степени сильнее. Движение спутника, цепляющегося за атмосферу, дает очень точные данные о силе сопротивления, которую он испытывает, и тем самым о плотности атмосферы. Космические аппараты, которые начинают цепляться за атмосферу слишком сильно, быстро погибают. Характерное время жизни спутника на высоте 150 км — около суток, но на высотах больше 200 км это время заметно возрастает и на высоте 400 км составляет около года [67].

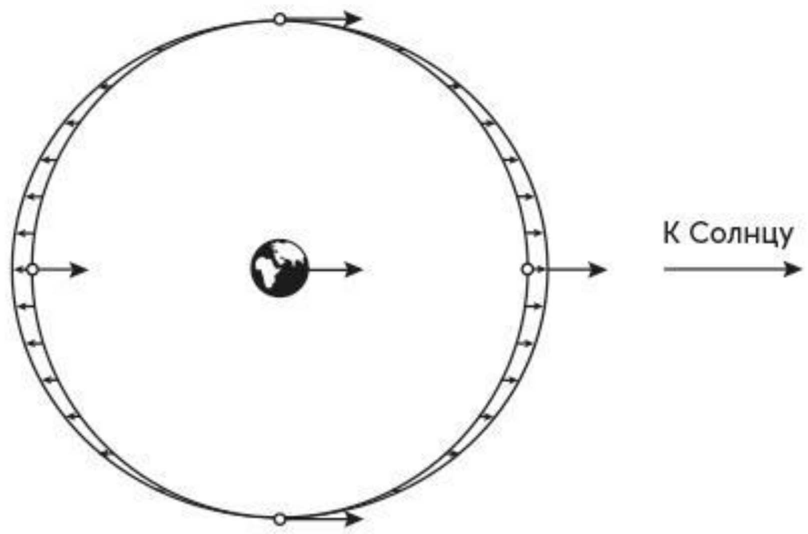



**Рис. 4.10.** Стрелки разной длины указывают дополнительное ускорение относительно Земли, испытываемое спутником на околоземной орбите из-за наличия Солнца. Для наглядности через концы стрелок проведена вспомогательная линия

*****

**Борьба всех со всеми.** На низких околоземных орбитах и трение об атмосферу дает себя знать, и многочисленные поправки к силе притяжения, быстро убывающие по мере удаления, еще не успели сильно убавиться и разными способами влияют на орбиты. Но и на высоких орбитах спутникам нет покоя. Там, где гравитация Земли ослабевает, более существенными «нарушающими» факторами становятся притяжения Луны и Солнца. Как и с приливами, все дело в том, что Луна сильнее притягивает то, что к ней ближе, и слабее то, что дальше. Если бы лунная гравитация была одной и той же везде в околоземном пространстве, то никакого ее влияния на движение спутников вокруг Земли не наблюдалось бы, но в действительности Луна действует на разные части орбиты по-разному, а из-за этого орбиты портятся. Похожим образом дело обстоит и с дополнительными ускорениями, которые испытывает спутник из-за наличия Солнца, с той поправкой, что Солнце находится так далеко, что из всех точек околоземной орбиты направление на наше светило практически одно и то же (рис. 4.10). Вызываемая Луной и Солнцем «порча» орбит заметна на высотах более 20 000 км над земной поверхностью и начинает играть доминирующую роль среди всех возмущающих факторов на высотах более 50 000 км: там период обращения спутника может меняться на несколько минут за один оборот вокруг Земли, а смещение от витка к витку запросто составляет сто или несколько сотен километров (забудьте про легкую стыковку, если вы вдруг ее планировали). Характерные возмущения зависят еще и от наклона орбиты спутника по отношению к земной орбите и к орбите Луны, а также от степени вытянутости орбиты. Орбитальная механика и здесь проявляет себя контринтуитивным образом, уже встречавшимся нам несколько раз. Для вытянутых орбит влияние Луны и/или Солнца на скорость спутника сильнее всего на участке максимального удаления от Земли, а поскольку спутник сам по себе движется там медленнее всего, эти изменения оказываются относительно существенными. Затем они «передаются» в область максимального приближения к Земле и здесь-то уже проявляют себя в полной мере: минимальная высота над Землей может измениться весьма сильно. Разумеется, более тесное сближение спутника с Землей опасно возможным трением об атмосферу: раз начавшись, оно нарастает вплоть до разрушения космического аппарата. Ирония состоит в том, что «заталкивать» космический аппарат в атмосферу может эффект, действующий в диаметрально противоположной части траектории. Автоматическая межпланетная станция «Луна-3», облетев Луну, оказалась на орбите вокруг Земли с максимальным удалением, на 100 000 км *превышающим* радиус лунной орбиты, но с самым тесным приближением к Земле на 15 000 км. *Солнечные* возмущения в высокой части орбиты, где станция двигалась медленно, вызывали все более тесное приближение к Земле в самой низкой части, и станция погибла в атмосфере всего через 11 оборотов (каждый из которых, правда, занимал более двух недель). Обратный эффект возмущающего влияния на орбиту испытала «Луна-4» (1963). Низкий участок ее траектории поднимался из-за солнечных возмущений, и в конце концов Солнце отобрало станцию у Земли: на очередном витке она поднялась так высоко, что больше не вернулась к Земле — стала спутником Солнца.

Движение в реальном космосе устроено сложно, потому что движение — это отклик на содержание Вселенной.

Малые изменения орбиты одного тела под действием других тел происходят в Солнечной системе постоянно; на разных участках своей орбиты планета, астероид или комета испытывает разнообразные воздействия соседей. При этом все окружение *вертится*; пока орбиты примерно замкнуты, движение каждого тела относительно Солнца примерно *периодическое* (прежние положения проходятся снова через определенное время). Периодическое движение — это «лучшее приближение» к покою, какое только возможно в космосе; это единственный способ длительного существования заданных конфигураций тел — например, Солнечной системы. Сколь длительного? Вообще-то у каждого тела свой период обращения, поэтому одна и та же конфигурация всех тел не повторяется. Существенный вопрос при этом: накапливаются ли «обиды» (взаимные влияния на орбиты) в этой не слишком дружной семье, где каждый тянет в свою сторону? *В среднем* за долгий период времени оказывается, что отклонения из-за влияния «всех на всех» близки к нулю. Но здесь фигурирует «математически» долгое время (возможно, даже превосходящее время существования Солнечной системы), за которое параметры орбит испытывают примерно столько же отклонений «в плюс», сколько и «в минус»; а где-то между этим промежутком времени и периодом астрономических наблюдений человечества (в течение которого отклонения незаметны) малые изменения могут накапливаться в случаях разрушительного резонанса. При таком резонансе после некоторого числа витков происходит повторяющийся сдвиг тела в одну и ту же сторону. Эффект отчасти похож на раскачивание качелей: небольшое ритмичное усилие, приложенное стоящим на земле человеком, раз за разом увеличивает амплитуду. Если кто-то решил передвигаться по большой детской площадке и по очереди толкать каждые качели, к которым подходит, не обращая внимания на их движение, то в результате его действий качели могут и раскачиваться сильнее, и тормозиться. Это зависит от соотношения периода раскачивания качелей (что мы отнесем к свойствам самих качелей) и времени обхода всей детской площадки этим заботливым человеком. Если вы обнаружите, что раскачиваетесь все сильнее, значит, вы в резонансе с его перемещениями: он оказывается рядом с вами как раз вовремя, чтобы вас ускорить (а если нет, в среднем он будет раскачивать и тормозить качели примерно одинаково). В Солнечной системе разрушительные резонансы буквально приводят к опустошению некоторых орбит малых тел («качели» раскачались так, что слетели с петель): например, в поясе астероидов имеются пробелы, расчищенные резонансами с Юпитером (рис. 4.11). По сходному механизму образовалась щель Кассини, наибольшая из многочисленных щелей в кольцах Сатурна. Она видна как темная полоса между кольцами A и B и вызвана резонансом 2 : 1 со спутником Сатурна Мимасом, открытым Гершелем в 1789 г. Это означает, что, пока Мимас делает один оборот, тело, помещенное в щель Кассини, делает два. Там заметно меньше тел, чем на других, нерезонансных орбитах, потому что притяжение Мимаса убрало их оттуда (рис. 4.12) [68].

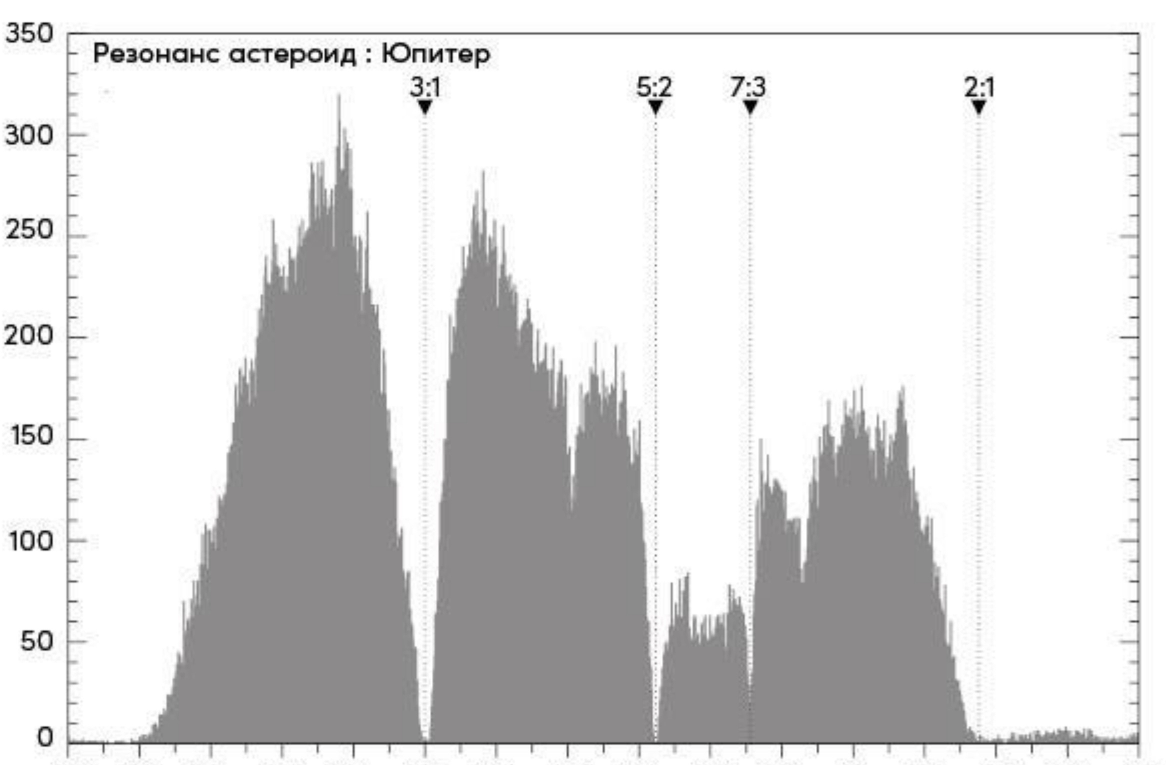



**Рис. 4.11.** Щели Кирквуда в поясе астероидов. По горизонтали указаны расстояния от Солнца в астрономических единицах, по вертикали — плотность, с которой орбиты заселены астероидами. Эта плотность резко уменьшается на некоторых орбитах из-за их резонанса с орбитой Юпитера. Отмечены резонансы 3 : 1, 5 : 2, 7 : 3 и 2 : 1 (кроме них, есть и другие)

Солнечная система все-таки не совсем «часовой механизм», единожды заведенный и тикающий всегда одинаково. Даже сейчас, в период ее зрелости, в ней случаются близкие контакты, а уж в молодости бывало *всякое*. И все же задача Кеплера для Солнечной системы — не бессмысленное приближение: из-за взаимного влияния тела не летают в точности по эллипсам, но эллипсы более чем узнаваемы. Такое благоприятное положение вещей поддерживается тем, что даже Юпитер, не говоря уже о всех остальных, намного (более чем в 1000 раз) уступает Солнцу по массе. В самой по себе задаче Кеплера, т.е. задаче двух тел, отношение их масс не имеет значения (всегда получаются эллипсы); но уже в задаче трех тел все не так. Едва ли есть другой пример, когда в однотипных явлениях с числом участников от двух и выше переход от двух к трем вызывает столь радикальные качественные изменения.

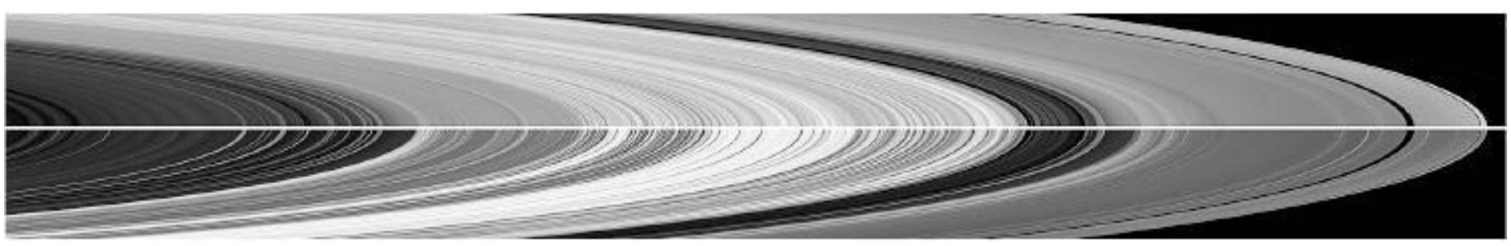


**Рис. 4.12.** Кольца Сатурна по фотографиям космического аппарата «Кассини». Щель Кассини — темная полоса в центральной части изображения

*****

**Драма для троих.** *Настоящая* задача трех тел — задача о движении трех идеальных шаров или точек, гравитационно притягивающих друг друга, — отличается от задачи про два больших тела (например, Землю и Луну, даже если считать их идеально круглыми) и космический корабль. Траектория «Луны-2» между Землей и Луной могла быть достаточно сложной, но эта сложность не идет ни в какое сравнение с тем, что происходит, когда третье тело не малое, как космический аппарат. Когда все три участника имеют сравнимые массы, их движение приобретает в общем неконтролируемый — непредсказуемый — характер вот каким неожиданным образом. Никто, конечно, не отменял законы Ньютона, и какие бы три тела — будем говорить о трех звездах — мы ни взяли, их относительные скорости и положения изменяются со временем в точном соответствии с этими законами. Но эволюция любой системы зависит еще и от ее начального состояния (см. главу «прогулка 1»). Чтобы предсказать движение, надо решить уравнения движения, взяв за начальное определенное состояние всей системы: скорости и положения всех тел-участников в некоторый выбранный момент времени. Даже если в нашем распоряжении очень мощный компьютер, позволяющий делать сложнейшие вычисления, сами эти начальные условия всегда определены с какой-то степенью приближения. Небольшая неточность в начальных условиях в задаче Кеплера приведет к небольшой неточности в предсказании движения, и в этом смысле мы не сильно боимся неточностей. Буквально как на спокойной реке, где и правда бояться нечего: оттого, что вы не заметите сдвиг вашей лодки на полметра вправо или влево, ваш путь вниз по течению никак принципиально не изменится. Все иначе на бурной реке: при заходе в порог разница в полметра может привести к драматически различным продолжениям. Задача трех тел — это что-то вроде еще «ухудшенного» путешествия по сильно порожистой реке. Малые изменения в начальных условиях приводят к радикально различным вариантам развития событий. Немного удивительно, что действие одной лишь гравитации придает движению трех (*всего* трех) тел ничуть не меньший азарт, чем при выборе, справа или слева обойти камень в потоке [69]. Добивается этого гравитация посредством механизма, по существу близкого к гравитационной праще. Если в системе двух тел их сближение всегда ограничено некоторым расстоянием (в частности, тела не могут столкнуться — за исключением того случая, когда они прицельно направляются навстречу друг другу), то в системе трех тел такого ограничения нет. Имеющееся в системе «количество вращения» [70] распределяется на большее число участников; если тел только два, сохранение количества вращения не позволяет им излишне сблизиться, но, как только появляется возможность передать некоторое количество вращения третьему телу, запрета на сближение больше нет и одно из тел может пройти сколь угодно близко к другому. На малом расстоянии взаимодействие сильное, а из-за того, что тела движутся, они тем или иным образом обмениваются энергией движения. В результате одно из тел может оказаться буквально выстреленным в какую-то сторону: оно с большой скоростью уходит от оставшихся двух тел. Те продолжают совместными усилиями притягивать его, и, как вариант, улетающее тело может через некоторое время повернуть обратно под действием этого притяжения. Вновь набрав скорость, оно возвращается к двум другим, которые тем временем спокойно обращались вокруг общего центра масс. В эту идиллию вторгается энергичное третье тело, и скорее рано, чем поздно, возникают условия для очередного «выстрела» каким-то из тел. Выстрел может оказаться фатальным: тело приобретет такую скорость, что уже никогда не вернется. Иногда драма растягивается надолго — уходящее тело еще раз-другой «передумывает», — но в конце концов система трех тел склонна к распаду. Когда именно это произойдет и какое из трех тел будет все-таки выброшено прочь, зависит от тонких деталей того, как происходят тесные сближения. Вот здесь-то и оказывается, что даже небольшие неточности в знании скоростей и положений всех тел не позволяют нам правильно предсказать их поведение даже с помощью самого мощного компьютера: малые изменения в момент сближения развиваются в качественно различные сценарии. Нет возможности предсказать, кто из участников будет изгнан; иногда почти-изгой все-таки возвращается и после серии тесных взаимодействий выброшенным оказывается кто-то еще. Задача трех тел — это *истерическая* драма.

В задаче трех тел не исключены, конечно, специальные конфигурации, например такие, где два тела обращаются «вокруг друг друга» (вокруг общего центра масс), а третье находится *далеко* от обоих и по существу обращается вокруг них как целого (опять же, вокруг центра масс всех трех, если выражаться строго — что, честно говоря, страшно надоело). Такие конфигурации *тройных* звезд во Вселенной есть, и одна из них даже по соседству с нами (4,3 светового года от Солнца). Это Альфа Центавра, а точнее — Альфа Центавра A, B и C. Первая из них — звезда, похожая на Солнце, лишь немного более старая, массивная и яркая. (В земном небе это третья по яркости звезда, но увидеть ее можно, только находясь к югу от 29° северной широты. В Каире она еще не видна, а в Нью-Дели только-только появилась над горизонтом.) Ее компаньон Альфа Центавра B светит в два раза слабее Солнца и имеет несколько меньшую массу. Обращаясь одна вокруг другой, две звезды временами сближаются до 23 а.е. — что несколько больше, чем радиус орбиты Урана, но это как-никак две *звезды*. Третья звезда, Альфа Центавра C, — та самая Проксима Центавра. Название означает «ближайшая» — разумеется, к Земле/Солнцу; но от звезд A и B этот красный карлик находится по-настоящему далеко, почти в 13 000 а.е., и обращается вокруг них примерно за полмиллиона земных лет (хотя не исключено, что и просто пролетает мимо — точно определить характер орбиты, с учетом имеющихся в задаче расстояний, не так легко; в любом случае «в последнее время» и в довольно протяженном будущем Проксима — ближайшая к нам звезда). Известны системы и из большего числа звезд, но они всегда *иерархические*: например, две тесные пары, находящиеся достаточно далеко друг от друга и обращающиеся — каждая практически как целое — вокруг общего центра масс.

*Кратные звездные системы организованы иерархически*

Около половины звезд во Вселенной (в Галактике во всяком случае) именно двойные: две звезды, часто разные по своим свойствам, обращающиеся друг вокруг друга. Удивительно или нет, но в XXI в. выяснилось, что и двойные звезды могут обзаводиться планетами [71]. Две звезды и планета — смягченный вариант системы трех тел (два больших тела и одно малое, но все же способное оказывать некоторое обратное воздействие на звезды). Как же устроились такие планеты в семьях двух звезд? Ответ на этот вопрос определяет, что видят в своем небе их предполагаемые обитатели, а заодно может подсказать, насколько разумно предположение, что они там имеются. Планета Татуин, например, обращается вокруг пары звезд «сразу» (вокруг тесной двойной системы, если выражаться более профессионально). Это значит, что Люк Скайуокер с младенчества видел, как две звезды восходят и заходят вместе (рис. 4.13) и вообще держатся рядом: они обращаются на сравнительно небольшом расстоянии друг от друга, а планета, наоборот, находится на удалении и обращается вокруг них «как целого».

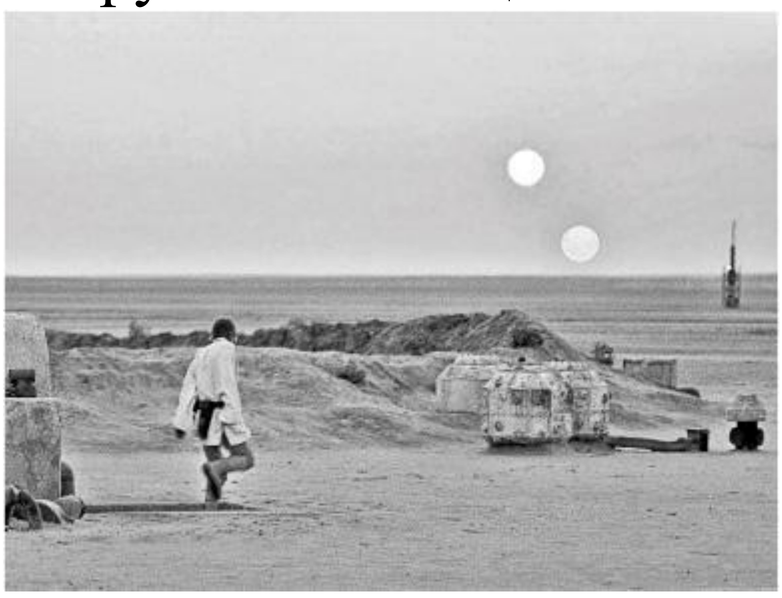


**Рис. 4.13.** Закат на планете, обращающейся вокруг двойной звездной системы

Альтернативная схема — планета, расположившаяся на достаточно тесной орбите вокруг одной из звезд, а вторая звезда на значительном удалении. Вокруг общего центра масс, таким образом, обращаются звезда и звезда-плюс-планета. В этом случае закаты и восходы наблюдаются на планете независимо и могут быть весьма разнообразны. От планеты до другой звезды должно быть заметно дальше, чем до «своей» звезды, иначе конфигурация имеет мало шансов на устойчивость [72]. Если главное для вас — зрелищность восходов и закатов, попросите турагентство поискать такие системы, где дальняя звезда много ярче «своей», ближней, чтобы их вклады в освещенность были сопоставимы; а потом уже выбирайте по цвету звезд [73]. Но даже и далекая вторая звезда влияет на орбиту планеты, и ее расстояние от ближайшего светила может заметно меняться — требуйте полную информацию о возможной внезапной смене сезонов. Да и для планет типа Татуина — обращающихся вокруг обеих звезд «сразу» — тоже не все просто: суммарная сила притяжения, действующая на планету, меняется в зависимости от относительного расположения двух звезд (в особенности если их массы существенно различаются), и планете не так легко оставаться на орбите. Здесь также есть предел приближения, после которого орбита планеты заведомо теряет устойчивость. Несколько парадоксально, но большинство открытых «татуинов» группируются вблизи предела устойчивости. Это заставляет задуматься о том, как же они сформировались, потому что неровная гравитация от двух звезд вообще-то мешает формированию планет. Наиболее реальная возможность — миграция планет из более спокойных далеких областей. Более того, миграцией с далекой орбиты вокруг двух звезд на орбиту поближе к ним дело может и не ограничиться: неровное гравитационное влияние двух звезд способно в определенных случаях перевести планету с орбиты вокруг обеих звезд на орбиту вокруг только одной звезды. (Здесь, возможно, содержится и ответ на вопрос о том, откуда же взялись планеты, обращающиеся вокруг только одной звезды, ведь присутствие второй вообще-то мешает их формированию.)

И конечно, всем тем планетам, так или иначе сформировавшимся в двойных звездных системах, кому не посчастливилось остаться в зоне устойчивости, предстоит быть выброшенными в межзвездное пространство — как и в общей ситуации для системы трех тел, с тем только уточнением, что здесь неустойчивость проявит себя в отношении именно того из трех компаньонов, который сильно дискриминирован по признаку массы. Обмен энергиями движения между массивной звездой и легкой планетой может не просто позволить планете преодолеть притяжение двойной системы, но и придать ей немалую скорость для дальнейшего самостоятельного путешествия. Во Вселенной предполагается существование некоторого количества планет-изгоев (рис. 4.14). В Млечном Пути их, видимо, миллиарды, и они как-то странствуют между звездами. Заметить их крайне сложно, но кандидаты по результатам наблюдений все же появляются. Им присваивают «технические» имена, например: 2MASS J1119–1137, WISEA 1147, WISE 0855–0714, UGPS J072227.51–054031.2 и SIMP J013656.5+093347 (эти планеты находятся в пределах нескольких десятков световых лет от нас). Захват планеты-изгоя какой-то другой звездой со своим собственным выводком планет может произвести там немало изменений, вызвав, например, миграцию планет. (Кстати, не была ли изгоем Планета 9? Если, конечно, она существует.)

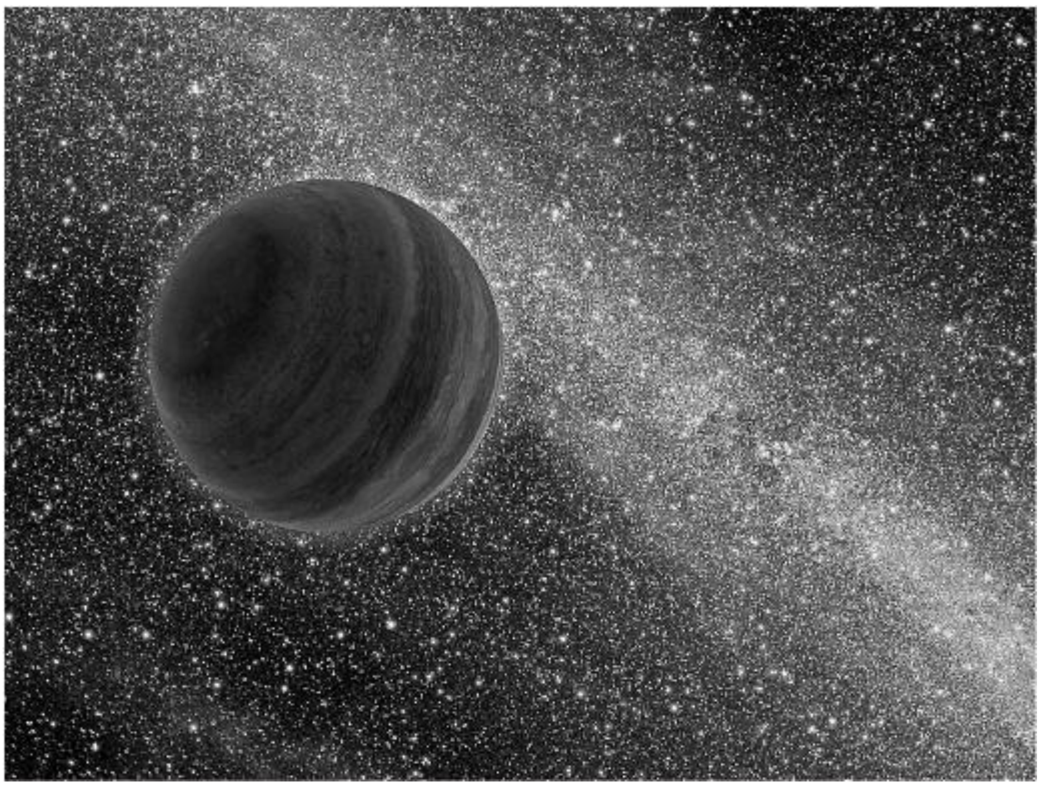


**Рис. 4.14.** Планета-изгой в видении художника

## Добавления к прогулке 4

**Сложное устройство приливов.** Вклад в приливы в земных океанах вносит и Солнце. До него примерно в 390 раз дальше, чем до Луны, а приливные эффекты ослабевают с расстоянием не по закону обратных квадратов, а быстрее — как обратный куб, из-за чего каждый килограмм Солнца создает на Земле приливный эффект в 60 млн раз слабее, чем килограмм Луны; но таких килограммов в Солнце в 27 млн раз больше, чем в Луне, и в результате влияние нашего светила оказывается вовсе не пренебрежимым. Оставаясь меньше лунных, солнечные приливы проявляют себя как изменение масштаба или длительности «обычных»; максимальный вклад в высоту прилива Солнце дает в новолуние или полнолуние, когда Солнце, Земля и Луна находятся на одной прямой и эффекты лунного и солнечного приливов складываются; наоборот, когда Луна видна в фазе первой или третьей четверти, Солнце и Луна наблюдаются с Земли под углом 90° друг к другу и лунный прилив накладывается на солнечный отлив.

Картина приливов вообще усложняется по сравнению с наивной из-за того, что Земля не целиком покрыта океаном: наличие континентов вносит вклад в то, откуда и куда хорошо, а откуда и куда плохо передается давление в океане, и высота приливов из-за этого в разных местах разная. Глубина дна и характер подъема дна вблизи берегов также не везде одинаковы. Есть и иные факторы, вносящие дополнительное разнообразие в картину приливов: наклон плоскости лунной орбиты, центробежная сила из-за вращения Земли, несферичность Земли. Приливные эффекты испытывает, строго говоря, не только океан, но и «твердая» часть Земли; амплитуда их гораздо меньше (не превышает нескольких десятков сантиметров). Про влияние приливных эффектов на жидкое ядро Земли известно мало, поскольку о происходящем там вообще можно судить только по косвенным признакам.

**Поправки убывают быстрее.** Поправки к силе притяжения, учитывающие несферичность Земли, быстрее убывают по мере удаления, чем сила, описываемая законом Ньютона. Обратный квадрат расстояния в ньютоновом выражении (1.1) — это закон природы, а дополнительная сила, зависящая от расстояния по правилу $1/R^4$ и описывающая поправку на сплюснутость Земли, нет. Ее зависимость от расстояния *выводится* из закона Ньютона [74]. Как это получается, хорошо видно на модельном примере «гантели» — двух масс, соединенных тонкой перемычкой. Проще всего случай, когда интересующий нас космический аппарат находится на одной линии с обеими массами. Одна из них расположена ближе к нему, а другая — дальше на расстояние, равное длине перемычки. Считая каждую массу строго сферической, мы, разумеется, можем найти силу притяжения, действующую на космический корабль, складывая два выражения вида (1.1): в одном из них в качестве расстояния надо взять расстояние до ближней массы, а в другом — до дальней. Это точное выражение, никаких поправок к нему не требуется, и только им бы и пользовались, если бы несферические планеты действительно имели вид гантелей. Таких планет не было, пожалуй, даже в «Звездном пути» и других версиях космического эпоса, но я позволю себе некоторую вольность.

Лейтенант Иванова, дежурившая на мостике звездолета, не обратила внимания на форму появившегося вдали небесного тела, а ввела в компьютер только его массу и расстояние до его центра, т.е. до середины перемычки. Компьютер вычислил силу притяжения в виде, который *нам* удобно записать в условном виде 2 · «до центра». «До центра» означает, что расстояние в законе тяготения Ньютона надо полагать равным расстоянию до центра всей гантельной конструкции, а двойка отражает наше знание о том, что полная масса небесного тела состоит из двух частей. Иванова, конечно, правильно определила полную массу, но еще не осознала, что две части разнесены друг от друга. Прочитав следующие несколько строк в «Справочнике звездоплавателя», она пришла в ужас от сделанной ошибки. На большом расстоянии от странного небесного тела не слишком важно, как в нем распределена масса, но по мере приближения это будет делаться все существеннее — и на основе неправильной информации компьютер проложит неверный курс. Правильная формула для силы притяжения имеет вид («до ближней» + «до дальней»), где участвуют два различных расстояния, до ближней и до дальней массы. Стереть что бы то ни было в корабельном компьютере невозможно, и все, что может предпринять Иванова для исправления ситуации, — добавить информацию, каким-нибудь приближенным способом учитывающую, что две массы не сидят в одной точке. Она записывает разницу между верным и неверным (не-слишком-верным) выражениями для силы: ((«до ближней» + «до дальней») — 2 · «до центра»), а затем переписывает то же самое другим способом: ((«до ближней» – «до центра») – («до центра» – «до дальней»)). Она знает, что если выражение зависит от расстояния как $1/R^2$, то *разность* таких выражений, вроде («до ближней» — «до центра»), зависит от расстояния приблизительно как $1/R^3$. Это, кстати сказать, общее правило, следующее из математики, а не из закона тяготения; если бы сила вела себя как $1/R^3$, то разница двух сил вела бы себя как $1/R^4$ и так далее. Лейтенант Иванова применяет это правило к каждой из двух внутренних скобок в приведенном выше выражении. Таким путем она приходит к выводу, что *поправка* к первоначальному выражению для силы притяжения со стороны гантели представляет собой разность двух выражений, каждое из которых зависит от расстояния как $1/R^3$. Иванова не останавливается: к полученной *разности* двух однотипных выражений с зависимостью $1/R^3$ она снова применяет общее правило (которое хорошо помнит еще с первого курса летного училища). В итоге она заменяет всю поправку на одно выражение, ведущее себя в зависимости от расстояния уже как $1/R^4$. Звездолет спасен (он и не собирался подлетать к гантели так близко, чтобы понадобились поправки к поправкам, зависящие от «следующих» обратных степеней расстояния), карьера Ивановой успешно продолжается, а метод получения поправки, зависящей от расстояния как $1/R^4$ (как и всех «следующих» поправок), оказывается отличным средством и для реальных планет — во всех случаях, когда их масса не распределена равномерно по шару.

**«Издевательское» решение задачи трех тел.** Математическая победа над задачей трех тел — колоссальный прорыв после решения задачи двух тел Ньютоном — *почти* состоялась. Почти, но не совсем. С самого начала, конечно, никто не ожидал готовых формул для всего бесконечного разнообразия возможных движений в системе трех тел, но ведь не все математические функции задаются каким-то внутренним образом, как, скажем, синус, $\sin t$. Есть менее амбициозные способы определить функцию, один из них — в виде «бесконечной суммы» слагаемых, каждое из которых выглядит просто. Собственно, сам синус можно записать в таком виде:

$$\sin t = t - \frac{t^3}{6} + \frac{t^5}{120} - \frac{t^7}{5040} + \frac{t^9}{362\,880} + \ldots\ .$$

Числа в знаменателях накапливаются здесь в соответствии с несложным правилом (так называемые *факториалы*): $6 = 2 \cdot 3$, $120 = 2 \cdot 3 \cdot 4 \cdot 5$, $5040 = 2 \cdot 3 \cdot 4 \cdot 5 \cdot 6 \cdot 7$, $362\,880 = 2 \cdot 3 \cdot 4 \cdot 5 \cdot 6 \cdot 7 \cdot 8 \cdot 9$ и так далее — с пониманием, что не надо останавливаться в прибавлении слагаемых. Вся информация о функции, собственно, и содержится в этих коэффициентах. Если остановиться, например, после пяти слагаемых, получится не точное значение синуса числа *t*, но достаточно близкое к точному, если *t* мало; если же число *t* не мало, то надо продолжить добавлять слагаемые, следуя правилу их построения [75].

Похожим образом, после применения ряда математических трюков (работы Сундмана 1907–1912 гг.), вроде бы была *решена* и задача трех тел: положение каждого тела определяется подобной «бесконечной суммой», в которой *t* связано с временем, прошедшим с некоторого начального момента. Для каждого коэффициента определено правило его вычисления в зависимости от масс всех трех тел и их начального состояния. В зависимости от требуемой точности для данного значения времени необходимо вычислить то или иное количество коэффициентов и таким образом предсказать, как же будет происходить движение. Сама по себе математика при этом точная, все погрешности определяются только тем, сколько слагаемых (сколько коэффициентов) мы сумели вычислить. Ура? Появилось ли в наших руках (почти) такое же мощное средство, как эллипсы, гиперболы и параболы, дающие решение задачи двух тел? Может быть, в начале XX в. вычисление требуемого числа коэффициентов и было трудной задачей, но уж в век компьютеров…

Ирония, однако, состоит в том, что даже при очень малых значениях времени (когда ничего интересного еще не успевает произойти) для сколько-нибудь приемлемой точности предсказания требуются *многие миллионы* слагаемых. А для «интересных» значений времени — поистине «вселенское» число слагаемых. Парадоксальным образом, хотя формально нам известно общее решение задачи трех тел, оно не приносит *никакого* знания об их поведении [76].

**Специальные (и красивые) системы трех тел.** Системы трех тел приходится исследовать разными непрямыми математическими методами (в сочетании с моделированием их поведения на компьютере). Среди важных вопросов:

возможно ли там периодическое движение? Тогда можно было бы искать во Вселенной какие-то интересные образования. Правда, от них требуется *устойчивость*, иначе они распадутся под действием малых посторонних влияний и шансы наблюдать их в космосе будут заведомо равны нулю. Довольно неожиданным образом нашлась конфигурация из трех тел равной массы, которые движутся в одной плоскости по восьмерке друг за другом (рис. 4.15). Еще более неожиданно, что это движение оказалось устойчивым: малые влияния несколько меняют траектории, но не разрушают общую картину, как не разрушает ее и неточное совпадение трех масс. Такая устойчивость вроде бы открывает возможность встретить подобную конфигурацию где-то в космосе. К сожалению, чтобы три тела с близкими массами пришли в такое движение, их надо запустить весьма специальным образом (начиная с того, что все три должны двигаться в одной плоскости!), а это крайне маловероятно, и оценки показывают, что шансы встретить подобную систему во Вселенной очень близки к нулю. Жаль.

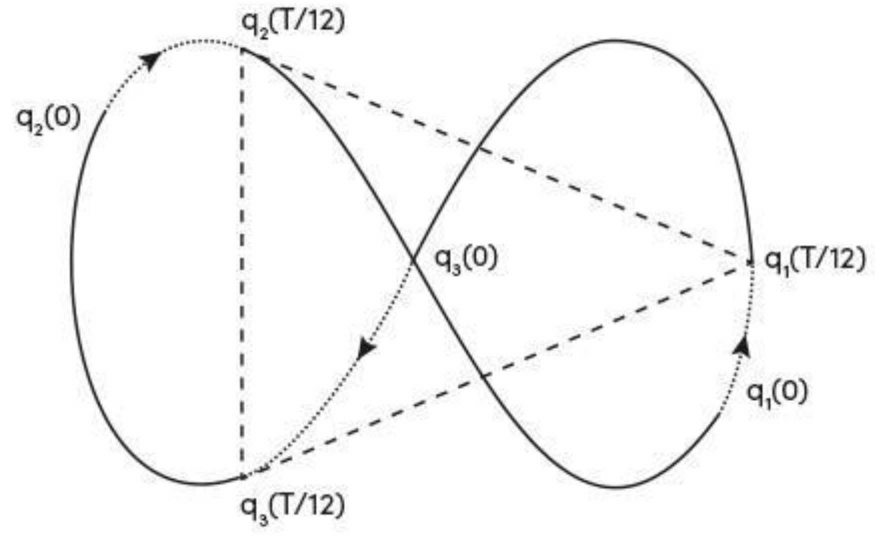



**Рис. 4.15.** Три тела равной массы на орбите, имеющей форму восьмерки. Для каждого тела пунктирной линией отмечена 1/12 часть его орбиты. Штриховые прямые показывают, что в момент нахождения одного из тел на середине «боковой» части восьмерки два других находятся на одинаковом расстоянии от него

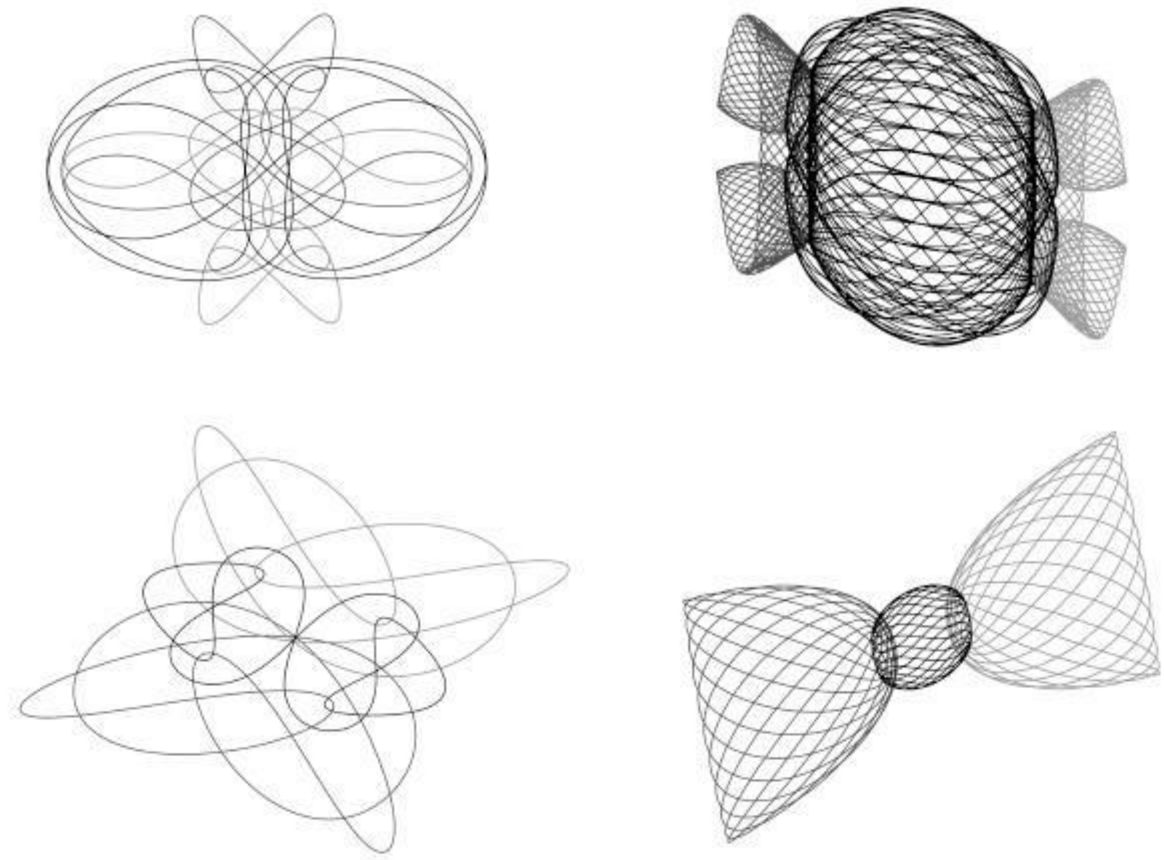


**Рис. 4.16.** Четыре семейства планарных периодических орбит в системе трех тел

Эта система была первоначально открыта на компьютере, а потом удалось доказать ее существование и без помощи машин. К настоящему моменту обнаружены уже тысячи разнообразных периодических конфигураций в системе трех тел, в большинстве своем неустойчивых, но часто интересных геометрически (рис. 4.16).

## Признания и литературные комментарии

Альфу Центавра в последнее время чаще называют Альфой Кентавра, но я выбрал устаревающее произношение. Из-за так называемых либраций (которые я обошел молчанием) на границе видимой и обратной сторон Луны есть область в 6–7° шириной, при наблюдении из которой Земля все же появляется над лунным горизонтом и исчезает за ним. Для наблюдателя же на Земле этот пояс вдоль края лунного диска то открывается, то скрывается.

Орбита, изображенная на рис. 4.1, заимствована из [30]. Судьба «Луны-3» и «Луны-4», вместе с некоторыми подробностями о разрушении орбит Солнцем, описана в книге [17] (глава 4). Фотографии на рис. 4.5 сделаны NASA/Johns Hopkins University Applied Physics Laboratory (JHUAPL)/Southwest Research Institute (SwRI). Фотография колец Сатурна на рис. 4.6: NASA/JPL–Caltech/Space Science

Institute. Разрушение звезды, открытое телескопом TESS, описано в [82]. Цитата Азимова о плоской и круглой Земле фигурирует в сборнике его эссе о науке The Relativity of Wrong, вышедшем в 1988 г. Изображение на рис. 4.7 взято из https://en.wikipedia.org/wiki/Figure_of_the_Earth#/media/File:Geoid_undulation_10k_scale.jpg. Визуализация лунной гравитации на рис. 4.8 приведена на сайте NASA https://www.nasa.gov/mission_pages/grail/multimedia/zuber4.html. Планета-изгой на рис. 4.14 — https://www.nasa.gov/topics/universe/features/pia14093.html. Периодические орбиты трех тел, приведенные на рис. 4.16, взяты из работы [111].

Курьезная орбита-восьмерка была первоначально найдена в работе [91] при помощи компьютерных вычислений, однако далеко не наудачу, а в рамках подхода к рассмотрению плоского движения трех тел в виде *разверток* во времени; в развертке три тела прорисовывают заплетенную косу из трех нитей, и одна из самых простых кос отвечает орбите-восьмерке. Математически существование такого движения трех тел было доказано в работе [55], написанной двумя авторами. Появлению этого доказательства предшествовали исследования каждого из авторов, работавших независимо друг от друга. Один из них направил статью со своими результатами в журнал для публикации; редакция журнала послала статью на рецензию специалисту в данной области — будущему второму соавтору, который обнаружил в части доказательств неточности. В соответствии со стандартной практикой рецензент остается неизвестным авторам статьи, но в данном случае с разрешения редакции рецензент вступил в контакт с автором, после чего их совместные усилия привели к исправлению всех неточностей и дальнейшему прогрессу — так и появилась работа [55]. Хотя это и не самый распространенный способ зарождения научного сотрудничества, подобные случаи время от времени встречаются. Относительно современный обзор задачи трех тел с небольшими историческими экскурсами (но в остальном не ставящий себе целью щадить читателя) приведен в [93].

## Движение на прогулке 4

Движение в поле притяжения может сообщить немало подробностей об источнике притяжения. «Нарушения» орбит искусственных спутников оказались лучшим инструментом измерения формы и плотности Земли и Луны (а на самом деле и Марса). Наиболее точные данные о притяжении Земли и Луны получены из анализа движения космических аппаратов. Некеплерова эволюция орбит из-за неоднородности земного притяжения может оказаться и желательным эффектом, как в случае солнечно-синхронных орбит. Большим телам небезопасно приближаться к притягивающим центрам из-за возможности разрыва. Смягченный вариант того же эффекта, который может разорвать космическое тело, — гравитационный захват, примером которого служит Луна, а еще более смягченный — приливы, наблюдаемые на Земле. Слабые, но постоянные влияния удаленных космических тел на космические аппараты приводят к изменениям и даже разрушению их орбит. Влияние планет проявляет себя и в запретах на массовое заселение резонансных траекторий, что видно по движению малых тел в Солнечной системе, а также в структурах колец, подверженных влиянию спутников планет.

Точное математическое решение задачи о движении трех тел под действием взаимного притяжения оказывается невозможным. Несмотря на формальную детерминированность, движение трех или более тел сравнимой массы под действием взаимного притяжения оказывается в общем случае практически непредсказуемым из-за того, что малые отклонения в начальных данных приводят к качественно различным вариантам развития событий. Такие системы распадаются, когда какое-то из тел приобретает достаточную скорость, чтобы покинуть систему. Это причина, по которой мы ожидаем наличие планет-изгоев, когда-то выброшенных из двойных звездных систем. По этой же причине из звездных систем, состоящих из трех или большего числа звезд, выживают только те, которые организованы иерархическим образом. Математически и, главным образом, с помощью компьютерного моделирования были найдены специальные конфигурации трех и более тел, совершающих периодическое движение в отсутствие выраженной иерархической структуры. Среди таких конфигураций есть и устойчивые, но тем не менее шансы обнаружить такие экзотические формы движения во Вселенной чрезвычайно малы.

# ЧАСТЬ 2

# ВСЕЛЕНСКИЕ ПРОГУЛКИ

## Прогулка 5

## Абсолютное, относительное и безразличное

**Маршрут:** *Не все скорости складываются. — Относительны все, кроме одной. — Энергия из массы. — Темпы времени. — Относительность и пространство-время. — Замедление времени как необходимость. — Сверхколлайдер: догнать свет. — Движение, энергия и масса. — Будущее, прошлое и безразличное. — Космический старт: обмануть систему? — Сверхпривилегия от рождения. — Заманчивые путешествия. — Циолковский с нами.*

**Главный герой:** *абсолютная скорость*

---

**Не все скорости складываются.** Ночной рейс British Airways из Нью-Йорка в Лондон с 8 на 9 февраля 2020 г. оказался рекордным: пассажирский «Боинг-747» приземлился в Хитроу в 04:43 утра, почти на два часа опередив расписание, потому что летел в ту ночь необычайно быстро: максимальная скорость в полете достигла 1327 км/ч. При этом скорость звука в воздухе — 1235 км/ч, и ни один современный пассажирский авиалайнер преодолеть ее не в состоянии. Виноват оказался ураган «Кьяра»: относительно окружавшего его воздуха самолет двигался со своей обычной крейсерской скоростью, но сам воздух быстро перемещался в том же направлении (в общем, с запада на восток), из-за чего относительно наблюдателя на земле (где-нибудь, скажем, в Гренландии или Исландии) лайнер двигался быстрее звука.

Загадка «невозможной сверхзвуковой скорости» для дозвукового самолета разрешилась простым сложением скоростей. Но проделаем еще один эксперимент — на этот раз на вычитание. Он приведен в фантастической формулировке, чтобы сделать его более наглядным, но в существенно менее ярких вариантах он ставился многократно. Я улетаю от Земли (по прямой!) на ракете со скоростью, довольно заметно превосходящей скорость «Аполлона-8», но в общем достаточно скромной: 15 км/с. Вы же стартуете несколько позднее и желаете догнать и перегнать меня на ракете будущего со скоростью в десять тысяч раз большей — 150 000 км/с (пожалуй, вам лучше будет отправить вместо себя робота, но дела это не меняет). Провожающие светят нам вслед лазером, как это показано на рис. 5.1. Скорость света в пустоте — 299 792,458 км/с; с такой скоростью и распространяется свет лазера относительно своего источника на Земле. Какую скорость света в этом лазерном луче каждый из нас измерит со своего транспортного средства?

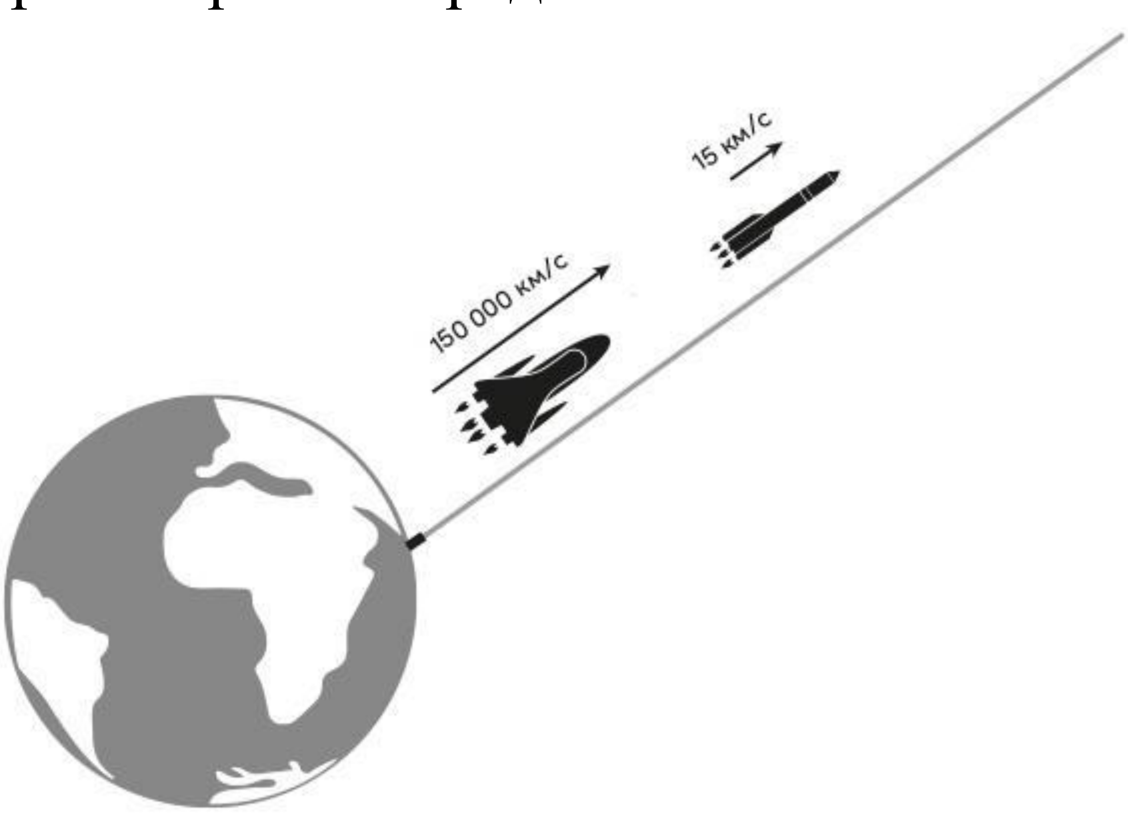



**Рис. 5.1.** Быстрая ракета догоняет медленную. Обе летят по прямой линии от Земли, и вдоль этой же линии с Земли светит лазер. Измеряя скорость света в этом лазерном луче, экипаж каждой из ракет получит одно и то же значение

С борта своей примитивной ракеты я определю скорость этого света как 299 792,458 км/с. Вы же на борту продвинутого звездолета, летящего со скоростью, равной практически *половине* скорости света, обнаружите, что посланный с Земли лазерный луч пролетает мимо вас со скоростью 299 792,458 км/с. Здесь нет опечаток. В точности те же двести девяносто девять тысяч семьсот девяносто два с копейками. Для того же самого луча света, посланного с Земли. Скорости вовсе не вычитаются (а потому на самом деле и не складываются).

*****

**Относительны все, кроме одной.** Скорость — это главное, что характеризует движение. Существенное добавление состоит в том, что, например, скорость автомобиля, зафиксированная дорожной камерой, — это скорость автомобиля *относительно* камеры. Телеметрия взлетающей ракеты сообщает ее скорость относительно космодрома или какой-то другой точки, связанной с Землей; тот факт, что Земля при этом несется вокруг Солнца со скоростью около 30 км/с, совершенно не важен, пока ракета находится вблизи Земли (хотя при полетах «Аполлонов» к Луне положение и скорость космического корабля начинали в некоторый момент исчислять уже не относительно Земли, а относительно Луны). При полетах, скажем, к Марсу скорость после старта с околоземной орбиты надо измерять, например, с точки зрения воображаемого наблюдателя, сидящего в центре Солнца. Но и тогда скорость, с которой Солнце летит вокруг центра галактики Млечный Путь, нас совершенно не интересует. Вот если бы мы отправлялись к другим, а особенно далеким, звездам в Галактике…

А как вообще узнать, двигаюсь ли я? Если я сижу в поезде, который вот-вот отправится, то можно выяснить, произошло ли это уже, взглянув на поезд на соседнем пути. Большинство из нас хоть раз, хоть на секунду обманывалось таким образом: вполне может оказаться, что тронулся соседний поезд, а не наш. Чтобы выяснить, «как же обстоит дело на самом деле», мы привычно ищем глазами перрон. Из-за того, что Земля большая по сравнению с человеком и поездом, мы привыкли думать, что если уж поезд движется относительно Земли, то он движется «на самом деле». Но что, если размер

Земли больше длины поезда не в сто тысяч раз, а всего лишь в сто? А в десять? А в два? Кто из них движется «на самом деле»? Здравый смысл, основанный на всем предшествующем опыте жизни на «большой Земле», тогда уже ничего не подсказывает, и это вполне отвечает положению вещей: скорость какого-либо тела — это всегда скорость его движения *относительно* какого-то другого тела. Нет никакого «движения на самом деле» — смысл имеет только относительная скорость. Бессмысленно высказывание «Земля несется сквозь пространство со скоростью …». В пустом пространстве нет никаких «отметок», «зарубок» или «верстовых столбов» — ничего такого, относительно чего можно было бы измерять скорость; для этого нужны тела, но каждое из них движется относительно каждого, поэтому нет способа подставить вместо многоточия в приведенной фразе какое-то число. Зато полностью осмысленно высказывание «Две ракеты сближаются со скоростью 10 км/с» (скажем, одна ракета догоняет другую). Всегда нужно говорить, относительно чего вы измеряете скорость.

Скорость, таким образом, — это вопрос *отношения*: чтобы говорить о скорости, нужны «двое». «Все как у людей», только здесь — два любых тела.

Я предусмотрительно употребил слово «тело». Главная новость этой прогулки состоит в том, что есть одно «*не тело*», для которого все по-другому. Никакому смертному мужу не дано было убить главного назгула, но, согласно Толкину, Эовин (рис. 5.2) успела крикнуть ему: «Я — не муж!», после чего заколола [77]. Примерно то же и тут: имеется не тело, а нечто другое, что движется (распространяется, как часто говорят) особым образом. Это *свет*. Скорость света в пустоте одна и та же для *всех* наблюдателей: для вас в суперракете, для меня в ракете середины XXI в. и для провожающих на Земле.

**Рис. 5.2.** Эовин: «Я — не муж!»

### *Все скорости относительны, кроме одной абсолютной*

Это обстоятельство выражают словами «скорость света абсолютна» (в таких случаях всегда, даже когда не упоминается явно, подразумевается скорость света в пустоте). Все скорости относительны, кроме скорости света, которая абсолютна. Все остальные скорости — это про две сущности (что-то одно движется относительно чего-то другого), но скорость света «сама по себе»: какое бы мельтешение (взаимное движение) ни устраивали разнообразные другие сущности, свету нет до этого дела, его скорость одна и та же для всех. Не надо прибавлять или вычитать скорость наблюдателя относительно источника света. Она просто не имеет значения — даже если она составляет половину (или три четверти, или девять десятых) скорости света.

Так устроена наша Вселенная, и сам по себе этот факт не вызывает сомнений уже сто с лишним лет. Другой вопрос — как примирить его со здравым смыслом? Ведь никакая скорость, казалось бы, не может быть абсолютной: если кто-то обгоняет вас, просто прибавьте хода, чтобы его скорость относительно вас стала равной нулю.

Короткий ответ: не примирить никак. Наш опыт, наша интуиция и навыки никаким образом не включают эффекты, непосредственно затрагивающие скорость света. Длинный же ответ на вопрос о «примирении со здравым смыслом» — это все книги, лекции, видео и прочие материалы, созданные за последние сто с лишним лет, авторы которых с разной степенью умения и остроумия излагают странные явления, которые не так легко «представить себе воочию», — излагают в надежде, что к ним удастся в конце концов привыкнуть. Эта прогулка не исключение, потому что единственная реальная альтернатива — это профессиональное погружение в предмет. А как, спрашивается, обстоит дело с «представить себе воочию» у профессионалов? Трудностей с тем, чтобы вообразить невообразимое, все равно никто не отменял, просто фокус внимания переносится на другое: на ясное понимание логического (в значительной части — математического) аппарата. Вместо интуиции «здравого смысла» проводником в непривычный, контринтуитивный мир служит логическая безупречность. Коль скоро во всей логической схеме нет внутренних противоречий, ее можно с успехом применять; главное — не делать ошибок по дороге.

Надо сказать, что та схема, которая прочно сидит в нашей голове и воспринимается как совершенно естественная, — та, где скорости всегда просто вычитаются (скорость света минус половина скорости света, как мы наивно ожидали, глядя на рис. 5.1) или складываются (скорость самолета в воздухе плюс скорость воздуха относительно побережья Гренландии), — это тоже логически непротиворечивая, математически последовательная схема. Как таковая она имеет полное право на существование. Она *могла бы*, наверное, работать, но этого не случилось в нашей Вселенной. Ее устройство основано на другой схеме, которая проявляет себя несколькими неожиданными способами — затрагивая не только движение, но и энергию, ход времени и даже концепцию прошлого и будущего.

Начнем с проявлений, затрагивающих энергию, — они довольно многочисленны.

*****

**Энергия из массы.** Каждое атомное ядро состоит из протонов и нейтронов (простейшее — ядро атома водорода — это *один* протон), но масса каждого ядра несколько меньше, чем суммарная масса протонов и нейтронов, из которых оно сложено. Методы определения массы сначала атомов, а затем непосредственно атомных ядер непрерывно совершенствуются уже в течение более ста лет, и сейчас массу ядер можно определять с точностью свыше одной миллионной доли, а массы протона и нейтрона известны даже с еще большей точностью. В большинстве атомных ядер обнаружился недостаток массы по сравнению с массой всех взятых по отдельности протонов и нейтронов. В расчете на каждый протон-или-нейтрон этот недостаток — дефект, как его называют, — равен 8 или даже 8,5 в тех единицах, в которых масса протона примерно равна 938,272, а масса нейтрона — 939,565. Слово «дефект» указывает, что «в собранном виде меньше»: несколько менее 1% суммарной массы нейтронов и протонов «исчезает» при их соединении в атомное ядро.

### *Целое имеет меньшую массу, чем сумма всех его частей*

Объяснение этого явления может показаться отвлеченно-теоретическим; вероятно, оно таким и является, но стоит помнить, что именно оно работает во всех проявлениях атомной/ядерной энергии, мирных и не мирных. Устойчивые или относительно устойчивые атомные ядра (а мир вокруг нас сложен в основном из устойчивых) удерживаются «в собранном виде» ядерными силами [78]. Ключевое слово — «удерживаются». Чтобы разобрать ядро на части, требуется затратить некоторую энергию. Эта энергия служит мерой дефекта массы: она *оказывается равной «пропавшей» массе, умноженной на квадрат абсолютной скорости*.

$$E = mc^2$$

Возможно, при каком-то другом стечении исторических случайностей этот факт сначала открыли бы экспериментально, изучая ядерные превращения. Но получилось так, что его предсказали теоретически на основе размышлений о свойствах движения при наличии абсолютной скорости, вне всякой связи с атомными ядрами — про которые, кстати, на тот момент не было известно вообще ничего. Знание, выглядевшее весьма абстрактным, оказалось более чем практическим через тридцать с лишним лет, когда с его помощью стали рассчитывать энергию, выделяемую при ядерных превращениях: теоретическое положение о том, что масса, умноженная на скорость света в квадрате, есть энергия, появилось в статье Эйнштейна «Зависит ли инерция тела от содержащейся в нем энергии?» в 1905 г. [66], а сообщение Гана и Штрассмана, что ядра урана делятся («Об обнаружении и свойствах щелочно-земельных металлов, полученных облучением урана нейтронами» [77]), было опубликовано 6 января 1939 г. Первое же испытание атомной бомбы было произведено 16 июля 1945 г.

Я не могу сдержаться и не отвлечься от мира фундаментальных явлений на мир людей. Продолжая эту прогулку, вы можете пропустить длинную цитату из книги [22] и отправиться сразу . Контекст, необходимый для понимания описываемого момента: радиоактивность — превращение атомного ядра в одно из соседних по Периодической таблице за счет испускания «малой» частицы — была хорошо известна, но никто не думал, что ядро может разделиться примерно пополам, выделяя при этом энергию.

Поздно вечером 21 декабря 1938 г. Отто Ган и Фриц Штрассман закончили статью, в которой вынуждены были признать, что при облучении урана медленными нейтронами возникают элементы барий, лантан и церий. В тот вечер Отто Ган вряд ли в полной мере предвидел все последствия своего открытия, хотя и чувствовал безошибочно их важность. Пауль Розбауд, издатель еженедельника *Naturwissenschaften*, вставил статью в готовый к выходу номер (как станет ясно после войны — не случайно), и уже через три недели, 6 января 1939 г., она была напечатана. Эта статья оказалась тем камнем, который увлекает за собой лавину: только в течение 1939 г. было опубликовано свыше ста работ по проблеме деления урана. <…>

[3 января 1939 г.] из Кунгалва в Копенгаген возвратился Отто Фриш и сообщил Бору об открытиях последних недель, сделанных Ганом и Штрассманом, а также им самим и его тетей Лизе Мейтнер. «Какими же идиотами мы все были!» — воскликнул Бор, хлопнув себя по лбу. Через три дня после этого увидела свет статья Гана и Штрассмана, но Бор уже не успел ее прочесть. 7 января вместе со своим многолетним сотрудником Леоном Розенфельдом он отплывал на 3 месяца в Соединенные Штаты Америки. В понедельник утром 16 января он сошел с корабля в Нью-Йоркском порту. <…>

На пирсе в Нью-Йорке Бора встретили его ученик Джон Уилер, а также Энрико и Лаура Ферми. Бор не сразу стал рассказывать о новостях, которые ему успел сообщить Отто Фриш перед отплытием (он не знал, что статья об открытии деления урана была за день до его отплытия опубликована), но Леон Розенфельд не был столь щепетилен и в тот же вечер 16 января сообщил об этом всем на семинаре в Принстоне. Уже в течение следующей недели открытие деления ядер было подтверждено по крайней мере в пяти лабораториях США, а затем в этом убедились десятки исследователей по всему миру.

26 января в Вашингтоне открылась конференция по теоретической физике, на которой Нильс Бор рассказал о захватывающих событиях последних месяцев. (В этот же день в Нью-Йорк пришел журнал со статьей Гана и Штрассмана, а Жолио-Кюри в далеком Париже не только повторил опыт Фриша, но, кроме того, и убедился в том, что деление ядер урана сопровождается испусканием нейтронов.) Всеобщее возбуждение, охватившее физиков, требовало выхода, и они немедленно принялись исследовать новое и необычное явление природы. Сам Бор совместно с Уилером уже через три месяца (за то время, пока Бор находился в США) подготовил обстоятельную статью, которая стала основой последующих работ по физике деления ядер. (Их статья «Механизм деления ядер» была напечатана 1 сентября 1939 г. — в день начала Второй мировой войны.) Выступая вслед за Бором, Энрико Ферми обратил внимание на то, что при делении ядер урана, кроме двух ядер-осколков, должно испускаться несколько нейтронов, которые, в свою очередь, могут вызвать последующие деления, т.е. в уране возможна *цепная реакция* с выделением огромной энергии. Заключение Ферми было очень естественным (хотя в то время и не вполне очевидным: сами Фриш и Мейтнер, например, не заметили этого следствия своей гипотезы), однако противоречило наблюдаемым фактам: никто никогда не видел, чтобы кусок урана взрывался при облучении его нейтронами.

Дальше напряжение только нарастает. Кусок урана, взрывающийся при облучении его нейтронами, еще предстояло приготовить. (28 января Президиум Академии наук СССР, имея в виду примерно эту задачу, обратился в Совет народных комиссаров с предложением «Об организации работ по изучению атомного ядра».)

Выделяемая таким куском урана энергия — впервые появившаяся в поле зрения в начале 1939 г. — это часть массы. Решительно никто не представлял себе этого в 1905 г., когда не было известно даже о существовании атомного ядра, а связь массы и энергии была довольно абстрактным знанием, полученным (что вообще-то удивительно) из *свойств движения*. К ним мы и возвращаемся.

*****

Мы живем во Вселенной, в структуру которой встроено наличие абсолютной скорости — скорости света. Она одна для всех. Для внутренней непротиворечивости такого устройства что-то еще должно работать не так, как мы привыкли. Например (см. рис. 5.1), «вычитание» — а точнее, нечто заменяющее вычитание — половины скорости света из самой скорости света должно давать не половину, а в точности скорость света; очевидно, должны систематически действовать какие-то правила, отличные от ожидаемых наивно. Но при этом опыт с движением, накопленный в обычных условиях (от почти житейских ситуаций до космических полетов), — это как-никак *опыт*, и, если некоторая хитрая система правил и описывает «фокусы» со светом, она же должна каким-то образом воспроизводить привычные нам свойства движения в обычных условиях — где скорости и вычитаются (теннисный мяч вслед уходящему поезду), и складываются (ураган и самолет) обычным образом.

В основе правил, которые на самом деле работают в нашей Вселенной, — *относительность* ряда вещей, а именно их зависимость от движения относительно наблюдателя [79]. Относительность является механизмом, обслуживающим наличие абсолютной скорости. Относительными оказываются ход времени и длина в направлении движения: расстояние между носом и соплом ракеты для внешнего наблюдателя меньше в определенное число раз в зависимости от скорости ракеты относительно него, а часы в движущемся поезде выглядят для вас идущими медленнее тех, что у вас на руке, если вы стоите на перроне. Дело вовсе не в устройстве часов и не в том, что с ними «что-то произошло», — наблюдатель, путешествующий вместе с часами, *ничего* не обнаружит; дело именно в различном восприятии одного и того же явления (в данном случае — темпа времени) различными наблюдателями.
Но *заметными* все эти эффекты делаются только при большой скорости ракеты, поезда и т.п. относительно космодрома, или перрона, или другой ракеты, или другого поезда. «Большая скорость» здесь и везде в подобных

случаях означает скорость, составляющую существенную долю скорости света — например, 1/4 или тем более 1/3, а много лучше, конечно, 9/10. (Кстати говоря, если бы в нашей Вселенной не было абсолютной, одной для всех скорости, то и само понятие «больших» и «малых» скоростей не имело бы смысла, потому что скорости относительны.) Наш ежедневный опыт и близко не подходит к такому, поэтому мы этих эффектов не замечаем.

### *Относительность — зависимость от относительного движения*

Лишь относительно недавно сверхточные методы позволили *измерить*, насколько медленнее «тикают часы» при движении с повседневными скоростями, от скорости бегущего человека до скорости автомобиля (от нескольких до 30 метров в секунду). Этого удалось добиться в опыте не с людьми и автомобилями, а с намного лучше контролируемыми объектами — переохлажденными ионами бериллия, магния и алюминия в остроумно придуманной схеме. Но еще в 1940-х гг. получилось проверить, насколько замедляется время, не в лаборатории, а буквально на открытом воздухе. В атмосферу Земли влетают из космоса высокоэнергетические частицы; они претерпевают там столкновения с ядрами тех атомов, которые имеются в атмосфере, отчего рождаются особые элементарные частицы — мюоны. Рождаются и быстро умирают — превращаются в другие частицы в среднем через 2,2 микросекунды (миллионной доли секунды). Некоторые мюоны движутся в сторону земной поверхности и имеют при этом *большую* скорость — скажем, 99% скорости света. Но и с этой скоростью за свою короткую жизнь они могут пролететь не более 660 метров. Даже с учетом того, что не все мюоны умирают точно через указанное время — это лишь *среднее* время их жизни, и некоторые долгожители могли пролететь дальше, — все равно их шансы преодолеть последние 15–20 километров до земной поверхности практически равны нулю. И тем не менее наземные установки фиксируют массовый поток мюонов. Точные эксперименты ставились в 1940 г. в американском штате Колорадо, где установки были размещены на высотах 3240 и 1616 м над уровнем моря (а в 1963-м на горе Вашингтон, которая слегка недотягивает до 2000 м над уровнем моря). Разрешение парадокса в том, что мы оцениваем расстояние, которое мюонам надо преодолеть, стоя на поверхности, но относительно нас мюоны движутся так быстро, что время для них течет медленнее, чем для нас, — как оказалось, примерно в 10 раз медленнее. В итоге они (не все, но часть) *успевают* долететь до детекторов.

Странным в первую очередь может показаться даже не то, что время для мюона течет медленнее, чем для ученого в лаборатории, а то, что эффект вроде бы зависит от наблюдателя: что сказал бы другой ученый, летящий в суперракете вместе с мюоном по направлению к земле? Что, в более безопасном варианте, передал бы робот, помещенный в эту ракету? Ну или, чтобы обойтись даже без потери имущества, что происходит с точки зрения самого мюона? Ведь для него не имеет значения, с какой скоростью он движется относительно каких-то ученых и их установок: его среднее время жизни все равно составляет те же 2,2 микросекунды.

*Относительность* здесь разворачивается по полной. Факт, по поводу которого все наблюдатели согласны (мюоны долетают до поверхности в определенных измеримых количествах), получает разные объяснения для разных наблюдателей. Для наблюдателя на земной поверхности все дело в замедлении времени в 10 раз. Для мюона в те же 10 раз сокращается расстояние, которое ему предстоит преодолеть. Без привычки это выглядит не совсем обычно: про некоторые ситуации нельзя сказать, что имеет место «на самом деле». Тем не менее вся схема работает так, что не приводит к явным противоречиям — какими, например, стали бы два теоретических вывода, что мюоны не успевают пролететь 20 километров и одновременно, на основе какой-то другой цепочки рассуждений, что успевают. За 115 лет внимательного отношения к этим вопросам — с самого момента появления специальной теории относительности — таких противоречий обнаружено не было.

*****

**Относительность и пространство-время.** Специальная теория относительности — это и есть описание движения и его свойств при наличии абсолютной скорости. Ключевые ее положения сформулированы в 1905 г. в статье Эйнштейна под техническим названием «К электродинамике движущихся тел» [65]. Слово «специальная» вошло в употребление позднее, и понимать его надо как не очень удачную замену слова «частная» в значении «не общая» (для чего есть причины, обсуждаемые на следующих прогулках). Слово «теория» же не указывает на «умозрительный» характер, а относится к математическому аппарату для выведения разнообразных следствий из основополагающих утверждений о свойствах окружающего мира. Этих основополагающих утверждений всего два. Удивительно, что они формулируются не на языке формул, а словесно. Их часто называют постулатами Эйнштейна. Законы Ньютона традиционно не называют постулатами Ньютона, но это вполне можно было бы делать, потому что они просто постулированы (объявлены верными). Закон тяготения Ньютона принимается без обоснования, а затем проверяется во всех его бесчисленных следствиях: от падения тел на землю до предела Роша и вообще всего изобилия явлений во Вселенной. Он работает в огромном числе случаев, хотя и есть ситуации, в которых он неприменим и для объяснения которых требуются более общие законы. Аналогичным образом два приведенных ниже высказывания проверяются всем опытом работающей науки. Все их следствия, собственно и составляющие специальную теорию относительности, верны для относительного движения, если оно равномерно и прямолинейно [80]. Вот эти два высказывания:

• Скорость света в пустоте — одна и та же для всех наблюдателей. Как мы уже говорили, этот тезис утверждает *абсолютность скорости света*.

• Все законы природы одинаковы для всех наблюдателей, которые движутся друг относительно друга с постоянной скоростью (в любом направлении, но равномерно и прямолинейно). Это высказывание известно как *принцип относительности*. Он говорит, что внутри вашей суперракеты после выключения двигателей жизнь устроена так же, как в моей тихоходной. Это относится к любым действиям, которые вы решите осуществить на борту в изоляции от внешнего мира. Ни один эксперимент, проведенный внутри ракеты в такой изоляции, не может подсказать вам, что вы движетесь относительно чего бы то ни было.

Эти фундаментальные высказывания об устройстве Вселенной более общие, чем, скажем, утверждения о массе нейтрино или числе кварков: мы думаем, что эти высказывания оставались бы верными, если бы наш мир населяли несколько другие элементарные частицы (собственно, нечто в этом роде и имело место в очень ранней Вселенной). Эти высказывания непосредственно относятся к движению, но глубинным образом затрагивают пространство и время. И как постепенно выяснилось, в нашей Вселенной существует не само по себе пространство и само по себе время, а нечто более общее — штука с довольно громоздким названием «пространство-время». Главное в нем, что его разделение на пространство и время происходит по-разному для наблюдателей, которые находятся в движении друг относительно друга.

Для начала о пространстве-времени можно думать примерно как о *временно́й развертке* Вселенной. Временная развертка строится так, что одно из направлений в пространстве играет роль времени. Развертка того, что происходит на одной прямой линии (например, по ней движутся точки), занимает плоскость; развертка происходящего на плоскости занимает трехмерное пространство. Разумеется, временная развертка событий, происходящих в трехмерном пространстве, оказывается не слишком наглядной, потому что требует четвертого измерения для времени, а предложение «представить себе четырехмерное пространство» — завуалированное издевательство. Однако *как-то* думать о нем приходится, поэтому обычно изображают пространство-время, считая само пространство одномерным или двумерным и подразумевая при этом, что для нашего трехмерного «все примерно так же, только представить себе нельзя». На рис. 5.3 вместо нашего трехмерного пространства — двумерное, что-то вроде бесконечного листа бумаги. Вертикальное направление занято временем: сверху — будущее, а снизу — прошлое того листа, который изображает пространство. Правда, живущие в нем существа не имеют никакой возможности воспринимать свой мир так, как он представлен на рисунке, ведь глядеть со стороны на ось времени означает находиться вне времени; при таком взгляде «видна» вся история мира от начала до конца. Наблюдатель «в данный момент» располагается, как правило, в точке пересечения координатных линий и считается неподвижным: всякое движение тогда рассматривается относительно этого наблюдателя. С течением времени каждое тело, движущееся или покоящееся относительно выбранного наблюдателя, описывает линию во всем «объеме»; эта линия и есть временная развертка его движения. Она вертикальна, если положение тела в пространстве не меняется. Но если тело движется по пространству, то линия, которую оно прочерчивает «в объеме», отклоняется от вертикали тем сильнее, чем больше скорость тела.

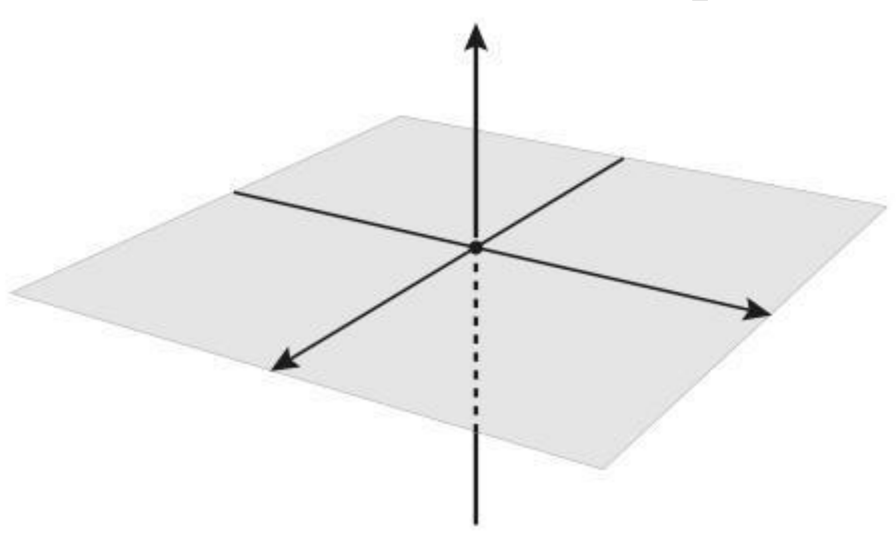


**Рис. 5.3.** Двумерное пространство (горизонтальный лист), к которому «приделано» время (вертикальная ось). Каждое тело, находящееся в этом двумерном пространстве, описывает линию по мере того, как течет время. Линия вертикальна, если тело не движется, и образует тем больший угол с вертикальным направлением, чем с большей скоростью тело движется в

пространстве

## *Движение в пространстве — гиперболический поворот в пространстве-времени*

## *Разделение пространства-времени на пространство и время относительно*

К временнóй координате при этом предлагается относиться (почти) как к пространственной. Главная польза от такого взгляда состоит в том, что картины мира различных наблюдателей, движущихся относительно друг друга, оказываются связанными *поворотами*. Это повороты в «объеме», изображенном на рис. 5.3; но из-за того, что время — это все-таки *не совсем* пространство, этот поворот имеет странности: он происходит не так, как обычный поворот на рис. 5.4 слева, а так, как показано там же справа. Такие повороты называются гиперболическими; математически они *очень* похожи на обычные повороты, и я буду иногда опускать слово «гиперболический». Каждый такой поворот вовлекает временное направление и то пространственное направление, вдоль которого один наблюдатель движется относительно другого. На рис. 5.3 ось времени проведена перпендикулярно пространству, но в действительности угол, под которым встречаются пространственные направления и временное направление, выглядит различным для наблюдателей, движущихся друг относительно друга. Переход к движению в пространстве с некоторой скоростью по отношению к первоначальному состоянию — это гиперболический поворот в пространстве-времени; его угол определяется скоростью относительного движения — тем, какую долю от скорости света она составляет. Наблюдая за вашей ракетой из своей ракеты, я сделаю вывод, что ваше деление пространства-времени на пространство и время «скособочено» по отношению к моему: то, что вы считаете пространством, включает в себя не только то, что я считаю пространством, но и часть того, что я считаю временем. Вы же не будете замечать ничего «повернутого» в своем пространстве-времени, но посетуете, что разделение на пространство и время оказалось «скособоченным» у меня.

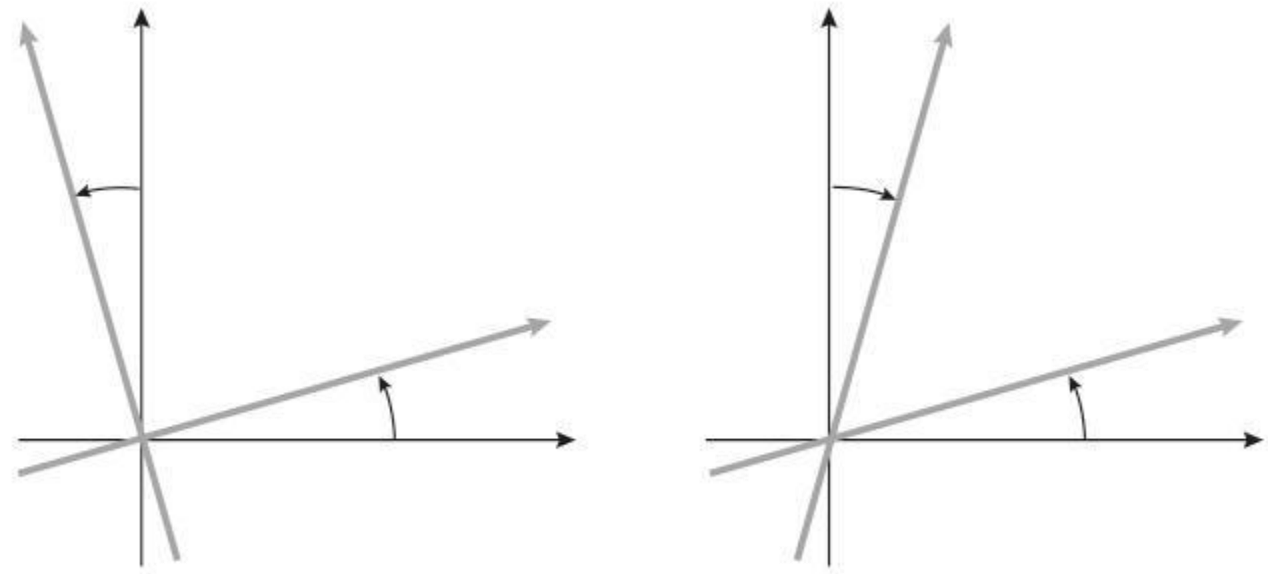


**Рис. 5.4.** *Слева:* обычный поворот в обычном пространстве. Обе оси координат поворачиваются на один и тот же угол в одну и ту же сторону. *Справа:* гиперболический поворот в пространстве-времени. Пространственная координатная ось (исходно горизонтальная) и временна́я координатная ось (исходно вертикальная) поворачиваются на один и тот же угол «навстречу» друг другу

Замедление времени и сокращение длины в направлении движения — это ни больше ни меньше как доступные нашему наблюдению проявления поворотов в пространстве-времени. Точнее, там есть два типа поворотов, одни обычные, а другие гиперболические:

1. Повороты, происходящие целиком только в пространстве (не затрагивающие времени), — это самые обычные повороты. С ними все просто. При поворотах, кстати, сохраняются все расстояния: если, встав сначала лицом к памятнику Пушкину, я сумею принять положение под углом к горизонту или даже лягу на асфальт, то угол, под которым я вижу памятник, изменится, но расстояние от головы фигуры до пят, как и ширина в плечах, останется неизменным. Повороты — это преобразования окружающего мира, не меняющие расстояния.

2. Повороты, затрагивающие время. С их восприятием не все так просто, потому что мы не живем в пространстве-времени: мы живем в пространстве и ощущаем ход времени. Наш способ выполнить поворот, захватывающий время, — это приобрести скорость по отношению к начальному состоянию. То, что сохраняется при таких поворотах, — уже

не расстояния в пространстве и не промежутки времени, а скорость света [81].

Геометрический взгляд на пространство-время подробнее описан в добавлениях к этой прогулке. Тот факт, что два восприятия мира наблюдателями, движущимися относительно друг друга, связаны геометрически, через повороты, — из серии чудес-к-которым-все-привыкли. Смысл понятия «пространство-время» не в простой декларации «добавим временное измерение к трем пространственным», а в первую очередь в геометрической природе различий между длинами, промежутками времени и т.д., которые фиксируют разные наблюдатели одного и того же события или явления. Геометрический взгляд на пространство-время подробнее описан в добавлениях к этой прогулке.

Когда относительные скорости разных наблюдателей малы, разделение пространства-времени на пространство и время практически одинаково для всех наблюдателей. Другими словами, повороты, захватывающие время, происходят только на очень малый, едва заметный угол (этот угол, как мы уже сказали, определяется скоростью). В результате время течет почти одинаково для всех, скорости почти складываются, и вообще все происходит как мы привыкли. Про одинаковое для всех, «абсолютное» время говорят иногда как про ньютоновское время. (Никаких оснований подозревать, что абсолютное время — не точное описание Вселенной, у Ньютона не было; и 150 лет спустя тоже не было. Первые шаги к новому миру сделал Максвелл в 1860-х гг., да и это стало понятно лишь задним числом.) Только при больших относительных скоростях становится видно, что мы живем в мире, где взаимоотношения базовых понятий — пространства и времени — устроены сложнее, чем кажется при взгляде из привычного нам мира малых скоростей.

*****

**Замедление времени как необходимость.** Путь от постулатов Эйнштейна к замедлению времени в зависимости от скорости даже проще, чем путь от законов Ньютона к эллипсам. Идея состоит в том, чтобы использовать световые часы. Это что-то вроде палки для селфи, скажем, длиной в метр (или, например, километр); на одном ее конце — лампа и детектор света, на другом — зеркало. Лампа вспыхивает, свет распространяется до зеркала, отражается обратно и попадает в детектор. Вы стоите на тротуаре, а я еду мимо вас на велосипеде, держа свою «палку для селфи» вертикально. Когда я проезжаю стоп-линию, лампа вспыхивает (событие 1) и свет распространяется «во все стороны». Для нас сейчас важно смотреть вверх. Что вижу я: свет распространяется вдоль палки в моей руке — вертикально вверх, ведь я так держу палку, — затем отражается и снова бежит вдоль палки вниз до детектора, детектор срабатывает (событие 2). От события 1 до события 2 свет два раза пробежал длину палки. Но что видите вы: свет распространяется не точно вертикально из-за того, что мой велосипед движется относительно дороги (и поэтому относительно вас), как это показано на рис. 5.5. Пока свет шел до зеркала, я успел проехать некоторое расстояние, а это значит, что и зеркало сместилось: в момент отражения оно больше не находится точно *над* стоп-линией. Пусть для определенности я проехал по дороге 10 см; после отражения от зеркала свет распространяется к детектору, но за это время я проезжаю еще 10 см, и свет попадает в детектор на расстоянии 20 см от стоп-линии. С вашей точки зрения, свет проделал больший путь от события 1 до события 2 (гипотенуза длиннее катета, рис. 5.5). Осталось только сделать над собой усилие и признать то, что с неизбежностью следует из сформулированных постулатов. Расстояния, пройденные светом, различны с моей и вашей точек зрения, но скорость одна и та же. Где свет успел пройти большее расстояние, там прошло больше времени. Вы заключаете, что, раз с вашей точки зрения свет преодолел больший путь, у вас должно было пройти больше времени, чем у меня на велосипеде [82].

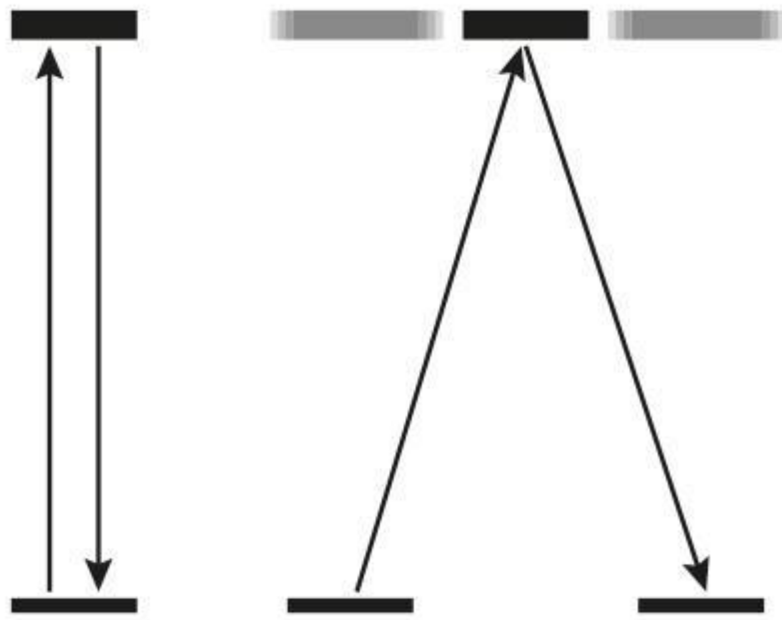


**Рис. 5.5.** «Световые часы». Для того, кто движется вместе с часами, свет распространяется вверх вдоль стержня, отражается от зеркала и идет обратно, к детектору. Траектории вверх и вниз показаны разнесенными для удобства восприятия. Для того, кто наблюдает часы в движении, зеркало и детектор успевают сместиться за время распространения света вдоль стержня

Для того, кто движется, между двумя событиями (испусканием и детектированием света) прошло меньше времени, заключаем мы. Другими словами, для того, кто движется, время течет медленнее. Для скорости настоящего велосипеда это «медленнее» — примерно в 1,0000000-00000001 раза (что отличимо от единицы только в лаборатории при хитром использовании переохлажденных ионов), но для рождаемых в атмосфере мюонов — уже в 10 раз. Для спутников в системах глобальной навигации разница в ходе времени на самом спутнике и у пользователя на Земле из-за движения спутника учитывается при вычислениях в приемнике сигнала на основе информации, приходящей вместе с сигналом. (Разница в ходе времени по другой причине, обсуждаемой на следующих прогулках, учитывается на самих спутниках.) Без поправок на замедление времени никакое такси не приехало бы за вами туда, где вы его ждете.

Из приведенного рассуждения можно количественно (т.е. в виде формулы) определить, в какое в точности число раз замедляется ход времени в зависимости от скорости: точно в такое число раз, в которое один из путей длиннее другого. Это число часто обозначают буквой $\gamma$ (гамма); для каждой скорости гамма вычисляется по несложной формуле. А поскольку дело с ней приходится иметь очень часто, букве гамма дали название «лоренц-фактор», хотя широко распространено и более «народное» наименование — «гамма-фактор». Гамма-фактор, равный единице, отвечает нулевой относительной скорости. Умножение и деление на единицу и в самом деле ничего не меняют. По мере увеличения скорости гамма-фактор возрастает, сначала очень медленно, но, когда скорость приближается к скорости света, гамма-фактор растет быстро и неограниченно. Тот же гамма-фактор определяет, во сколько раз короче оказываются продольные длины (вдоль направления движения). Если вы каким-то образом измерите длину летящей мимо вас ракеты (от носа до кормы, если ракета летит так, как обычно рисуют летящую ракету), а затем дождетесь, пока она остановится рядом с вами, и измерите ее снова, то данные двух ваших измерений разойдутся в $\gamma$ раз.

Космические корабли «Аполлон» выходили на курс к Луне со скоростью от примерно 37 500 до почти 39 000 км/ч относительно Земли. Это менее 0,00004 скорости света; гамма-фактор равен 1,00000000065, и замедление времени в такое число раз совершенно пренебрежимо для взаимодействия астронавтов с центром управления полетом [83]. Зато протоны в Большом адронном коллайдере (рис. 5.6) попадают в большое кольцо со скоростью, составляющей 0,999997828 скорости света: до скорости света им недостает 651,149 м/с, а гамма-фактор близок к 480; после ускорения в кольце протоны достигают 0,999999991 скорости света — до нее остается 2,698 м/с, а гамма-фактор уже близок к 7500. Богатый опыт проектирования ускорителей элементарных частиц и работы на них — одно из систематически воспроизводимых (и очень точных) экспериментальных подтверждений специальной теории относительности.

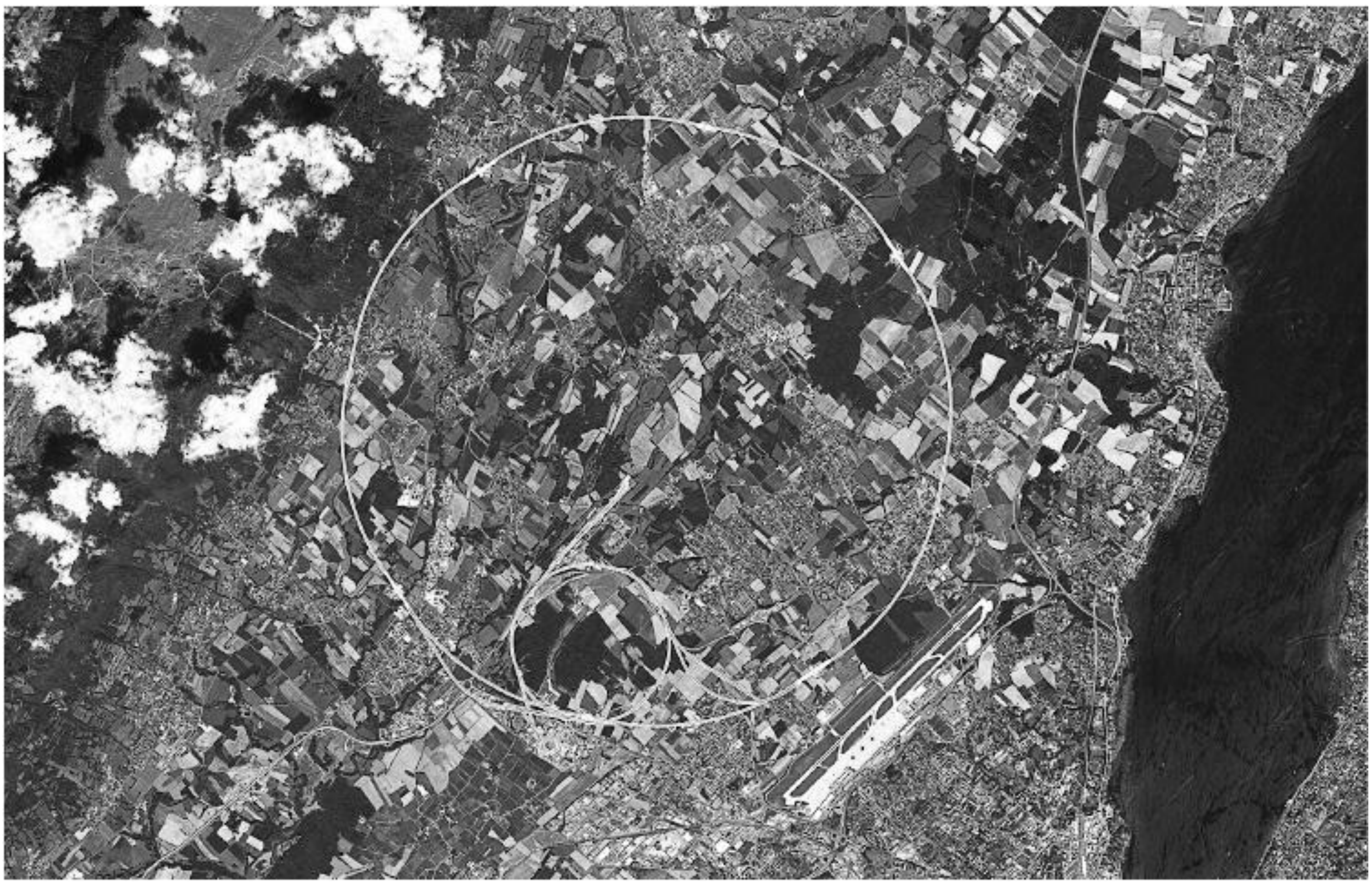


**Рис. 5.6.** Контур Большого адронного коллайдера, наложенный на фото местности. Слева — горы Юра (Франция), справа — Женевское озеро (Швейцария). Видна взлетно-посадочная полоса аэропорта Женевы. Кольца ускорителя находятся в туннеле под землей, длина большого кольца — 26 659 м. За одну секунду пучок протонов проходит по нему более 11 000 раз

*****

**Сверхколлайдер: догнать свет.** Но что произойдет с ходом времени (да и с продольными длинами), если ракета летит не со скоростью, равной 0,9999999999 скорости света, а *точно* со скоростью света? А если ракета разогналась до скорости света, то, значит, весь мир летит ей навстречу с такой же скоростью: как же этот мир будет выглядеть глазами экипажа? Попробуем, впрочем, быть реалистами: с производством быстрых ракет не все пока налажено в практическом плане, поэтому потренируемся на том, что мы действительно умеем разгонять, — на протонах. В Большом адронном коллайдере, как мы видели, протонам остается до скорости света сущая ерунда, меньше трех *метров* в секунду; что же мешает их преодолеть?

*Сократить* их, скажем, до полутора метров в секунду мешает отсутствие бюджета на более мощный ускоритель. Но в попытках полностью *преодолеть* оставшийся метр-с-небольшим в секунду мы обречены на проигрыш — из-за бюджета более фундаментального, чем любой национальный или «всеземной». Из-за бюджета энергии.

С движением связан вид энергии, за которым закрепилось название греческого происхождения: *кинетическая* энергия. На этих прогулках я говорю о ней просто как об энергии движения. В привычном нам мире — т.е. при малых скоростях — это те самые «пополам», а именно эм-вэ-квадрат-пополам ($mv^2/2$; $m$ — масса, а $v$ — скорость того, что движется). При увеличении скорости в два раза энергия движения возрастает в четыре раза, при увеличении скорости в три раза — в девять и т.д. Если бы так продолжалось и при скоростях, приближающихся к скорости света $c$, то разгон протона до этой скорости потребовал бы количество энергии, которое не так сложно было бы обеспечить. Но энергия движения зависит от скорости таким простым образом только при малых скоростях. На самом же деле взаимоотношения материи, движения и энергии более интересные.

Прежде всего энергия связана не только с движением, а со *всем без исключения*. Все, что имеется во Вселенной, несет в себе энергию, а все то, что с этим происходит, непременно включает передачу энергии или превращение ее из одной формы в другую. Главное свойство энергии в том, что она сохраняется. Она превращается из одной формы в другую, но не может исчезнуть или взяться из ниоткуда [84]. Чтобы протон быстро двигался, надо откуда-то взять необходимую энергию и передать ее протону. Большой адронный коллайдер (рис. 5.6) называется большим, потому что только на достаточно большой протяженности удается установить все те устройства, которые передают энергию протонам (кстати, черпая ее из электросети) [85].

На сцене опять появляется гамма-фактор (он, собственно, никуда уходить и не собирался). Правильное выражение для энергии движения, заменяющее те самые эм-вэ-квадрат-пополам, содержит гамма-фактор, а он ведет себя максимально несдержанно по мере приближения скорости к скорости света — становится сколь угодно большим. Из-за этого для продолжения разгона любого объекта требуется организовать передачу ему все большего и большего количества энергии. Пока протон, с той или иной степенью условности, покоится у нас в лаборатории, его энергия движения равна, конечно, нулю. Возьмемся разгонять его, приближаясь к скорости света *c* последовательными шагами. Сначала пожелаем, чтобы он двигался со скромной скоростью 1/2 *c*. Такое желание обернется для нас необходимостью снабдить протон энергией, которая в некоторых единицах, принятых среди тех, кто «занимается протонами», выражается как 0,145 Гэ В. Странное сочетание заглавных и строчных букв, обозначающее гигаэлектронвольты, выглядит довольно коряво, и до конца этого абзаца я просто не буду их явно указывать; нам важны не они, а появившееся число, чтобы сравнивать его с другими числами, которые сейчас возникнут. Итак, если мы нашли способ передать протону эти 0,145 (где уже заметно отличие от правила «эм-вэ-квадрат-пополам», которое дало бы 0,117), мы пройдем полдороги до скорости света; остается еще половина, 1/2 *c*. Пройдем половину оставшегося, чтобы до скорости света недоставало 1/4 *c*. Энергия движения такого более быстрого протона окажется в три с лишним раза большей — около 0,480, и эту недостающую энергию протону надо передать. Далее снова сократим отставание от света вдвое (до 1/8 *c*), затем еще раз вдвое (до 1/16 *c*), продолжая накачивать энергию в движение протона. После десяти таких уполовиниваний «недостача» до скорости света составит $1/2^{10}$ *c* (что вообще-то все еще не так мало — 292,8 км/с), но для этого понадобится снабдить протон энергией, равной 20,29. После следующих десяти уполовиниваний, когда до скорости света недостанет $1/2^{20}$ *c* (а это уже 286 *метров* в секунду), энергия движения равна 678,2. Задача передать протону такую энергию вообще-то давно решена, потому что наш протон пока еще медленнее тех, которые разгоняются в Большом адронном коллайдере, но давайте поработаем еще лучше и разгоним протон так, чтобы он отставал от света всего на $1/2^{30}$ *c* (28 *сантиметров* в секунду); это уже быстрее, чем в коллайдере, и требуемая энергия равна 21 733. Ну а если до скорости света недостает

$1/2^{40}$ $c$ (около четверти миллиметра в секунду), то энергия движения протона — почти 700 000. Это (ах, если бы!) в сто раз больше, чем энергия движения, которую получают протоны в Большом адронном коллайдере. А далее микроскопические прибавки к скорости требуют энергии, исчисляемой в тех же единицах многими миллионами, миллиардами и т.д.; собственно, уже не так важно, в каких единицах эта энергия исчисляется, коль скоро она делается *произвольно* (сколь угодно) большой.

### *Непреодолимый барьер на пути к скорости света — энергия движения*

Для того чтобы разогнаться до скорости света, всегда не хватает энергии. Другими словами, свойства движения в нашей Вселенной таковы, что разогнаться до скорости света невозможно. Вся схема знания, выводимая из двух фундаментальных высказываний приведённых ранее, организована внутренне согласованным образом. В частности, невозможность разогнаться до скорости света получает некоторое «объяснение» — ответ на вопросы типа «Вот вы говорите, что нельзя. Но если я попробую, что мне помешает? Меня же не остановит какая-то неведомая сила?». Нет, не сила, а неограниченное возрастание энергии движения при приближении к скорости света. Это, если угодно, «обеспечительный механизм» запрета [86].

А как же тогда сам свет? Ему как удается разогнаться? На самом деле не удается. Проблема «разогнаться» для него отсутствует: он может существовать только в состоянии движения со скоростью $c$; он *рождается* в этом состоянии и никогда не останавливается [87]. Вообще, имеется два класса движения в нашей Вселенной, один «богатый», другой «скудный», хотя и с оттенком надменности:

1. Движение с разнообразными скоростями $0 \leq v < c$ — от нуля и выше, но строго меньше скорости света: ничто из того, что способно остановиться относительно какого-либо наблюдателя, не может двигаться со скоростью света. При этом разные наблюдатели будут фиксировать разные скорости такого объекта. Это удел всех *тел* и тех

элементарных частиц, про которые говорят еще, что у них ненулевая масса покоя.

2. Движение всегда и только со скоростью *c*, и тогда уж (вот она, надменность света!) с одной и той же скоростью относительно всех наблюдателей. В нашей Вселенной с такой скоростью путешествуют два явления: электромагнитные волны в пустоте и гравитационные волны (которые еще встретятся нам на следующих прогулках). *Свет* в повседневном смысле слова — это электромагнитные волны в некотором интервале длин волн. Поскольку слово «свет» намного короче, чем словосочетание «электромагнитная волна», часто говорят «свет», имея в виду электромагнитные волны в целом. В терминах же фундаментальных составляющих материи — элементарных частиц — со скоростью света обречены распространяться все те из них, у кого нулевая масса покоя, а из известных нам частиц это только фотоны («частицы света», окружающие нас повсюду) и глюоны (переносчики сильного ядерного взаимодействия, которые, однако, *не* распространяются свободно по Вселенной).

### *У света нет POV*

Важное следствие: нет (не может быть!) наблюдателя, движущегося со скоростью света. У света нет того, что в кино и на телевидении называют POV (*point of view*, «точка восприятия»). Это тот самый гипотетический наблюдатель, размышление о котором озадачивало юного Эйнштейна: каким образом этот наблюдатель воспринимал бы свет? Видел ли бы он себя в зеркале, держа это зеркало в руке? Отвечать на эти вопросы, как оказалось, не требуется, потому что такого наблюдателя не существует. Вопрос, который мы задали чуть выше, о том, как выглядела *бы* световая ракета с точки зрения всех остальных наблюдателей и как выглядел *бы* мир с борта такой ракеты, не нуждается в ответе, потому что это вопрос о том, чего не бывает *в принципе*.

*Километр времени — около 3,3 микросекунды*

Наличие максимальной и абсолютной скорости — часть «системы», определяющей, как связаны между собой материя, энергия и движение. Скорость *c* = 299 792,458 км/с — это нечто большее, чем скорость некоторого конкретного явления: это мировая постоянная, выражающая неотъемлемое качество нашей Вселенной и во многом определяющая, как эта Вселенная устроена. Она, кстати, дарит нам некоторую (не побоюсь сказать, *вселенскую*) общность со всеми, кто, быть может, живет на какой-нибудь планете в далекой-далекой галактике: нам несложно объяснить им, с какой скоростью Земля вращается вокруг Солнца. Все, что требуется, — это сообщить тамошним ученым, какую долю от скорости света она составляет (примерно 0,0001). Они сами, давая интервью своим журналистам, переведут это в понятные для их публики единицы. Работает это, конечно, потому, что *c* — одна на всех. Заодно *c* — еще и способ перевода единиц измерения времени в единицы измерения пространства. Имея дело с пространством-временем, пользоваться разными единицами измерения для разных направлений в нем удобно в той же степени, как измерять длину и ширину в метрах, а высоту в футах (как быть, если вы *наклонили* шкаф?!). *Километр времени* — это время, за которое свет преодолевает один километр (поэтому 300 000 километров времени — это около 1 секунды). Чаще, впрочем, измеряют не время в километрах, а, наоборот, расстояния в годах, днях, минутах или секундах; эти *расстояния* называют для ясности световыми годами, днями, минутами и секундами. Световой год — это расстояние, которое свет проходит за год; световая минута — расстояние, которое свет проходит за минуту; и так далее. Все, что требуется, — это умножить скорость света на выбранную продолжительность времени [88].

*****

**Движение, энергия и масса.** Гамма-фактор вторгся в выражение для энергии движения и не дает разогнаться; он зависит от скорости движущегося тела в сравнении с абсолютной скоростью *c*: крайне слабо откликается на малые скорости движения, но сходит с ума, когда скорости приближаются к скорости света. Это поведение отражается и на энергии движения. Появление там гамма-фактора следует из тех же двух фундаментальных принципов, приведенных ранее в главе. В рассуждениях имеется важный промежуточный шаг, для начала устанавливающий наличие энергии во всяком *покоящемся* теле; ее количество выражается Самой знаменитой формулой всех времен $E = mc^2$. На следующем шаге удается вывести, какова полная энергия движущегося тела, и тогда разность между энергией движущегося и покоящегося тела и дает его энергию движения; она и в самом деле содержит гамма-фактор и поэтому сходит с ума вместе с ним, но при малых скоростях с высокой точностью совпадает с тем, что было известно Ньютону. Речь здесь всегда идет об энергии тела «самого по себе» — покоящегося или движущегося, но не вступающего во взаимодействия с другими телами. В мире Ньютона в этом качестве фигурирует только энергия движения, но из постулатов Эйнштейна вытекает еще и наличие энергии у покоящегося тела! Основной способ выведения следствий из фундаментальных положений — математика, часто в соединении с мысленным экспериментом. Один мысленный эксперимент мы проделали с велосипедом (который вполне мог быть и ракетой, пролетающей мимо космической базы; во всех таких рассуждениях не имеет никакого значения, как физически реализовать ту или иную конфигурацию, если она *в принципе* возможна). Сходным образом из двух постулатов *выводится* знание об энергии. Выводится, точнее говоря, из постулатов *и* очень общих высказываний об устройстве Вселенной — законов сохранения.

С ньютоновских времен про энергию движения (*vis viva*, «живую силу», как ее называли тогда и *иногда* называют и теперь) было известно, как она зависит от скорости — тем самым способом «эм-вэ-квадрат-пополам». Ответ на вопрос, *почему* именно так, а не иначе, можно давать или экспериментально, или теоретически, или соединяя рассуждения и наблюдения, но в любом случае главное в том, что полная энергия *сохраняется*, если для энергии движения использовать выражение $mv^2/2$, а не какое-то другое. Но это для малых скоростей, в непосредственно окружающем нас ньютоновском мире. Эйнштейн задался вопросом о том, каким должно быть выражение для энергии, если она сохраняется в мире, где есть абсолютная скорость и где работает принцип относительности. Энергия должна сохраняться в любой череде событий, причем для всех наблюдателей независимо от их (равномерного) движения относительно системы, в которой эти события происходят.

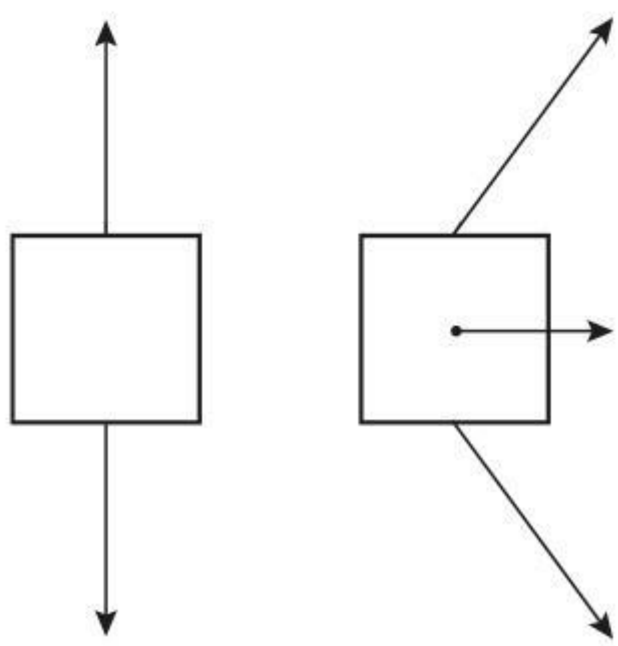


**Рис. 5.7.** Эквивалентность массы и энергии следует из абсолютности скорости света, принципа относительности и законов сохранения. В рассуждениях используется ящик с лампой, излучающей свет в двух противоположных направлениях. *Слева*: картина с точки зрения наблюдателя, покоящегося относительно ящика. *Справа*: относительно наблюдателя, движущегося влево: для него ящик движется вправо, а направления, вдоль которых излучается свет, не противоположны друг другу. Свет уносит вправо некоторое количество движения, следовательно, количество движения ящика после вспышки должно стать меньше, чем до вспышки. Но скорость ящика не меняется при вспышке, как видно из сравнения с картиной для неподвижного наблюдателя. Следовательно, уменьшается масса ящика

В качестве «череды событий» предлагается несложный мысленный эксперимент с системой, которая состоит из ящика с лампой. Лампа вспыхивает и излучает свет, который уносит из ящика некоторую энергию. На все это предлагается взглянуть двум наблюдателям: один покоится относительно ящика, а другой движется (рис. 5.7). Главное, как всегда, в том, что свет от лампы имеет для них одну и ту же скорость, но для движущегося наблюдателя траектория света приобрела наклон (как и в случае с велосипедом). В рассуждениях необходимо использовать не только сохранение энергии, но и сохранение количества движения — для света оно пропорционально его энергии, что составляет отдельное знание, ради получения которого Эйнштейну пришлось отдельно потрудиться. В итоге выясняется, что законы сохранения «сходятся», только если вместе с энергией света $E$ из ящика ушла масса, равная $E/c^2$: излучив энергию, ящик должен «похудеть». При желании можно продолжать «исчерпывать» массу ящика, отправляя электромагнитные волны. Поскольку о свойствах ящика и лампы совсем ничего не предполагалось, мы заключаем, что каждая масса $m$ несет количество энергии, равное $mc^2$:

$E = mc^2$. (5.1)

Множитель $c^2$ — скорость света в квадрате, т.е. умноженная сама на себя, — это *не* про скорость этой массы; в этой формуле от массы вообще требуется, чтобы она покоилась относительно наблюдателя — того, который обнаружит в ней количество энергии, равное $mc^2$; оно и называется энергией покоя. Наблюдатель же, относительно которого масса движется, обнаружит в ней энергию, определяемую более общим выражением, которое включает в себя еще и количество движения и которое приведено в добавлениях к этой прогулке. Оно верно всегда, а не только для покоящихся тел, а кроме того, приложимо не только к «телам» (к тому, что может остановиться), но и к самому свету. Для тел же оно позволяет найти разницу между полной энергией движущегося и покоящегося тела; так и получается выражение для энергии *движения*. Увы, более общая формула для связи энергии, массы и количества движения (ищите ее в добавлениях!) далеко не столь знаменита, как формула (5.1).

Квадрат скорости света в формуле $E = mc^2$ — это переводной коэффициент между двумя единицами: килограммами и джоулями. Когда килограмм выбрали в качестве единицы измерения массы, никто не подозревал, что масса и энергия — это одно и то же. А поскольку для энергии традиционно выбрали свои единицы (те самые джоули), нужно знать, сколько в килограмме массы содержится джоулей. Вот, оказывается, сколько: 89 875 517 873 681 764. Это 21,481 мегатонны в тротиловом эквиваленте — *большая* энергия, если каким-то образом перевести ее из «спящего» состояния в виде одного килограмма вещества в другую, «деятельную» форму, позволяющую энергии более явно проявить себя (среди таких проявлений — что-нибудь разогнать, или взорвать, или, скажем, просто нагреть). Такой способ есть, хотя и требует серьезной подготовки. Нужно создать запас антивещества — вещества, состоящего из элементарных частиц, своеобразным образом «противоположных» тем, которые нас окружают: все заряды (например, электрический заряд) античастиц противоположны зарядам соответствующих частиц, но масса в точности такая же. Взаимодействие частицы и античастицы приводит к выделению света; ничего другого от частиц не останется, а энергия, которую унесет свет, равна $2mc^2$, где $m$ — это масса частицы, а двойка появилась потому, что исчезают и частица, и ее античастица такой же массы. Если речь идет о сколько-нибудь макроскопическом количестве антивещества, то «выделение света» будет в гораздо большей степени походить на взрыв, чем на включение лампы. Неважно, из чего состоит кусок антивещества — из атомов антиалюминия или антиводорода. Слагающие его антипротоны, антинейтроны и антиэлектроны (которые называются позитронами) найдут себе пары из числа окружающих протонов, нейтронов и электронов. Взяв 1 г антивещества и приведя его в контакт с окружающим веществом, получим выделяемую мощность около 43 килотонн в тротиловом эквиваленте — это небольшая, по современным меркам, ядерная бомба; но это один *грамм*, а килограмм приблизит мощность вспышки к «Царь-бомбе».

С антивеществом, впрочем, есть две проблемы: его неоткуда брать и его совершенно негде хранить. Всех антипротонов, произведенных на ускорителях для исследования их свойств, не наберется и на сотню нанограммов, и каждый нанограмм стоит немалых денег уже из-за одной только потребляемой электроэнергии, не говоря уже о постройке ускорителя (да и о зарплате для персонала). Антиматерия — самое дорогое вещество, причем с колоссальным отрывом от второго места. И это только в отношении затрат на ее производство. Дополнительные сложнейшие ухищрения требуются для того, чтобы удержать единичные атомы антиводорода (антипротон плюс позитрон) от аннигиляции в течение, скажем, десятка или десятков минут; антипротон норовит принять участие в аннигиляции при первом же контакте с протоном из стенки «сосуда»-ловушки или из оставшегося там даже очень разреженного воздуха, полностью игнорируя ваши намерения употребить его в дело тогда, когда вам будет нужно.

### *Солнце светит, превращая вещество в энергию*

Кроме аннигиляции, есть намного более *сдержанный* способ превращения энергии из массы в более «деятельную» форму (излучение). Этот способ не требует антивещества, и он замечателен тем, что благодаря ему мы и существуем. Энергия, которой светит Солнце и другие звезды, выделяется в виде света из-за переупаковки — соединения меньших атомных ядер в большие, сопровождаемого *дефектом массы*. Солнце состоит в основном из водорода, существующего там в виде отдельных протонов и электронов. Четыре протона, претерпев для этого некоторые превращения, соединяются в альфа-частицу — прочную упаковку четырех частиц (двух протонов и двух нейтронов). Ключевое обстоятельство в том, что масса альфа-частицы меньше, чем четыре массы протона, и образование каждой альфа-частицы сопровождается выделением энергии 0,0257 ГэВ, которая в точности равна этой «потерянной» массе, умноженной на квадрат скорости света. Так Солнце и светит. Каждую секунду оно теряет 4,27 млн тонн своей массы, превращая их в энергию, которую уносит в основном свет (два с небольшим процента забирают нейтрино; Солнце теряет массу и из-за солнечного ветра, но это совсем другая история). Это, вероятно, самый важный для нас на Земле пример того, как «работает» соотношение (5.1). Поскольку протон — это ядро атома водорода, а альфа-частица — ядро атома гелия, часто говорят, что Солнце светит за счет превращения водорода в гелий. (В этом процессе немало подробностей, и наиболее животрепещущие нам еще предстоит обсудить на прогулке 10.)

| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 13 | 14 | 15 | 16 | 17 | 18 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 1 | 1 H | | | | | | | | | | | | | | | | | 2 He |
| 2 | 3 Li | 4 Be | | | | | | | | | | | 5 B | 6 C | 7 N | 8 O | 9 F | 10 Ne |
| 3 | 11 Na | 12 Mg | | | | | | | | | | | 13 Al | 14 Si | 15 P | 16 S | 17 Cl | 18 Ar |
| 4 | 19 K | 20 Ca | 21 Sc | 22 Ti | 23 V | 24 Cr | 25 Mn | 26 Fe | 27 Co | 28 Ni | 29 Cu | 30 Zn | 31 Ga | 32 Ge | 33 As | 34 Se | 35 Br | 36 Kr |
| 5 | 37 Rb | 38 Sr | 39 Y | 40 Zr | 41 Nb | 42 Mo | 43 Tc | 44 Ru | 45 Rh | 46 Pd | 47 Ag | 48 Cd | 49 In | 50 Sn | 51 Sb | 52 Te | 53 I | 54 Xe |
| 6 | 55 Cs | 56 Ba | | 72 Hf | 73 Ta | 74 W | 75 Re | 76 Os | 77 Ir | 78 Pt | 79 Au | 80 Hg | 81 Tl | 82 Pb | 83 Bi | 84 Po | 85 At | 86 Rn |
| 7 | 87 Fr | 88 Ra | | 104 Rf | 105 Db | 106 Sg | 107 Bh | 108 Hs | 109 Mt | 110 Ds | 111 Rg | 112 Cn | 113 Nh | 114 Fl | 115 Mc | 116 Lv | 117 Ts | 118 Og |
| | | | | 57 La | 58 Ce | 59 Pr | 60 Nd | 61 Pm | 62 Sm | 63 Eu | 64 Gd | 65 Tb | 66 Dy | 67 Ho | 68 Er | 69 Tm | 70 Yb | 71 Lu |
| | | | | 89 Ac | 90 Th | 91 Pa | 92 U | 93 Np | 94 Pu | 95 Am | 96 Cm | 97 Bk | 98 Cf | 99 Es | 100 Fm | 101 Md | 102 No | 103 Lr |

**Рис. 5.8.** Других элементов у нас нет. «Личность» каждого элемента определяется зарядом его ядра. Не все ядра одинаково устойчивы; элементы начиная с номера 95 созданы искусственно и имеют срок жизни от короткого до очень короткого (некоторые из элементов с меньшими номерами встречаются на Земле только в следовых количествах и в основном тоже синтезируются искусственно)

Солнце *не* исчерпает свою массу, светя «до собственного исчезновения». Оно истратит на излучение лишь малую долю массы, когда в его ядре — там, где из-за высокой температуры и давления только и могут образовываться альфа-частицы, — останется мало одиноких протонов. Солнце, и вообще любая звезда типа Солнца, тогда начнет «путешествие» по Периодической таблице элементов (рис. 5.8), последовательно производя элементы из ее начала вплоть до железа, располагающегося там под номером 26. Дальнейшие слияния порождают такие ядра, что их масса *больше* массы «полуфабрикатов», а это значит, что энергии за счет переупаковки уже не получить. Ресурс дефекта массы исчерпан, железные звезды больше не светят как водородно-гелиево-углеродно-неоново-магниево-кремниевые; если они не слишком массивные, с ними ничего больше не происходит (в противном же случае происходят, наоборот, впечатляющие катастрофы). Специальная теория относительности сама по себе не отвечает за то, какими в точности энергиями обладают разнообразные упаковки протонов и нейтронов в атомные ядра, и за то, какие именно более крупные упаковки оказываются менее массивными, чем набор их составных частей; но она объясняет, что «потерянная» масса может стать энергией. Этой энергией и светят септиллионы звезд.

Ближе к концу Периодической таблицы снова появляются возможности использовать дефект массы, но «в другую сторону». Взаимодействие большого числа протонов и нейтронов устроено так, что крупные упаковки могут быть массивнее, чем сумма их осколков, и на этот раз для извлечения энергии надо не соединять, а делить ядра. Выход энергии при этом меньше, чем при слиянии (причина, по которой «обычная» ядерная — «атомная» — бомба заметно уступает по мощности водородной), но это та самая возможность, открытие которой потрясло физиков в начале 1939 г., а затем мир в августе 1945-го.

### *Новые частицы рождаются в ускорителях из энергии движения*

Превращение, наоборот, энергии в массу — это то, что постоянно происходит в ускорителях/коллайдерах. Большая энергия движения там нужна для того, чтобы из нее возникали новые элементарные частицы. Буквально «самая знаменитая формула» здесь, впрочем, не подходит, и надо пользоваться более общей, но менее знаменитой формулой (см. добавления к этой прогулке), учитывающей вклад количества движения в энергию. Столкновение двух протонов может породить *еще две* частицы с массой протона — протон и антипротон, если только все сойдется с балансом энергии: энергия движения двух сталкивающихся протонов должна быть не меньше, чем два раза по 0,938 ГэВ — такова масса протона, умноженная на $c^2$. Масса бозона Хиггса, выраженная в энергетических единицах, — около 125 ГэВ, и шансы на его рождение при столкновении двух протонов появляются не раньше, чем быстрое движение сообщит им столько энергии в дополнение к их собственным $mc^2$ на каждого [89].

*****

**Будущее, прошлое и безразличное.** Если на секунду представить себе, что вы покупаете вселенные в коробках, то наша Вселенная продается *только* с опцией «имеется максимальная скорость», и это *системная* опция, которую нельзя открутить никаким «взломом». Мы живем в мире со встроенным ограничением скорости (рис. 5.9), причем сама предельная скорость «понимается всеми участниками движения одинаково» — имеет одно и то же значение независимо от относительного движения наблюдателей. Это ограничение часто формулируют как «ничто не может двигаться быстрее света». Квалифицированное употребление этой фразы предполагает, что речь идет о движении чего угодно, но только такого, что может являться *сигналом* из одного места в другое; «сигнал» здесь надо понимать максимально широко, как все, что переносит энергию или информацию. (Информация сама по себе — довольно абстрактное понятие, но у любой конкретной информации есть материальный носитель. Поэтому всякая передача информации требует передачи энергии в том или ином виде.) Из наличия максимальной скорости сигнала заодно следует, что не существует «абсолютно твердых» тел: невозможен стержень, который мгновенно передает отклик, скажем, от удара по одному своему концу на другой конец. Скорость света — это максимальная скорость передачи любого *воздействия*.


**Рис. 5.9.** «Зона ограничения скорости» распространяется на всю Вселенную, наличие максимальной и абсолютной скорости встроено в структуру пространства-времени. Эту скорость можно, конечно, выражать в различных единицах; с неплохой точностью она составляет 186 282 мили

в секунду (дорожные службы немного перестраховались)

Это влияет на концепцию будущего и прошлого, да и настоящего. Здесь сильно помогает привилегия взглянуть на пространство-время со стороны, как на рис. 5.3. При этом в качестве наблюдателя изнутри Вселенной я помещаю самого себя в точку пересечения координатных осей. Тогда горизонтальный лист — это пространство, существующее в один момент времени с моим «сейчас». Но, *глядя на мир в качестве наблюдателя изнутри Вселенной, я вижу не это пространство*! Я вообще ничего не могу знать о событиях в нем, потому что свет приходит ко мне *не* так, как показано на рис. 5.10 слева, а так, как показано там же в центре. Ситуация слева означала бы мгновенное распространение сигнала: он послан и получен в один и тот же момент времени. В действительности же требуется время, чтобы свет добрался от источника до получателя. Мгновенную «сферическую панораму», которую я делаю в данный момент времени, формирует как свет, испущенный недавно поблизости от меня, так и свет, испущенный давно и далеко. Просто открывая глаза, мы видим не пространство само по себе, а результат все более глубокого, по мере удаления, «вдавливания» пространства в прошлое время (на рис. 5.10 — всё ниже). Свет, приходящий к нам через расстояние в 300 000 километров, несет информацию о том, что случилось на 300 000 километров времени в прошлом (т.е. примерно секунду назад). Галактику на расстоянии 5 миллиардов световых лет мы видим такой, какой она была 5 миллиардов лет назад (и далекие галактики действительно демонстрируют черты молодых, недавно сформировавшихся галактик). Космический телескоп «Хаббл» — работающая машина времени, а космический телескоп JWST на наших глазах готовится стать еще более впечатляющей машиной времени.

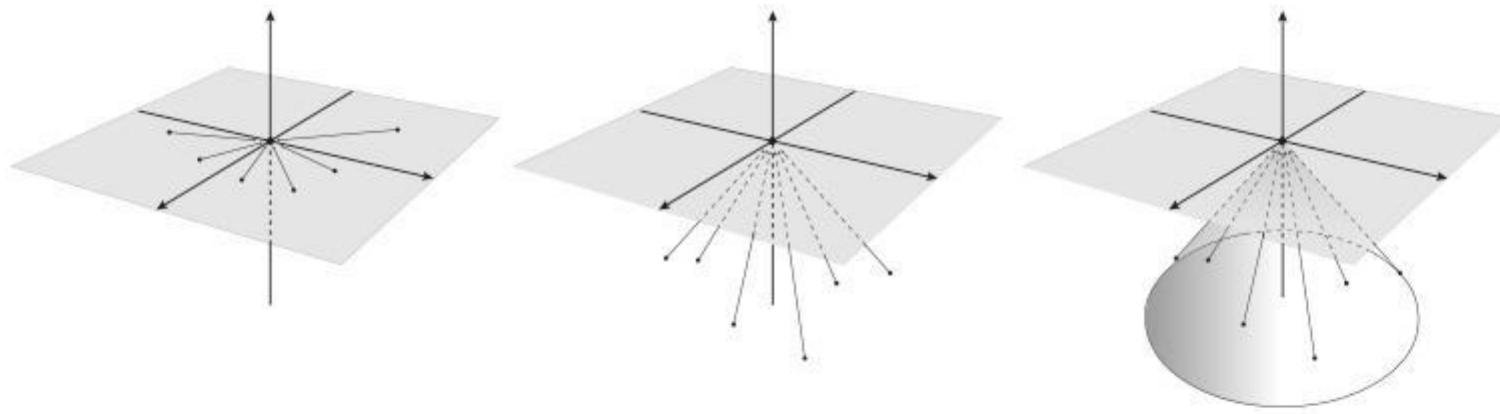


**Рис. 5.10.** Свет приходит к наблюдателю не из других точек пространства «сейчас» (*слева*), а из точек/событий в пространстве-времени, которые настолько же удалены в прошлое, насколько они далеки в пространстве (*в центре*). Все они образуют в пространстве-времени коническую поверхность, называемую световым конусом прошлого (*справа*). Угол между образующей конуса и плоскостью определяется скоростью света и равен 45°, если для измерения промежутков времени и расстояний в пространстве используются одни и те же единицы

### *Мы видим не само пространство, а его погружение в прошлое время*

Все явления/события, которые вы видите прямо сейчас, только-только успели «дотянуться» до вас самым быстрым из возможных сигналов — световым. Внутри пространства-времени они образуют поверхность конуса, как показано на рис. 5.10 справа. Вершина конуса в точке пересечения координатных линий — это ваше здесь и сейчас, а каждая точка на его поверхности отдалена от вас в прошлое ровно настолько, насколько она удалена от вас в пространстве. Эта поверхность *и есть наблюдаемая сейчас Вселенная* (в реальности она содержит еще одно пространственное измерение). Внутренность же конуса составляют все события, о которых вы могли узнать вчера, или год назад, или когда-нибудь еще *до* настоящего момента. Весь конус описывает ваше *абсолютное прошлое*, потому что каждая точка там могла бы быть событием, способным повлиять на вас к текущему моменту. А все то, что снаружи конуса, находится слишком далеко в пространстве по сравнению с отдалением в прошлое, чтобы успеть сообщить вам о своем существовании. Это ваше *безразличное* прошлое; на вас никак не может сказаться то, что происходит в тех в точках пространства-времени, расстояние до которых больше их удаления от вас в прошлое. Вы их вообще не видите и ничего о них не знаете; *их нет* для вас в вашем «сейчас» (позже, когда свет от них дойдет к вам, вы узнаете, что, оказывается, они были, и тогда они попадут в ваше абсолютное прошлое).

Будущее тоже бывает разным; не в смысле более светлое или, наоборот, с налетом апокалиптичности, а в смысле абсолютное и безразличное. То будущее, в котором вы в принципе можете очутиться или по крайней мере на которое можете повлиять, — это все те события, которые находятся ближе к вам в будущем времени, чем отстоят от вас в пространстве. Если речь идет о чьем-то дне рождения ровно через месяц, то поздравить виновницу торжества вовремя удастся, только если она находится от вас на расстоянии не больше одного светового месяца. Если расстояние — точно световой месяц, то ваш единственный шанс — виртуальная открытка, переносимая электромагнитной волной («светом»). Свет определяет *границу* зоны вашего влияния: эту границу составляют все те события, до которых от вас в точности столько световых лет (световых дней, световых часов, световых минут, …) в пространстве, сколько лет (дней, часов, минут, …) в будущее (рис. 5.11). Повлиять на них вы можете, только если отправите туда свет прямо сейчас (например, зажигая красную или зеленую лампу, вы можете передать информацию «стой» или «иди» на вверенный вам космический перекресток). Но, кроме того, в пространстве-времени, как мы видим, пользуясь присвоенной себе привилегией наблюдать его со стороны, есть множество событий, которые еще не наступили для вас, честно расположившегося в вершине конуса, но повлиять на которые вы не в состоянии, потому что даже свет не успеет до них дойти. Один месяц по времени до дня рождения и 32 световых дня в пространстве до именинницы — и вы опоздали с поздравлением; вашу репутацию уже ничто не спасет, кроме, быть может, запоздалых объяснений, что против вас были фундаментальные законы Вселенной. В некотором роде такое будущее — уже не совсем будущее: не так уж важно, случится или уже случилось такое событие, раз нет способа на него повлиять. Оно и называется *безразличным* будущим.

Безразличность взаимна. Если невозможен сигнал от А к Б, то в пространстве-времени, которое мы здесь обсуждаем, невозможен и сигнал от Б к А. Квалификация безразличного кажется мне более важной, чем отнесение к «прошлому» или «будущему». Деление безразличного на прошлое и будущее вообще условно: *временной порядок* событий в безразличном *зависит от движения* наблюдателя! С точки зрения одних ваших коллег, разъезжающих по Вселенной в командировках, сначала вы испытали приступ отчаяния от невозможности поздравить вашу подругу, а потом она, хоть и огорчившись отсутствием вашего поздравления, отметила свой день рождения. Но для других — сначала прошел ее день рождения, а потом уже вы о нем вообще вспомнили и стали рвать на себе волосы. Порядок событий может быть различным в зависимости от того, как наблюдатели движутся относительно друг друга.

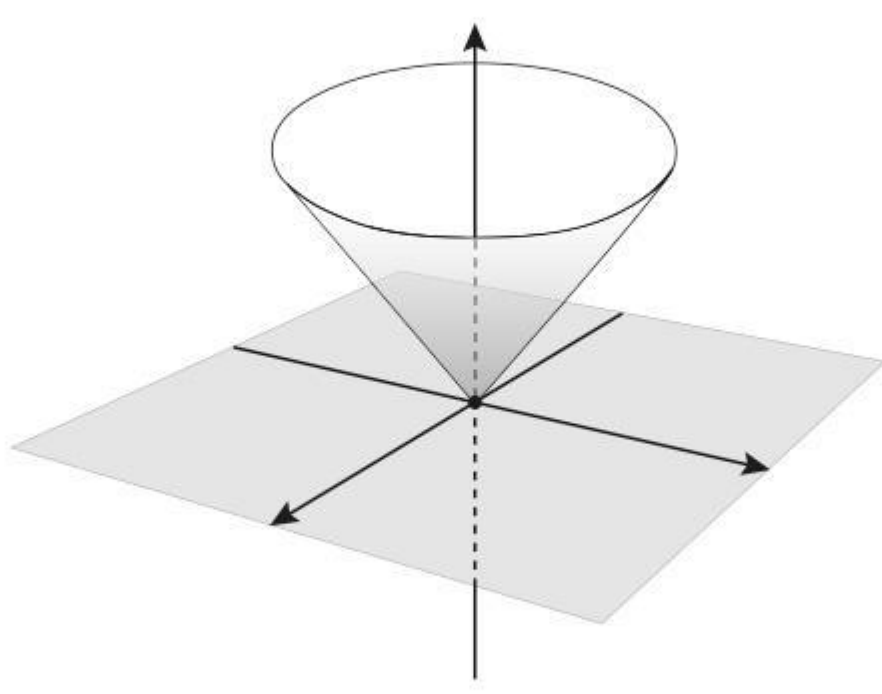


**Рис. 5.11.** Граница области событий в пространстве-времени, на которые можно в принципе повлиять из «здесь и сейчас» в точке пересечения координатных осей, — конус, называемый световым конусом будущего. Это все те точки в пространстве-времени, через которые проходит световой сигнал, посылаемый здесь и сейчас. На то, что внутри конуса, можно повлиять и более медленными средствами. Все это — абсолютное будущее. События снаружи конуса лишены причинной связи со «здесь и сейчас»; это безразличное будущее. Как и на рис. 5.10, образующая конуса составляет угол 45° с плоскостью

С одновременностью, да и с временным порядком двух событий, случающихся в одной и той же точке в пространстве, вопросов не возникает. Несложно определить, например, что два световых луча приходят в одну точку одновременно. А как понимать одновременность двух событий, разделенных пространственным расстоянием? Пользуясь абсолютностью скорости света, мы объявим их одновременными, если световые сигналы от них одновременно пришли в точку, расположенную от них на равном удалении (например, в середине прямой, их соединяющей). Вооружившись этим определением и временно забыв о ваших страданиях из-за дня рождения подруги, устройтесь теперь точно в середине длинного железнодорожного вагона, чтобы воочию увидеть, как порядок событий зависит от относительного движения. В своем вагоне вы проезжаете мимо меня, стоящего на перроне. Я заранее знал расписание движения вашего поезда [90] и длину вашего вагона и приготовил вам небольшой сюрприз: одновременно с тем, как вы, сидя в середине вагона, проезжаете мимо меня, в начало и в конец вагона бьет по молнии. Ни вы, ни я, конечно, не видим этого непосредственно в тот момент, когда мы с вами оказались практически лицом к лицу (вы в поезде, а я на перроне): свет от молний еще не дошел. Но я-то нахожусь точно посередине между двумя точками удара, и свет от двух молний придет ко мне одновременно — как, собственно, и было запланировано. Другое дело с вами. Вы двигаетесь навстречу одному из сигналов, и, пока он в пути, вы, со своей стороны, успеете проделать некоторый путь; в результате свет от молнии из головной части вагона придет к вам раньше, чем со стороны хвоста вагона. Узнав, что исходные точки двух сигналов находились в двух концах вагона, т.е. на одинаковом удалении от вас, вы сделаете вывод, что молнии ударили не одновременно. После небольшого размышления вы даже придете к выводу, что сначала молния ударила в головную часть вагона, затем вы поравнялись с фигурой на перроне, а затем уже молния ударила в хвостовую часть вагона.

*Порядок событий во времени может зависеть от движения наблюдателя*

Относительность одновременности и различный порядок событий во времени с точки зрения различных наблюдателей не приводят к противоречиям. Они могли бы возникнуть, только если бы одно событие было причиной другого (возвращаясь к вашим невзгодам: вы послали поздравление, а ваша подруга получила его и обрадовалась), но какой-то наблюдатель обнаружил бы, что они следуют в другом порядке. Однако на то оно и безразличное, что причинная связь невозможна. «Безразличное», как мы видим, — не эмоциональное название, а бесстрастное отражение реального положения дел. И безразличного в некотором роде больше, чем абсолютного (прошлого и будущего): это все, что находится вне конуса прошлого на рис. 5.10 справа и конуса будущего на рис. 5.11. Там, в безразличном, лежит и все «настоящее» — ваше «сейчас», — за исключением одной-единственной точки, где находитесь вы.

*Законы движения света выделяют прошлое, безразличное и будущее*

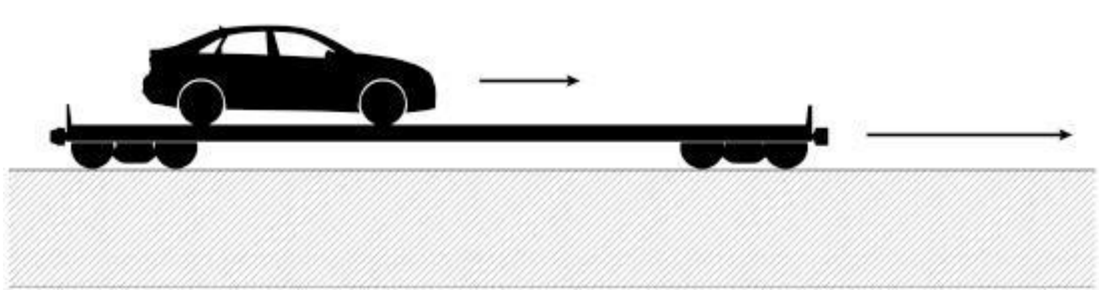


**Рис. 5.12.** Сложение скоростей поезда и автомобиля

«Фокусы» с перестановками порядка двух событий, лежащих в безразличном относительно друг друга, — это технически свойства гиперболических поворотов, которые и описывают связь между картинами мира разных наблюдателей, движущихся относительно друг друга. Но гиперболические повороты никогда не переставляют порядок тех явлений, одно из которых *может* быть причиной другого. То, что лежит в вашем абсолютном будущем, лежит там с точки зрения *всех* наблюдателей, а то, что было в абсолютном прошлом, тоже находится там для всех наблюдателей.

Одновременность относительна, но разбиение пространства-времени на три части по отношению к выбранному событию — абсолютное прошлое, абсолютное будущее и безразличное — абсолютно. Другими словами, абсолютны — одинаковы для всех наблюдателей — конусы на рис. 5.10 и 5.11. Это, честно говоря, можно было отметить сразу, потому что эти конусы (сейчас я говорю о *поверхностях*) изображают, как распространяется свет: конус прошлого — всё, свет от чего приходит сейчас; конус будущего — всё, куда успеет дойти свет, посланный сейчас.

*****

**Космический старт: обмануть систему?** Инерция здравого смысла побуждает еще раз попробовать «обмануть систему». Если «напрямую» разогнаться до скорости света нельзя, то что мешает нам развить эпизод с рейсом Нью-Йорк — Лондон? Разгонимся до половины скорости света в каком-нибудь «космическом урагане», а потом включим двигатели в ракете, которая сама способна разогнаться до половины скорости света. Пожалуй, предпочтительнее вариант, где все несколько *устойчивее*, чем в урагане: по железной дороге идет поезд со скоростью 100 км/ч, а один из вагонов — платформа, по которой вы уговорили кого-то ради науки ехать на автомобиле со скоростью 50 км/ч (рис. 5.12). Не правда ли, 100 + 50 = 150? Без сомнения, да, но когда вы, стоя на станции, точно измерите скорость автомобиля, едущего по платформе, вы обнаружите, что она равна 149,99999999999937 км/ч (двенадцать девяток, если я не сбился, когда их пересчитывал). Со всех мыслимых точек зрения это практически то же самое, что 150, но это потому, что выбранные скорости до смешного малы по сравнению со скоростью света и пространство-время смогло проявить свои свойства только за этим частоколом из девяток. Сейчас мы увидим, на что оно способно, стоит только разогнаться. Скорости 50 и 100 км/с (*в секунду*; это несколько больше, чем характерные скорости в Солнечной системе) складываются согласно точному предписанию в 149,9999916551 км/с — что все равно близко к наивно ожидаемым 150, но отличие наступает после меньшего количества девяток, чем в железнодорожно-автомобильном примере.

Ни в том ни в другом случае, разумеется, математику 100 + 50 = 150 никто не отменял. Просто для сложения скоростей надо использовать другую операцию, а не обычное сложение; быть может, правильнее было бы называть это «сложение» каким-то еще словом или по крайней мере всегда писать в кавычках, но это едва ли реализуемое начинание. Различие между собственно сложением и более хитрым предписанием растет вместе со скоростями, которые требуется складывать (или «складывать»). Скорости 50 000 км/с и 100 000 км/с «складываются» уже не в 150 000, а в 142 094,9 км/с — отличие от наивного результата делается намного заметнее. Правило, согласно которому 50 000 км/с$\hat{+}$100 000 км/с = 142 094,9 км/с, — это строго определенная математическая процедура, которая выражает собой еще одно следствие из основных положений, приведенных ранее в главе. Специальный знак типа моего $\hat{+}$ для нее используется редко, но раз уж я его ввел, приведу еще одну формулу с его использованием: сложим две скорости, каждая из которых составляет более 95% скорости света (точнее, целых 96,7%): 290 000 км/с$\hat{+}$290 000 км/с = 299 646,8 км/с. Это и есть ответ на сделанное выше предложение запустить суперракету с другой такой же суперракеты, а потом измерить скорость «дочерней» ракеты относительно космодрома. Результат впечатляет: два раза по 96,7% скорости света дает 99,95% скорости света, что упрямо меньше ста процентов.

Сложение скоростей $v \hat{+} u$ становится все более и более «тягучим» по мере того, как хотя бы одна из скоростей, скажем $v$, приближается к скорости света: все труднее становится увеличить «сумму», меняя скорость $u$. Коллайдер — это ускоритель на встречных пучках: протоны летят навстречу друг другу, каждый со скоростью 0,99999-9991$c$ (как всегда, $c$ — скорость света). И вот с какой относительной скоростью протоны сталкиваются: 0,9999-99991$c \hat{+}$0,999999991$c$ = 0,9999999999999998$c$. А если хотя бы одну из скоростей в математической операции $\hat{+}$ взять равной скорости света, в результате получится в точности скорость света. Решительно ничего удивительного в этом нет: операция $\hat{+}$ возникает как следствие из основных положений теории относительности, и в частном случае, когда одна из скоростей как раз и есть скорость света, математика должна воспроизводить то, с чего мы начали: скорость света абсолютна, с какой ракеты ни свети прожектором, скорость испущенного света останется неизменной относительно космодрома: $v \hat{+} c = c$ для любой скорости ракеты $v$.

Пространство-время со встроенной в него абсолютной скоростью работает так, что абсолютная и недостижимая скорость остается и абсолютной, и недостижимой при всех мыслимых действиях. Современное знание о движении — специальная теория относительности — имеет свои ограничения, но лишено внутренних противоречий.

*****

**Сверхпривилегия от рождения.** Разогнаться до скорости света нельзя, старт ракеты с ракеты вообще не помогает, и только свет рождается в состоянии движения со скоростью света. А можно ли родиться в состоянии движения быстрее света? Я так усердно подчеркиваю логический характер теории относительности, что и сейчас первое, что следует выяснить: запрещено ли такое постулатами, приведенными ранее? Нет, буквально не запрещено. Однако есть ряд обстоятельств. Тахион (название для гипотетических частиц, движущихся быстрее света), родившись со сверхсветовой скоростью, может двигаться только со сверхсветовыми скоростями; *замедлиться* до скорости света для него так же невозможно, как для обычных частиц разогнаться до скорости света. При этом увеличение скорости уменьшает его энергию — парадоксальным образом, до нуля, если скорость неопределенно велика. Это плохое поведение. Взаимодействуя с какими-то более реалистичными частями мира, тахионы отдали бы им свою энергию, при этом разогнавшись «до бесконечности». Или *забрали бы* всю энергию от всех только для того, чтобы притормозить. Впрочем, ни один тахион науке не известен, и их обсуждаемые свойства отражают просто способ распространения формул, пригодных для досветовых скоростей, на несколько сомнительную сверхсветовую область.

Независимо от патологий при обмене энергиями между тахионами и всем остальным, имеется логическая, по существу, проблема с присутствием во Вселенной хотя бы двух тахионов. Если два наблюдателя движутся относительно друг друга и каждый имеет с собой машинку для порождения тахионов, то можно организовать такой обмен сигналами из этих тахионов, что ответ придет раньше, чем был задан вопрос. Таким образом возникает вариант «парадокса бабушки» [91]. Чтобы совсем уж придать ему вид логического парадокса, требуются два автомата — «Инициатор» и «Зеркало», — каждый из которых является приемопередатчиком тахионов. В момент времени $T$ оба автомата включаются. При этом «Зеркало» улетает от «Инициатора», двигаясь с некоторой постоянной досветовой скоростью, — летит каким-нибудь регулярным межзвездным рейсом. «Инициатор» же запрограммирован так, что ничего не предпринимает до момента времени $T + 100$ по своим часам, и в этот момент отправляет тахион в сторону «Зеркала» — если и только если до того он не получал никаких тахионных сигналов. Автомат «Зеркало» запрограммирован как зеркало: он отправляет тахион обратно в сторону «Инициатора» сразу после того, как сам получает от него тахион; ничто другое на него не влияет. Дождемся момента $T + 100$, сидя рядом с «Инициатором». В указанный момент «Инициатор» посылает тахион вслед «Зеркалу»; этому тахиону требуется какое-то время, чтобы догнать «Зеркало» и заставить его сработать. Это время различно с точки зрения «Инициатора» и с точки зрения «Зеркала», но пока все хорошо, события для каждого из них развиваются в сторону будущего. Но вот какое дело: скорость «Зеркала» (досветовую) и скорость тахионов (сверхсветовую) можно подобрать так, что ответный тахион придет к Инициатору в момент, скажем, $T + 50$. С точки зрения самого «Зеркала» момент, когда тахион достигает «Инициатора», наступает *после* срабатывания «Зеркала», но неотвратимая математика гиперболических поворотов, с помощью которых две картины мира переводятся одна в другую, такова, что этот момент попадает в прошлое «Инициатора». Получив сигнал в момент *T* + 50, «Инициатор» не может послать тахион в момент *T* + 100 — он так запрограммирован. Но если он не испускает тахион в момент *T* + 100, то «Зеркало» ничего не получает и, в свою очередь, не посылает тахион в обратную сторону. В таком случае «Инициатор» не получает тахионов до момента *T* + 100 и поэтому посылает свой тахион. Несчастный робот срабатывает в том и только том случае, когда он не срабатывает. Конечно, он сломается.

Сломается ли от такого парадокса структура реальности — вопрос, ответ на который, по моим ощущениям, очень близок к положительному. Тахионы — явление, от которых реальность тем или иным образом освобождается, если они «вдруг возникли». Распространенный взгляд состоит в том, что «плохое» поведение тахионов приведет к перестройке некоторой нижележащей структуры (так называемого физического вакуума), в результате которой тахионов не остается [92].

*****

**Заманчивые путешествия.** Мы вынуждены подчиняться правилам Вселенной, и если мы хотим путешествовать, то нам все-таки потребуется ракета. Если сделать самые смелые предположения о технологиях, то как далеко и, главное, насколько быстро можно *в принципе* улететь? О технологических сложностях я предлагаю забыть совсем; в конце концов, первые расчеты маневров на орбите (из уже упомянутых — «Достижимость небесных тел» Гомана [81] и «О траекториях полета к центральному светилу со стартом с определенной кеплеровской орбиты» Штернфельда [102]) были выполнены в то время, когда перспективы полета в космос были еще довольно туманными. Соседние с нами звезды (рис. 5.13) находятся достаточно далеко, и лететь туда со скоростью современных космических кораблей — дело совершенно бесперспективное. Нам понадобится ракета, в которой реактивный двигатель работает все время, что она движется, чтобы ракета не переставала разгоняться.

Работающие двигатели означают, конечно, «перегрузку» для всего, что находится внутри, — ту самую перегрузку, о которой вам сообщает спинка кресла в начале разбега самолета по полосе. Я предлагаю экипажу будущей экспедиции сделать перегрузку не неприятностью, которую нужно перетерпеть, а элементом комфорта: с ее помощью в космосе можно воспроизвести земную силу тяжести (сила тяжести и перегрузка — и правда одно и то же, но подробности придется отложить до следующей прогулки). Другими словами, на корабле установлен такой двигатель, чтобы экипаж всегда ощущал ускорение 1$g$ — такое же, какое сообщает телам вокруг нас тяготение Земли.

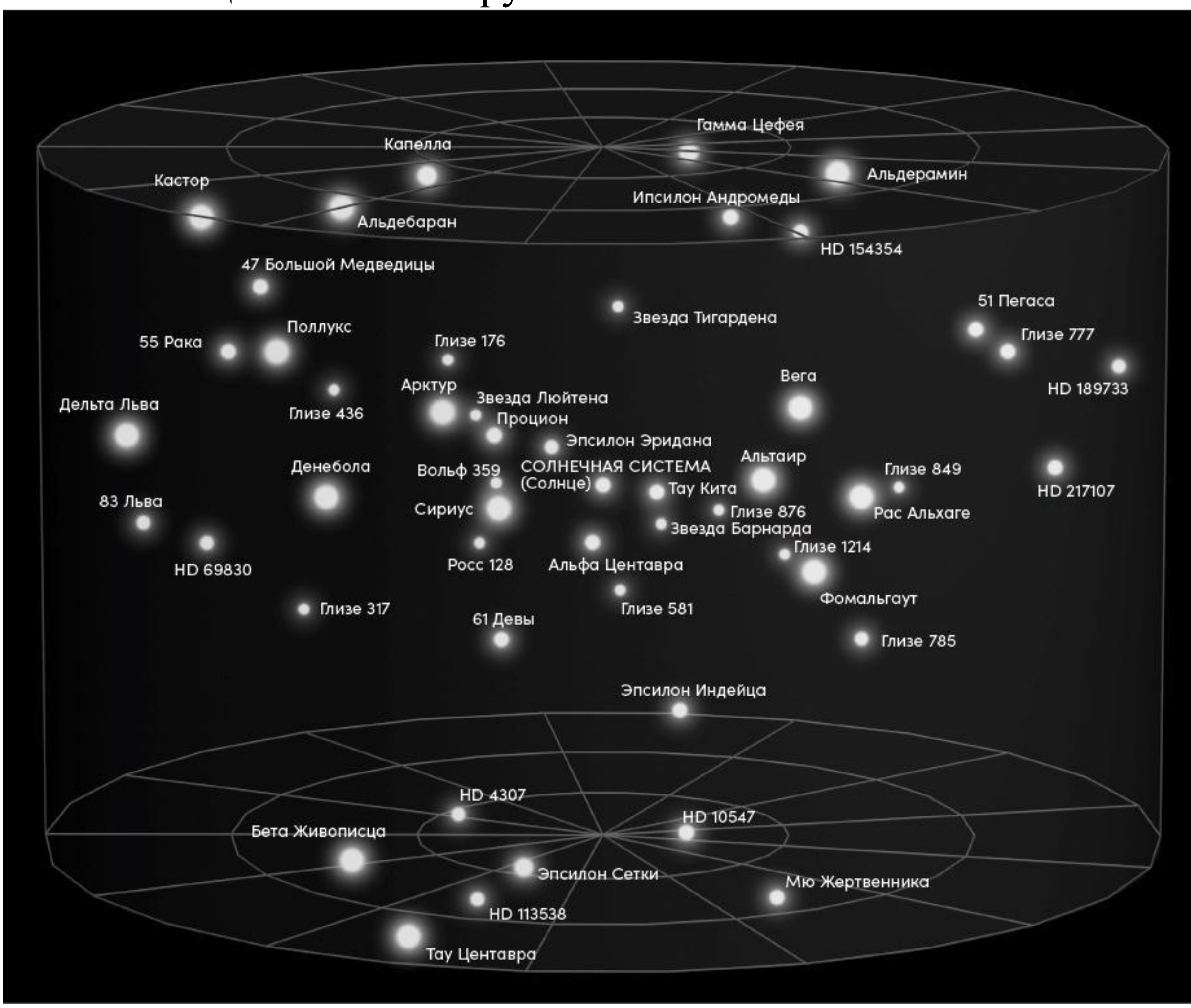



**Рис. 5.13.** Ближайшие звезды. Расстояния до них измеряются световыми годами

Начинается интересное. Двигатель постоянно работает с такой тягой, что космонавты ощущают ускорение 1$g$ и исходя из этого понимают, что сейчас они летят примерно на

10 м/с быстрее, чем летели секунду назад. Но это с точки зрения ракеты. Картина не может быть такой же с точки зрения персонала на космодроме, ведь постоянное увеличение скорости означало бы, что через должное время ракета будет улетать от них быстрее, чем свет. С точки зрения космодрома ракета сначала действительно прибавляет около 10 м/с за каждую секунду, но потом, когда достигнутая скорость становится заметной по сравнению со скоростью света, ее дальнейшее возрастание происходит все медленнее и медленнее. Каждые следующие 10 м/с надо «прибавлять» к уже достигнутой скорости по правилам операции $\hat{+}$, и в результате изменение скорости получается ничтожным. Скорость ракеты постепенно приближается к скорости света, но никогда не достигает ее.

Вспомнив, каково расстояние до цели в световых годах, персонал на космодроме понимает то, что они и так всегда знали: ракета долетит до места назначения не раньше, чем они (персонал) выйдут на пенсию, а для большинства популярных направлений и много позднее. С этим ничего нельзя поделать. Но это только с точки зрения тех, кто остался на космодроме. Для экипажа ракеты время течет медленнее — и тем медленнее, чем ближе их скорость к скорости света. У экипажа прекрасные шансы добраться до цели не только при своей жизни, но и еще во вполне деятельном возрасте! Скромное, но *постоянно включенное* $1g$ с точки зрения ракеты дает заметный эффект. В таблице 5.1 показано, сколько времени пройдет для экипажа, если с точки зрения космодрома лететь несколько лет в выбранном режиме работы двигателя, и какой скорости удастся в результате достичь. Оттуда же видно, каким станет время, проведенное космонавтами в дороге, если они готовы терпеть ускорение $2g$.

Десять лет на космодроме — это меньше трех лет на корабле с земным ускорением свободного падения. А если выбрать ускорение в два раза больше земного, то заметно меньше двух лет. Но это — просто чтобы «погонять без тормозов». Если же в конце пути мы желаем остановиться у выбранной звезды, придется еще и тормозить. Теория относительности или нет, но тормозить в космосе — то же самое, что разгоняться, только двигатель нужно развернуть в противоположную сторону. Имеет смысл сделать путешествие симметричным: полдороги разгоняться и полдороги тормозить. Итак, полпути ускорение, которое ощущается как постоянная сила тяжести, и полпути — развернувшись двигателями вперед — замедление, которое ощущается как такая же сила тяжести. Путешествие начинается с нулевой скорости относительно космодрома и должно закончиться нулевой скоростью, которую мы тоже будем измерять относительно космодрома, смело пренебрегая относительной скоростью звезды в точке назначения: на фоне тех скоростей, которых можно достичь в рамках выбранной стратегии, сотня-другая километров в секунду — совершенная ерунда.

**Таблица 5.1.** Время по часам на космодроме и по часам на ракете при полете с постоянно работающим двигателем

| При ускорении 1g | | | При ускорении 2g | | |
|---|---|---|---|---|---|
| *T*, месяцы | *t*, месяцы | *V*, доля от *c* | *T*, месяцы | *t*, месяцы | *V*, доля от *c* |
| 12 | 10,5 | 0,7282 | 12 | 8,6 | 0,9000 |
| 24 | 17,1 | 0,9000 | 24 | 12,4 | 0,9719 |
| 36 | 21,5 | 0,9516 | 36 | 14,7 | 0,9872 |
| 120 | 35,2 | 0,9953 | 120 | 21,6 | 0,9988 |

*Примечание. T* — число месяцев, прошедших на космодроме; *t* — число месяцев, прошедших на ракете (округленно); *V* — скорость, достигнутая к концу этого периода, выраженная в долях от скорости света.

Осталось решить, у какой звезды остановиться. Мои предложения незамысловаты, но каждое из них мотивировано. После названия пункта назначения в скобках указано расстояние до него в световых годах.

**Альфа Центавра (4,3)**. Мы встречались с ней в главе «прогулка 4», это довольно интересно организованная тройная система. Это самое близкое из всего, что есть, и уж если куда-то лететь для начала, то именно туда, а конкретно — к Проксиме, у которой к тому же имеются планеты.

**Звезда Барнарда (5,96)**. Она идет следующей по удаленности (четвертой по порядку, если считать Альфу Центавра за три). Это (красный) карлик с массой по крайней мере в пять раз меньше солнечной и как минимум с одной планетой, обращающейся вокруг звезды за неполных восемь земных месяцев.

**Сириус (8,7)**. Прежде всего это красиво: самая яркая звезда на земном небе, при ближайшем рассмотрении — двойная, включающая белый карлик.

**Тау Кита (11,8)**. Она похожа на Солнце, а прославилась тем, что в рамках проекта SETI ее «прослушивали» на предмет возможных радиосигналов от ее обитателей [93].

**Wolf 1061 (13,8)**. Этот красный карлик «обзавелся» планетами в результате восьмилетних наблюдений из обсерватории Ла-Силья (см. рис. 3.1); две надежно установленные планеты носятся вокруг звезды с периодами обращения около 5 и 18 суток.

**Gliese 667 (23,6)**. Хочется не пропустить эту *тройную* систему; все три звезды меньше Солнца, одна из них — красный карлик. Звезды А и В обращаются одна вокруг другой по сильно вытянутому эллипсу, сближаясь до 5 (!) а.е. (расстояний от Земли до Солнца) и удаляясь до 20 а.е. (что должно занимать 42 с лишним года). Звезда С — красный карлик — находится от этой пары в расстоянии 230 а.е. Светит она очень слабо, примерно в полтора процента от светимости Солнца, и имеет не меньше двух планет.

**TRAPPIST-1 (39,5)**. В главе «прогулка 3» мы уже убедились, что это явление природы определенно заслуживает посещения; все сомнения должен развеять приведенный там же рис. 3.7.

**Kepler-16b (245,4)**. Это уже довольно далеко. Планета (рис. 5.14) содержит в своем наименовании имя одного из наших героев — космического телескопа, который ее обнаружил, и обращается вокруг *двух* звезд Kepler-16. Это вообще *первый* из открытых татуинов [94].

**Стрелец А* (25 900)**. Это уже не звезда, а сверхмассивная черная дыра в центре нашей галактики Млечный Путь; без нее список для посещений просто несерьезный. Если не на ракете, то на наших прогулках мы до нее еще доберемся (спойлер: рис. 7.12).

**Малое Магелланово Облако, ММО (197 000)**. Зачем останавливаться на достигнутом? Это карликовая галактика, являющаяся спутником Млечного Пути. Человек, отправившийся в первое кругосветное плавание, лишь примерно представляя себе размер Земли, заодно открыл ближайший к нам внегалактический объект (рис. 5.15), гравитационно привязанный к Млечному Пути. Там лишь несколько сотен миллионов звезд, а его диаметр всего 7000 световых лет (примерно триллион раз то расстояние, которое взялся пройти Магеллан).

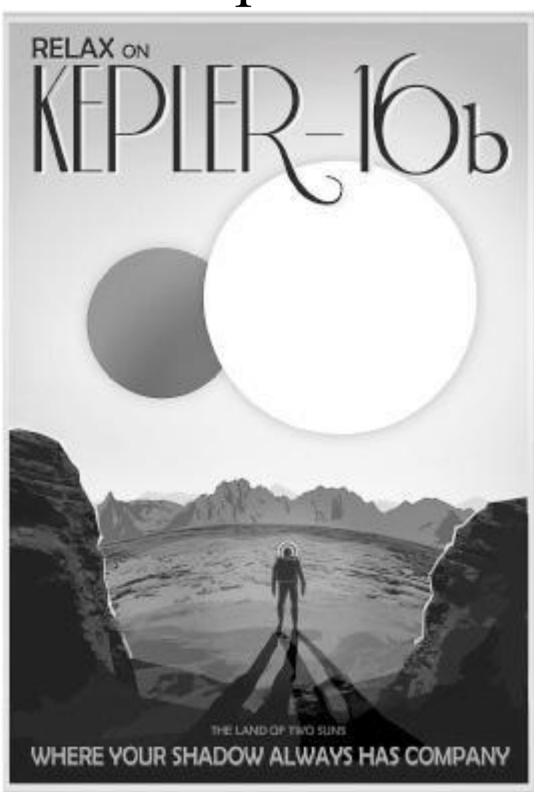



**Рис. 5.14.** Kepler-16b в видении художника

**Андромеда (2 520 000)**. Здесь все ясно; ближайшая к нам «полноценная» галактика. И вообще, стоит посетить ее, пока она не посетила нас (еще один спойлер: рис. 7.6).

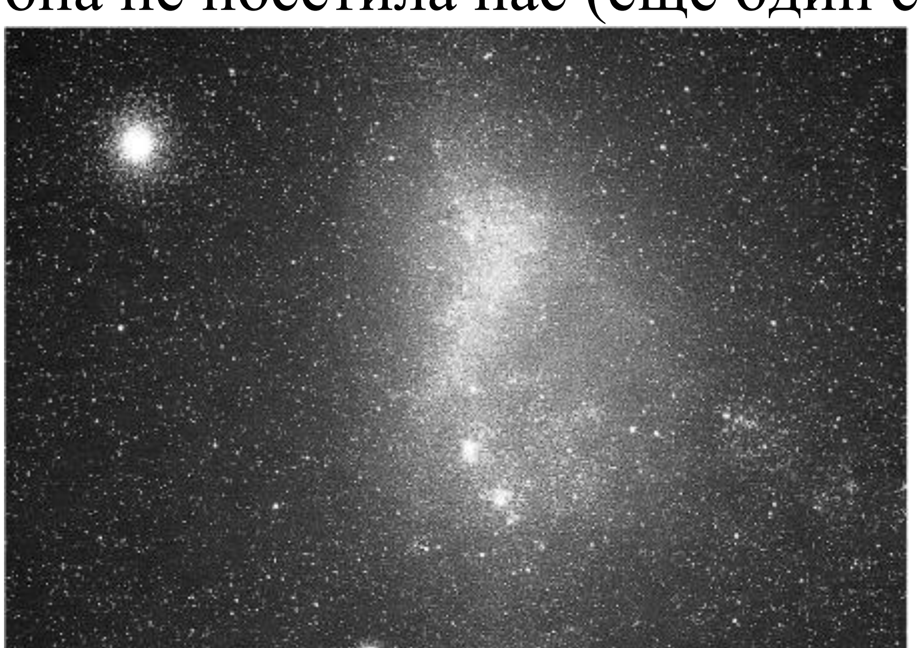


**Рис. 5.15.** Малое Магелланово Облако

**Таблица 5.2.** Путешествия с постоянным разгоном и последующим постоянным торможением

| Пункт назначения | $d$, св. г. | $T$, годы | $t$, годы | $\gamma_{макс}$ |
|---|---|---|---|---|
| Альфа Центавра | 4,3 | 5,4 | 2,8 | 4,3 |
| Звезда Барнарда | 6,0 | 7,1 | 3,1 | 5,6 |
| Сириус | 8,7 | 9,9 | 3,5 | 7,7 |
| Тау Кита | 11,8 | 13,0 | 3,9 | 10,1 |
| Wolf 1061 | 13,8 | 15,0 | 4,1 | 11,7 |
| Gliese 667 | 23,6 | 24,8 | 4,7 | 19,3 |
| TRAPPIST-1 | 39,5 | 40,8 | 5,4 | 31,6 |
| Kepler-16b | 245,4 | 246,7 | 7,7 | 191,0 |
| Стрелец А* | 25 900 | 25 901,3 | 13,7 | 20 053 |
| ММО | 197 000 | 197 001 | 16,3 | 152 519 |
| Андромеда | 2 520 000 | 2 520 000 | 19,6 | 1 951 000 |

*Примечание.* Космонавты постоянно ощущают ускорение 1,5 $g$; $d$ — расстояние до пункта назначения в световых годах; $T$ — количество лет, которое занимает путешествие с точки зрения персонала космодрома (половина времени до возвращения корабля, округленно); $t$ — количество лет, прошедших на ракете (округленно); $\gamma_{макс}$ — максимальный гамма-фактор (округленно), который достигается в середине путешествия и показывает, во сколько раз медленнее стареет экипаж по сравнению с персоналом космодрома на самом быстром участке полета.

Пожалуй, мы отберем такой экипаж, который выдержит ускорение 1,5$g$ на протяжении всего полета. Будем надеяться, что чудеса космической медицины это позволят. Тогда из таблицы 5.2 мы увидим, что замедление времени в зависимости от скорости и в самом деле творит чудеса. Постоянный разгон на первой половине пути делает замедление времени все более выраженным; в дальних полетах *бóльшая часть пути* проходит с высоким гамма-фактором, из-за чего колоссальное увеличение преодоленного расстояния приводит лишь к относительно небольшому удлинению путешествия для экипажа. Иная картина с временем, которое пройдет на космодроме: уходом сотрудников на пенсию в большинстве случаев дело не ограничится. Путешествие до Альфы Центавра, с их точки зрения, займет 5,4 года, что заметно больше, чем 4,3 года, за которые туда дойдет свет. Но для более далеких путешествий расстояние в световых годах лишь ненамного в процентном отношении превышает число лет, которые пройдут на космодроме: 25 900 световых лет до черной дыры в центре Млечного Пути — это 25 901 год и 110 дней на космодроме (а при той точности, с какой делались вычисления, добавка к двум с половиной миллионам лет до Андромеды даже не указана). И конечно, ждать им в два раза дольше, если надеяться на *возвращение* космического корабля: 51 802 года (и уже не так важно, сколько еще дней или месяцев), если из центра Галактики. Хорошая оценка для времени путешествия *туда-обратно* в годах, при выбранном ускорении, — дважды расстояние в световых годах плюс 32 месяца; для близких путешествий надо прибавить еще несколько месяцев к тому, что получится.

Как бы то ни было, задавшись целью посетить сверхмассивную черную дыру в центре нашей Галактики, заведомо можно обернуться за 30 лет для экипажа. Пространство-время нашей прекрасной Вселенной, где время замедляется в зависимости от скорости, буквально зовет нас в путь? Ах, если бы.

*****

**Циолковский с нами.** Мы уже видели, тренируясь на протонах, что для разгона до скоростей, близких к скорости света, требуется все больше энергии. Ракета — приспособление, которое разгоняет себя само (не отталкиваясь ни от чего вроде дороги, воздуха или воды, за неимением таковых): она продвигает себя *реактивно*, и происходит это, в общем, по Циолковскому (см. главу «прогулка 2»). Правда, формула, носящая его имя, в оригинале относится к миру малых скоростей — малых, конечно, по сравнению со скоростью света, хотя и остававшихся недостижимой мечтой в течение всей жизни автора. Однако она обобщается на интересующий нас случай без больших проблем, а главное — ее «основное послание» остается прежним: чтобы использовать топливо на более поздних этапах полета, его тоже надо разогнать, а для этого необходимо дополнительное топливо, а чтобы его разогнать, необходимо еще больше топлива. Разумеется, чем эффективнее сгорает каждый килограмм топлива и чем быстрее поэтому «отстреливаются» продукты сгорания, тем большую скорость приобретает ракета, но общей ситуации это не меняет: чтобы «на финише» полезная нагрузка заданной массы разогналась до определенной скорости, требуется значительно большая масса топлива на старте. Отношение масс (во сколько раз ракета на старте тяжелее полезной нагрузки) зависит от желаемой скорости довольно драматическим образом, и пожелания по увеличению этой скорости обходятся крайне дорого в смысле стартового веса. Полный или (почти) пустой бак в автомобиле — фактор, оказывающий тем большее влияние на движение, чем ближе класс автомобиля к «Формуле-1», но и этот последний случай несравним с тем, что происходит при реактивном движении.

При реальных запусках с Земли требуется еще и подняться вверх в гравитационном колодце (преодолевая сопротивление воздуха с учетом целого ряда дополнительных факторов, таких как давление газов в сопле и др.; формула Циолковского относится к *идеальной* ракете, а в реальности все только сложнее). Ракета-носитель «Сатурн V» (рис. 5.16) имела на старте массу без малого 2 970 000 кг, а на лунную орбиту забрасывала до 48 600 кг. Отношение полного веса к полезному весу — около 60. «Чанчжэн-5» («Великий поход-5») на старте весит 854 500 кг, а на лунную орбиту выводит до 9400 кг — отношение несколько больше 90. Масса «Фалькон-9» на старте — 549 054 кг, а на низкую околоземную орбиту он выводит 22 800 кг; поделив, получаем 24. Для «Союза» имеем соответственно 308 000 и 6450 кг, отношение около 48. Все эти, как и все мыслимые в будущем, *химические* ракеты — те, которые основаны буквально на *сгорании* топлива, — безнадежны для межзвездных перелетов. Не связывая себя условностями технологических решений, выберем самое быстрое выбрасывание «агента» из ракеты и самое эффективное превращение массы «топлива» в это выбрасываемое. В нашей Вселенной-с-ограничениями этим «самым-самым» оказывается фотонная ракета, питающаяся от аннигиляции.

**Рис. 5.16.** «Сатурн V» поднимает сам себя и «Аполлон-8»

Такая ракета летит вперед из-за того, что посылает в противоположную сторону быстрее всего прочего распространяющийся агент — свет; энергия (а значит, и количество движения), которую уносит этот свет, получена из «топлива» самым эффективным способом: полным превращением вещества и антивещества в свет. Вместо баков с горючим и окислителем, входящих в конструкцию «Сатурна V», «Чанчжэн-5», «Протона», «Ариан-5» и т.д., внутри нашей ракеты — «бак» с антивеществом и запас такого же количества вещества. Формула $E = mc^2$ «работает» в непрерывном режиме так, чтобы обеспечить постоянно ощущаемое в ракете ускорение $1{,}5g$, и мы будем беззастенчиво предполагать стопроцентную эффективность превращения массы в энергию света, посылаемого точно в направлении, противоположном движению [95]. При скорости выбрасывания агента, равной скорости света, формула Циолковского в варианте для больших скоростей даже упрощается. В таблице 5.3 приведены результаты ее применения: отношения массы ракеты на старте к ее массе в пункте назначения. Все это — для путешествия на ПМЖ, обратная дорога вообще не обсуждается, потому что она немедленно сделает ситуацию запредельной: ракете придется разгоняться, а затем тормозить с полным запасом «топлива», потребным для еще одного такого путешествия.

**Таблица 5.3.** Путешествия с постоянным разгоном и последующим постоянным торможением на фотонно-аннигиляционной ракете

| Пункт назначения | $d$, св. г. | $t$, годы | $M/m$ |
|---|---|---|---|
| Альфа Центавра | 4,3 | 2,8 | 72 |
| Звезда Барнарда | 5,96 | 3,1 | 123 |
| Сириус | 8,7 | 3,5 | 236 |
| Тау Кита | 11,8 | 3,9 | 408 |
| Wolf 1061 | 13,8 | 4,1 | 543 |
| Gliese 667 | 23,6 | 4,7 | 1482 |
| TRAPPIST-1 | 39,5 | 5,4 | 3986 |
| Kepler-16b | 245,4 | 7,7 | 145906 |
| Стрелец A* | 25900 | 13,7 | 1608480000 |
| ММО | 197000 | 16,3 | 93048600000 |
| Андромеда | 2520000 | 19,6 | 15225600000000 |

*Примечание.* Ракета летит к тем же звездам, что и в таблице 5.2, и разгоняется и тормозит таким же образом; $d$ — расстояние до пункта назначения в световых годах; $t$ — количество лет, прошедших на ракете (округленно); $M/m$ — во сколько раз масса $M$ ракеты на старте больше массы $m$ полезного груза, доставленного в пункт назначения.

Итак, если в один конец — скажем, к TRAPPIST-1 — мы желаем доставить всего-то 50 тонн полезного груза (примерно столько было нужно для высадки двух человек на Луну и для последующего возвращения трех человек на Землю), то, как сообщает таблица 5.3, нам потребуется ракета со стартовой массой примерно в 4000 раз большей: около 200 000 тонн, что с учетом менее чем стопроцентной эффективности фотонно-аннигиляционного движка надо представлять себе как несколько сотен слитых воедино ракет «Сатурн V», *половина из которых состоит из антивещества*. Но это — ради 50 тонн хоть чего-то, кроме топлива, а их *едва ли* хватит на одну только систему удержания антивещества, фотонный двигатель и изоляцию от него. И это только TRAPPIST-1. Следующий в списке пункт назначения Kepler-16b потребует ракеты *еще* в 4000 раз тяжелее. Домчать за 14 лет до центра Млечного Пути — пара миллиардов тонн антивещества на каждую тонну полезного груза.

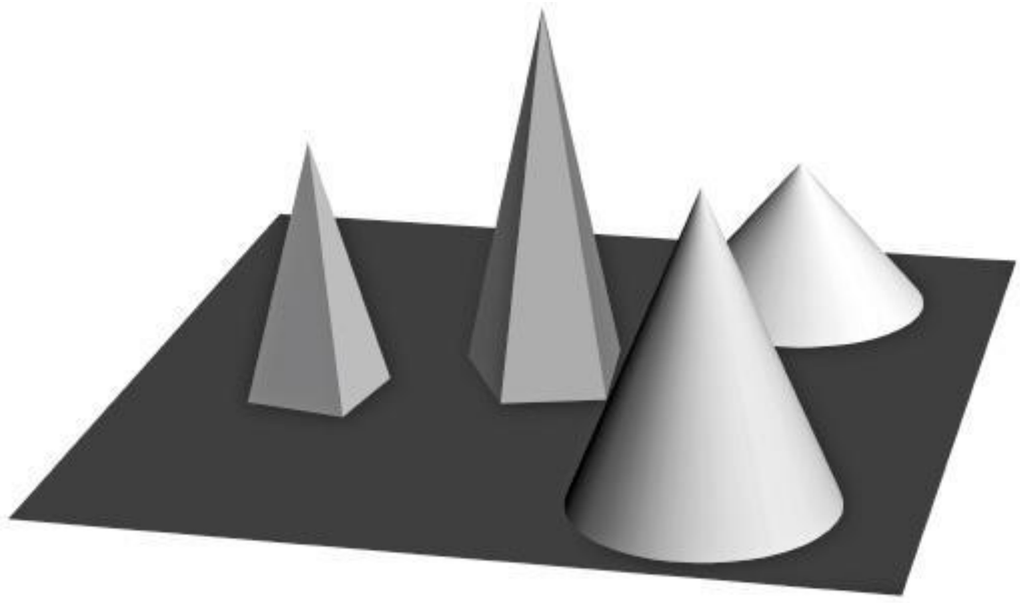


**Рис. 5.17.** Коническо-пирамидальный мир. Вертикальное направление в нем «отцеплено» от двух горизонтальных

Вселенная колоссально большая. Это особенно остро ощущается из-за абсолютного ограничения скорости.

## Добавления к прогулке **5**

**Математика пространства-времени в сказочном изложении.** Аналогии и тем более аллегории далеко не всегда доносят идею самым удачным образом, но я рискну привести одну, потому что она в основе своей математическая. В довольно глупой истории, которую я придумал, за кадром присутствует математика, очень похожая на математику, которая на самом деле обслуживает структуру пространства-времени. Представим себе мир довольно странных существ, живущих на гладкой плоской поверхности. Существа эти имеют вид конусов или пирамид: широкие снизу и сужающиеся кверху. И все предметы в их мире тоже имеют вид конусов или пирамид. Разной высоты и с разными углами в вершинах, но неизменно широкие внизу и узкие вверху (рис. 5.17). Их можно передвигать по плоскости и вращать вокруг вертикальной оси, и коническое население этим иногда занимается, в зависимости от каких-то своих нужд. Но все конусы и пирамиды ужасно тяжелые — настолько, что ни самих существ, ни окружающие их предметы нельзя наклонить, оторвав один край основания от поверхности, на которой все они расположены. Эволюция в мире, где такое действие невозможно, сформировала мышление его обитателей так, что даже представить себе такой наклон они не в состоянии.

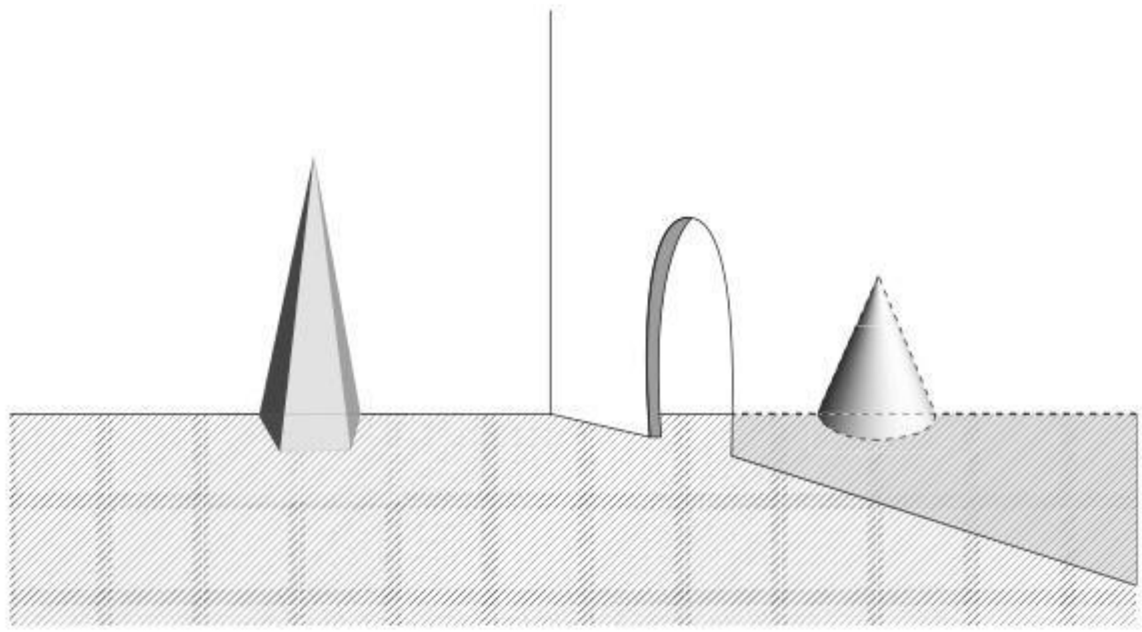


**Рис. 5.18.** Сакральная пещера коническо-пирамидальной цивилизации

Как следствие «ненаклоняемости» каждая пирамида, каждый конус, большой или малый, возвышается над поверхностью на фиксированную высоту. Понятно, что для конических ученых поэтому нет никакого смысла в том, чтобы различать две величины: высоту над плоскостью, на которой находится вершина каждой пирамиды, и высоту самой этой пирамиды. Иногда жителям нужно двигать пирамиды, чтобы поместить их в некоторые природные пещеры, которые в их мире все-таки есть. Вход в такую пещеру может оказаться ниже, чем потолок внутри пещеры, и некоторые пирамиды, которые там могли бы поместиться, не проходят из-за низкого входа (рис. 5.18). Если вы хоть раз пробовали пронести в дверной проем высокий холодильник, вы хорошо понимаете, какого рода воображения недостает коническим существам. Пирамиды можно двигать и поворачивать, но не наклонять. Вертикальное направление в их мире никогда не «смешивается» с горизонтальными.

В силу обстоятельств, в которые мы входить не будем, конический ученый Э. неожиданно понял, что вертикальное направление могло бы в принципе смешиваться с горизонтальными, если — страшно сказать — каким-то образом представить себе, что пирамиды можно наклонять. Поскольку вообразить такое в их мире невозможно, наклон этот можно описывать только математически. Из этой математики следует, что при наклоне высота пирамиды самой по себе (как фигуры) не меняется, но высота ее вершины над поверхностью очень даже меняется, а вместе с этим меняется и проекция пирамиды на плоскость. Когда коническая публика узнала, что высокую пирамиду в принципе можно — вот ведь парадокс! — внести в пещеру с низким входом, воцарилось всеобщее недоумение. Не последняя сложность в постижении теории ученого Э. обывателями состоит в непонятном и противоречащем здравому смыслу разделении двух величин: собственной высоты пирамиды и высоты, на которой находится ее вершина над поверхностью; пока пирамиды не наклоняют, это, несомненно, одно и то же, и для конического населения никак по-другому быть не может.

Здесь сказка заканчивается. Математика, описывающая только движения и повороты, но не наклоны пирамид, похожа на математику, описывающую абсолютное время в дополнение к пространству. Никакие действия в пространстве никак не влияют на ход времени. А математика, описывающая движения, повороты *и* наклоны пирамид, похожа на математику, которая обслуживает абсолютность скорости света и при этом говорит, что пространство и время до некоторой степени смешиваются. Сказочный мир транслируется на наш таким образом, что вместо их вертикального направления у нас — время, а вместо двух их направлений вдоль плоскости — все три наших пространственных измерения. Перемещения пирамид по плоскости и их вращения аналогичны доступным нам перемещениям по трехмерному пространству и всяческим поворотам в нем. (Трехмерие богаче двумерия, что ясно проявляется в разнообразии пространственных вращений по сравнению с вращением фигур на плоскости, но это никак не вредит моей аналогии.) Конечно, когда направление вверх от плоскости — *пространственное* направление — я сопоставляю с временем, в соответствующей математике возникает некое напряжение, но это напряжение довольно легкое; оно, собственно, упаковано в слово «гиперболический», которым мы сопровождаем повороты в пространстве-времени, описывающие переход к движению с некоторой скоростью. Чтобы выразить, насколько сильно наклонена пирамида, достаточно поделить друг на друга две величины, каждая из которых зависит от положения вершины пирамиды. Первая — это длина тени, которую отбрасывает пирамида в полдень, когда солнце стоит точно в зените [96]. А вторая величина — высота вершины над плоскостью. Длину тени — т.е. расстояние вдоль плоскости — делим на расстояние вверх от плоскости («вдоль дополнительного измерения») и получаем меру наклона. Аналогичное действие в нашей Вселенной — это деление расстояния в пространстве на расстояние вдоль дополнительного измерения, времени. Но результат такого деления дает скорость.

Вместо наклона пирамиды у нас скорость. Благодаря эффекту, математически очень близкому к эффекту наклона (из-за которого меняется и высота пирамиды, и ее проекция на плоскость), каждый наблюдатель в нашей Вселенной обнаружит, что движущиеся относительно него часы идут медленее, чем точно такие же контрольные часы у него в кармане. Если мы с вами движемся друг относительно друга, то с вашей точки зрения я «наклонно» провожу ось времени по отношению к пространству. Мера такого «наклона» — скорость (и это почти строгое математическое утверждение). У меня, разумеется, такое же отношение к вашему разделению пространства-времени на пространство и время. Все наблюдатели равноправны: каждый может считать, что его ось времени проведена в пространстве-времени перпендикулярно пространству, но тогда, наблюдая за другими, движущимися относительно него, он заключит, что у них разделение пространства-времени на пространство и время подверглось гиперболическому повороту, из-за чего изменились как пространственная протяженность в направлении движения, так и временнáя протяженность.

**Движение, материя и энергия.** Связь между движением, материей и энергией в общем виде — это высказывание о том, сколько энергии заключает в себе *что-то* (я не хочу ограничивать себя словом «тело»), что имеет массу $m$ и движется так, что имеет количество движения $p$. Эти две величины определяют полную энергию $E$ по формуле с двумя слагаемыми:

$E^2 = m^2c^4 + p^2c^2$.(5.2)

(Слева — энергия в квадрате; чтобы получить энергию саму по себе, надо еще извлечь квадратный корень, чего я не стал делать, опасаясь слишком громоздкой формулы.) Если применить это к телу, которое покоится (количество движения $p$ равно нулю), то мы снова приходим к знаменитой формуле (5.1). Более полезной формуле (5.2) никогда не стать столь знаменитой, а жаль: в ней присутствуют масса ($m$), энергия ($E$) и движение ($p$). Наличие такого соотношения поддерживает внутреннюю последовательность всей математической схемы специальной теории относительности, при этом оно получило (и постоянно продолжает получать) несметное число экспериментальных подтверждений. Отсюда же определяется и собственно энергия движения, которая несколько раз интересовала нас на этой прогулке: это разность между полной энергией $E$, как она определяется из формулы (5.2), и энергией $mc^2$, заключенной в покоящейся массе. В результате оказывается, что выражение для энергии движения содержит гамма-фактор.

Быть может, стоит еще отметить, как именно выражается количество движения $p$ через массу *тела* и его скорость. В главе «прогулка 1» мы подразумевали, что $p = mv$. Но это верно только при малых скоростях. Точное же выражение $p = \gamma mv$ включает гамма-фактор. Он, собственно говоря, и «отвечает» за эффекты, действующие при больших скоростях. Сам он зависит от скорости так:

$$\gamma = \frac{1}{\sqrt{1-\left(\frac{v}{c}\right)^2}}.$$

А количество движения самого света определяется по его энергии: $p = E/c$.

**Экспериментальные подтверждения.** Абсолютность скорости света многократно проверялась экспериментально. Первые и основополагающие опыты Майкельсона — Морли, Кеннеди — Торндайка и других кратчайшим образом суммируются примерно так. Сначала казалось, что свет распространяется со скоростью $c$ (определяемой из записанных Максвеллом уравнений для электрических и магнитных полей) только в специальной среде, заполняющей все пространство, а при передвижении источника относительно этой среды будет зафиксирована какая-то другая скорость. В качестве движущегося источника была остроумно использована Земля, причем таким образом, что не требовалось предварительного знания о характере движения Земли через эту светоносную среду, потому что сравнивались скорости света в двух взаимно перпендикулярных направлениях; движение через среду должно было по-разному влиять на скорость света в продольном и поперечном направлениях. В другом варианте эксперимента использовалось то, что в результате и суточного вращения Земли, и ее обращения вокруг Солнца скорость экспериментальной установки относительно предполагаемой среды меняется с течением времени, а потому можно было зафиксировать изменение скорости света в установке — можно было бы, если бы распространение света действительно было привязано к некоторой среде. Этой среды не обнаружилось, идея светоносного эфира осталась в прошлом, но интерес к экспериментальной проверке абсолютности скорости света не угасал еще некоторое время после того, как эта абсолютность стала общепризнанным научным фактом. Для того чтобы выяснить, зависит ли скорость света от скорости источника относительно наблюдателя, можно использовать космические источники — двойные звезды. Они обращаются друг вокруг друга, и среди всего их разнообразия найдутся такие пары, в которых одна звезда периодически удаляется от нас, а затем, сделав пол-оборота, приближается. Если бы скорость излученного света зависела от скорости источника, такие звезды должны были бы светить в «дерганом» режиме, определяемом тем, как «быстрый» свет догоняет «медленный», испущенный на полпериода раньше; кроме того, видимый характер движения звезды отличался бы от кеплерова. Но ничего подобного в характеристиках света от двойных звезд обнаружено не было, как не было и отклонений от кеплерова движения. С появлением ускорителей, в которых ни шагу нельзя ступить без учета всех эффектов, следующих из абсолютности скорости света, интерес профессионалов к продолжению экспериментов снизился до нуля. В 2011 г. был опубликован результат эксперимента, выполненного с методической целью, по прямой проверке независимости скорости света от скорости источника, в качестве которого использовался пучок быстрых электронов в накопительном кольце. В накопительных кольцах траектория электронов не прямая, из-за чего они излучают электромагнитные волны (называемые в этом контексте синхротронным излучением). Скорость электронов отличается от скорости света лишь на несколько сотен метров в секунду, но никакого сложения скоростей для испущенного ими света не происходит — синхротронное излучение распространяется со скоростью света. Наконец, все системы глобального позиционирования совершенно рутинным образом учитывают эффекты замедления времени в зависимости от скорости (не только от скорости, как мы увидим ниже, но, без сомнения, и от скорости тоже).

Сравнительно недавно интерес к поиску нарушений специальной теории относительности снова вырос из-за возможных модификаций теории гравитации. Имеющаяся теория гравитации (тема следующих прогулок) «объемлет» специальную теорию относительности (обобщает ее), из-за чего сама должна подчиняться ряду ограничений. Если бы обнаружилось, что принципы специальной теории относительности можно каким-то образом нарушать, то и при построении теории гравитации мы могли бы позволить себе большее, и новые ее варианты могли бы оказаться предпочтительными по тем или иным соображениям. В этом контексте и искались возможные нарушения специальной теории относительности по данным наблюдений прежде всего в Солнечной системе; обнаружено их не было.

**Парадокс близнецов.** Отправившись в очередной раз к какой-нибудь звезде, не самой близкой, а потом попросив кого-то подвезти вас обратно, вы обнаружите, что на Земле никого из тех, кого вы знали еще детьми, не осталось: ваше время в ракете шло медленнее, и вы прилетели в будущее, которого не увидели бы, оставаясь дома. Никаких проблем с разным темпом времени не возникает, если только вы не захотите сделать ситуацию симметричной: пусть две ракеты разлетаются в противоположных направлениях. С точки зрения *каждой* из них время на другой течет медленнее. Для наглядности по двум ракетам рассаживают близнецов. Спрашивается, кто же постареет сильнее, когда они встретятся?

Они не встретятся, пока на одной из ракет не включат двигатели, чтобы изменить направление движения и со временем догнать другую ракету. Приняв именно такой план действий, вы можете наблюдать за происходящим с борта второй ракеты — той, которая двигатели не включает. Поскольку вы оказались на борту, относительно вас эта ракета неподвижна, и мы поэтому переименуем ее в (межзвездный) космодром (рис. 5.19). А пункт назначения первой ракеты переименуем в базу (*удаленную* базу — какой-нибудь форпост, куда нужно доставить припасы). Итак, мимо окна вашего кабинета на космодроме пролетает ракета со скоростью 12/13 (около 92,3%) скорости света, направляясь к базе, удаленной на 12 световых лет. У цели ракета окажется через 13 «космодромных» лет — в момент $T + 13$ лет, если пользоваться языком прогулки 2. Вы, правда, знаете, что из-за движения ракеты время на ней течет медленнее в 13/5 раз (таков гамма-фактор для выбранной скорости), и к исходу ваших 13 лет на борту пройдет всего 5.

Для командира ракеты эти 5 лет получаются другим способом. С его точки зрения, база надвигается на него со скоростью 12/13 скорости света, а расстояние до нее не 12 световых лет, а в те же 13/5 раз меньше: $12 : 13/5 \approx 4{,}6$ светового года, откуда и получается, что встреча с базой состоится через 5 лет. Но дальше намечается проблема: по мнению командира ракеты, в течение всех этих пяти лет космодром удаляется от него с той же скоростью 12/13 скорости света, а потому время там течет медленнее, чем на ракете, в те же 13/5 раз, и к моменту встречи ракеты с базой у вас на космодроме пройдет $5 : 13/5 = 25/13 \approx 1{,}9$ года. Меньше двух, а не 13 лет! Потом ракета повернет, снова будет лететь со скоростью 12/13 скорости света, и за время ее обратного полета на космодроме пройдет еще 1,9 года с точки зрения экипажа. Верно? Да. Ракета достигнет базы в момент $T$ + 1,9 + 1,9 лет, т.е. меньше чем через четыре года после старта? Нет.

**Рис. 5.19.** Парадокс близнецов. Сверху: две ракеты разлетаются в разные стороны, одна из них потом разворачивается и догоняет другую ракету. Снизу: то же самое с точки зрения одной из ракет. Для ее экипажа она неподвижна и, чтобы это подчеркнуть, нарисована в виде летающего космодрома. Вторая ракета пролетает мимо космодрома, потом разворачивается и летит обратно

Долетев до базы, ракета выполняет поворот (или разворот) на 180° вокруг базы и начинает движение обратно к космодрому. Это означает переход к другой скорости движения, а значит, картины мира в ракете до и после поворота требуют согласования: это картины мира двух различных наблюдателей. Переход между ними осуществляется математически с помощью гиперболического поворота в пространстве-времени. Слово «гиперболический» сейчас очень пригодится, чтобы отличать эти «математические» повороты в пространстве-времени от настоящего поворота ракеты в пространстве. В результате гиперболического поворота меняется представление об одновременности (мы говорили ранее в этой главе, что понятие одновременности зависит от движения). Сразу после поворота командир ракеты определяет, какой момент времени на космодроме отвечает его текущему «сейчас»: $T$ + 24,1 года. И поскольку с его точки зрения до момента по часам на космодроме остается 5 : 13/5 ≈ 1,9 года, он вычисляет время встречи по космодромным часам как $T$ + 24,1 + 1,9 = $T$ + 26 лет. Это ответ для времени ожидания на космодроме на взгляд экипажа: 26 лет. На космодроме, конечно, никогда не сомневались в том, что ракета вернется в момент $T + 13 + 13 = T + 26$ лет.

Все сходится, и при этом вся магия — в повороте ракеты. За день до поворота момент «сейчас» на ракете ($T + 5$ лет без одного дня) отвечал с точки зрения экипажа моменту $T + 1{,}9$ года на космодроме. Через день после поворота «сейчас» на ракете (в общем, те же $T + 5$ лет) означает $T + 24{,}1$ года на космодроме. Во время поворота что-то происходит с временем; но именно тогда, очевидно, ракета включает двигатели, т.е. испытывает ускорение. Пока ракета двигалась с ускорением, время в ней текло так медленно по сравнению с космодромом, что там прошло 22 с лишним года. Включение двигателей замедляет время, и тот из близнецов, кто этого *не* делал, постарел сильнее. (Эта тема развивается на следующей прогулке, и дело там не ограничится близнецами.)

**Нечто странное видно из ускоряющейся ракеты.** Пока ракета, на которой мы планировали посетить достопримечательности от Альфы Центавра до Андромеды, разгоняется с постоянным «ощущаемым» ускорением, мир за бортом, на взгляд экипажа, своеобразным образом перекашивается. Настоящее место эффектам, которые они видят, — на следующей прогулке, но в качестве разминки перед ней мы обсудим эти странности уже здесь.

Наблюдатели на ракете движутся, конечно, прямолинейно, но не равномерно, а вся схема специальной теории относительности относится к равномерному движению. Я втихомолку игнорировал это усложнение, но мои вычисления и высказывания о картине мира глазами космонавтов обоснованы благодаря вот какому рассуждению. Представим себе, что один из космонавтов выходит из ракеты, не будучи никак к ней привязанным; поскольку у него нет двигателя, он немедленно станет наблюдателем, двигающимся равномерно и прямолинейно — со скоростью, которой ракета достигла на момент его выхода. Конечно, он будет отставать от ракеты, но в течение короткого времени его картина мира будет слабо отличаться от картины мира его товарищей на борту

[97]. Если таких наблюдателей выбрасывать из ракеты непрерывно, из короткого интервью с каждым определять «текущую» картину мира в ракете, а затем сшивать все эти картины воедино, то мы узнаем, как в ракете течет время в ходе всего полета, как оттуда видится окружающий мир и т.д. Это, в общем, законная схема рассуждений.

Экипаж видит мир надвигающимся со стороны Kepler-16b (если мы действительно дали им задание заменить плакат на рис. 5.14 на реалистичный) и затем «падающим» назад, по направлению к Солнцу, неподалеку от которого остался космодром. «Падающим» потому, что, когда случайная частица пыли проносится мимо ракеты и уходит назад, она движется с ускорением 1,5 $g$ относительно ракеты — в общем, так, как падают тела на Земле, только быстрее; то же самое — падение — испытает чашка, которую кто-то на борту выпустит из рук, пока ее не остановит пол каюты (мы ведь и хотели обеспечить в ракете земные условия, только в полтора раза перестарались с ускорением). Но глядя на «падающие» предметы за бортом — которые не ударяются о пол, а уходят все дальше и дальше назад, — экипаж замечает нечто необычное. Удаляясь, предметы сначала ускоряются, но потом начинают *замедляться* и постепенно останавливаются вблизи некоторой воображаемой поверхности — где поэтому накапливается все бóльшая часть вещей, мимо которых ракета успела пролететь. Предметы (включая, разумеется, звезды, если таковые встретились по пути) *зависают*: приближаются к таинственной поверхности все медленнее и медленнее. Исходящий от них свет приходит сдвинутым в красную область спектра, потом в инфракрасную, затем в радиоволны, и в конце концов все то, что близко к поверхности, «тает» — исчезает с экранов всех средств наблюдения, которые только есть на борту; а все часы, которые туда тоже «свалились» в большом количестве (все, что так или иначе связано с периодически повторяющимися процессами), замедляются, причем все сильнее и сильнее по мере приближения к заветной поверхности.

*Позади ускоряющейся ракеты возникает горизонт*

Эта поверхность называется *горизонтом событий*, но для краткости чаще говорят просто «горизонт». Он располагается позади ракеты на расстоянии $c^2/(1{,}5\ g)$ от нее, с точки зрения космонавтов, что вроде бы много в километрах ($6{,}1 \times 10^{12}$ км), но составляет всего лишь 0,646 светового года. Уточнение «с точки зрения космонавтов» — ключевое: ракета непрерывно ускоряется, и относительность все заметнее вступает в свои права. Если в момент старта ракеты вы зажжете лампу на указанном расстоянии $c^2/(1{,}5\ g)$ от нее, то свет отправится по направлению к ракете и, очевидно, будет ее догонять. Стартовое преимущество, которое имеет ракета, будет «съедаться» светом, имеющим преимущество в скорости (он *сразу* летит со скоростью $c$, тогда как ракета начинает с нулевой скорости, а точно скорости света не достигнет никогда); в результате свет от лампы будет подбираться к ракете все ближе и ближе, с точки зрения наблюдателей на космодроме, но гандикап — расстояние $c^2/(1{,}5\ g)$ — выбран так коварно, что свет так и не «дотронется» до ракеты, хотя будет буквально дышать ей в спину. Ахилл и черепаха все-таки реализуются практически по Зенону, пусть и с привлечением супердвигателя и околосветовых скоростей! Впрочем, из-за относительности есть и дополнительный сюрприз: с точки зрения экипажа, Ахилл совсем не фрустрирован тем, что никак не наступит на черепаху, которая уже совсем рядом, — с точки зрения экипажа, Ахилл (свет) вообще не отправился в путь! Вот что происходит. О том, что одновременно со стартом запланировано включение лампы, космонавтам сообщили перед стартом [98]. Они знают, что в момент старта эта вспышка находится в их «сейчас» (случается одновременно со стартом). Пока все просто, но по мере увеличения скорости у экипажа складывается все более отличное от «космодромного» представление о расстояниях и времени — включая представление об одновременности. Вспышка случилась в их безразличном, а это значит, что, с точки зрения каких-то других наблюдателей, она может/могла произойти раньше или позже старта ракеты. Через час после старта, набрав некоторую скорость, экипаж ракеты будет уже «другим» наблюдателем по сравнению с самими собой на старте, с другим представлением об одновременности — результатом некоторого гиперболического поворота от наблюдателей на космодроме. Экипаж проделает необходимые вычисления и обнаружит, что вспышка лампы оказалась в их текущем «сейчас» — через час после старта по часам командира. То же будет через час и одну минуту после старта; дополнительный гиперболический поворот, отвечающий дополнительно приобретенной скорости, оставит событие вспышки в текущем «сейчас» для экипажа. Исходное расстояние $c^2/(1{,}5\ g)$ от источника света выбрано в зависимости от ускорения таким образом, что в картине мира космонавтов, постоянно подправляемой гиперболическими поворотами, событие вспышки остается в текущем «сейчас» на протяжении *всего* полета, причем всегда на расстоянии $c^2/(1{,}5\ g)$ от ракеты. Космонавтам, если они не делают вычислений, буквально невдомек, что с точки зрения космодрома свет от лампы приблизился к ним на один световой день, потом на одну световую минуту, потом секунду (но никогда на нулевое расстояние!). Для них Ахилл так и замер на старте с приподнятой ногой для того, чтобы сделать первый шаг. Это и означает, что время там, на горизонте, с точки зрения экипажа *остановилось*.

Конечно, как только капитан отдаст команду нажать кнопку «стоп» и двигатель выключится, картина мира изменится: скорость перестанет увеличиваться и представления о длинах, промежутках времени и одновременности перестанут ежесекундно меняться, удерживая тем самым Ахилла позади; свет от лампы очень скоро догонит корабль, потом начнет приходить свет от еще более удаленных объектов, и все «перекосы» исчезнут. На следующей прогулке мы увидим, что во Вселенной имеются и более радикальные «перекосы», но уже *без* кнопки выключения.

**Увидеть TRAPPIST-1 и…?** И все же: увидеть все семь планет, обращающихся вокруг TRAPPIST-1, можно всего-то через 4,3 года собственного времени, отправившись туда (по-прежнему на фотонной ракете и с идеальным аннигиляционным двигателем) со стартовой массой, превышающей полезную массу не в тысячи раз, а менее чем в сто — в 82,5, как показано в таблице 5.4. Надо только *все время разгоняться* — не останавливаться, не тормозить начиная с половины пути — вообще не тормозить, а продолжать разгоняться и пролететь мимо пункта назначения на очень приличной скорости: увидеть TRAPPIST-1 *мимолетно*.

А *потом* что делать? (Ведь антивещество на борту все исчерпано.)

**Таблица 5.4.** Путешествия с постоянным разгоном на фотонно-аннигиляционной ракете

| Пункт назначения | *d*, св. г. | *t*, годы | *M*/*m* |
|---|---|---|---|
| Альфа Центавра | 4,3 | 2,3 | 9,8 |
| Звезда Барнарда | 5,96 | 2,6 | 13,2 |
| Сириус | 8,7 | 2,9 | 19,0 |
| Тау Кита | 11,8 | 3,1 | 25,3 |
| Wolf 1061 | 13,8 | 3,3 | 29,4 |
| Gliese 667 | 23,6 | 3,8 | 49,7 |
| TRAPPIST-1 | 39,5 | 4,3 | 82,5 |
| Kepler-16b | 245,4 | 6,0 | 507,6 |
| Стрелец A* | 25 900 | 10,6 | 53 472 |
| ММО | 197 000 | 12,5 | 406 717 |
| Андромеда | 2 520 000 | 15,0 | 5 202 660 |

*Примечание.* Те же путешествия, что и в таблице 5.2, но «навылет» — без торможения, а только с постоянным разгоном; *d* — расстояние до пункта назначения в световых годах; *t* — количество лет, прошедших на ракете (округленно); *M*/*m* — отношение массы *M* ракеты на старте к массе *m*, доставленной к пункту назначения.

## Признания и литературные комментарии

Как я уже признавался, вместо «наблюдатель» надо говорить «система отсчета». «Развертка» пространственных событий в пространство-время, мыслимое как четырехмерное пространство, называется пространством Минковского, а линии в нем, являющиеся разверткой движения в трехмерном пространстве, называются мировыми линиями. Сергей Нечаев подверг критике мое отношение к возможности представить себе четырехмерное пространство; в качестве полезного средства для развития четырехмерной интуиции он обращает внимание на четырехмерный куб, про который многое можно сказать и даже нарисовать (см.,

например, https://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%A2%D0%B5%D1%81%D1%81%D0%B5%D1%80%D0%B0%D0%BA%D1%82).
Обычные и гиперболические повороты в пространстве-времени называются преобразованиями Лоренца; собственно гиперболические — бустами. Все преобразования Лоренца сохраняют *интервал,* вместо чего мне пришлось сказать «скорость света», что почти то же самое после небольшой цепочки рассуждений (к интервалу мы еще вернемся через одну прогулку). Единицы, «в которых масса протона примерно равна 938,272», — это мегаэлектронвольты.

Книга Леонида Пономарева [22] еще встретится нам на следующих прогулках, а приведенная цитата из нее — часть захватывающей истории о том, как идея об извлечении энергии из деления ядер внезапно перешла из разряда невозможных во вполне реальные. Там же в больших подробностях рассказано о термоядерном синтезе на Солнце: какие процессы приводят к превращению водорода в гелий.

Едва ли какая-нибудь еще книга для первого знакомства с теорией относительности сравнится с «Теорией относительности для миллионов» Гарднера [9]. Следующей вехой в развитии знакомства со специальной теорией относительности для меня стала книга [32]. Стиль, которым она написана, сейчас не выглядит слишком необычным, но в момент появления книги (оригинальное издание вышло в 1966 г.) он, несомненно, должен был обращать на себя внимание. Среди прочего книга содержит обширные фрагменты, доступные более широкому читателю; правда, они перемешаны со всем остальным. Ее идеологическим продолжением явилось изложение разнообразных аспектов общей теории относительности [18] (оригинал этой книги вышел в 1973 г.); там, в частности, рассматривается движение в постоянно ускоряющейся ракете. Горизонт, возникающий для ускоренного наблюдателя, называется горизонтом Риндлера. Эта тема привлекала к себе внимание немалое число раз, одно из изложений доступно на странице Грэга Игана [64] — автора фантастического романа, где звездолет носит название «Риндлер».

С сокращением продольных длин связана отдельная тема, обсуждение которой сильно увело бы в сторону, но которую следует хотя бы назвать — то, как *выглядит* пролетающее мимо протяженное тело. Здесь возникает дополнительный эффект из-за того, что в глаз наблюдателя или объектив фотоаппарата «сейчас» приходит свет, испущенный разными частями тела в *разные* моменты недавнего прошлого, и в результате изображение на сетчатке или на матрице фотоаппарата оказывается довольно неожиданным. Это явление известно как эффект Пенроуза — Террелла и включает в себя далеко не только сокращение продольных расстояний. (А чтобы зафиксировать сокращение продольных расстояний само по себе, не отягощенное «фотографическим» эффектом, длину движущейся ракеты надо определять не на глаз или по фотографии, а по щелканью датчиков, которые срабатывают, когда вплотную к ним пролетают нос и корма ракеты.)

Рассуждения, приводящие к формуле $E = mc^2$ исходя из картины, представленной на рис. 5.7, приведены в [69] (они несколько спрямляют исходные рассуждения Эйнштейна). Там обсуждаются и другие аспекты Самой знаменитой формулы. Прецизионные измерения, подтверждающие теорию относительности уже на «бытовых» скоростях, описаны в работе [56]. Ион может поглощать свет, частота которого совпадает с одной из «внутренних» частот этого иона; но на частоту — количество колебаний в единицу времени — оказывает воздействие темп, с которым течет время. Один из ионов (в ионной ловушке и со множеством других хитрых подробностей) приводился в движение, после чего измерялась частота поглощаемого им света. Она оказалась отличной от частоты, которую поглощает неподвижный ион. Различие в частотах можно перевести в различие в ходе времени. Впечатляющие экспериментальные возможности позволили обнаружить замедление времени в число раз, близкое к 1,000000000000005 (14 нулей). Отличие от единицы ничтожно, но оно есть и оказалось в точности таким, какое ожидалось. Эксперимент по «еще одной», методической, проверке независимости скорости света от скорости источника описан в [1]. Менее специализированное изложение доступно на сайте https://elementy.ru/nauchno-populyarnaya_biblioteka/431608.

Рисунок 5.13 взят из https://theconversation.com/is-alpha-centauri-the-right-place-to-search-for-life-elsewhere-57716. Плакат на рис. 5.14 взят с сайта https://apod.nasa.gov/apod/ap160220.html, а изображение Малого Магелланова Облака на рис. 5.15 — с сайта http://dslr-astrophotography.com/small-magellanic-cloud-tuc-47/.

У слова «вселенские», использованного в заглавии части 2, несколько значений; я, конечно, имел в виду «прогулки по Вселенной».

## Движение на прогулке 5

Свойства движения глубоко связаны с существованием пространства и времени в виде пространства-времени. Из-за их «сговора» оказывается возможным существование абсолютной скорости — скорости света, воспринимаемой одинаково вне всякой зависимости от движения наблюдателей относительно источника света. Но, наблюдая друг за другом, разные наблюдатели обнаружат различия в темпе времени и в длинах вдоль направления движения. Логическая непротиворечивость такого устройства поддерживается тем, что переход к относительному движению имеет геометрическое описание как гиперболический поворот в пространстве-времени, перемешивающий временное и пространственное направления. Все наблюдатели, движущиеся равномерно относительно друг друга, при этом равноправны в отношении всех физических законов, и каждый такой наблюдатель может считать себя неподвижным. Сложение скоростей относительного движения происходит не как арифметическое сложение, и тем самым обеспечивается недостижимость скорости света.

Из свойства движения в пространстве-времени, где есть абсолютная скорость, логически следует, что масса и энергия суть одно и то же. Связь между массой и энергией в случае движущихся тел показывает, что энергия движения возрастает неограниченно при попытке разогнаться до скорости света, что делает скорость света недостижимой для любого тела, которое в принципе может находиться в покое относительно какого-либо наблюдателя. Для гипотетических сверхвысокотехнологичных космических путешествий с постоянно включенными двигателями замедление времени позволяет в принципе достичь объектов в пределах Галактики за относительно небольшое время для экипажа, но необходимая для этого энергия оказывается столь велика, что масса топлива должна в колоссальное число раз превосходить массу полезной нагрузки.

Абсолютная скорость является максимальной скоростью передачи сигналов, что полагает границы прошлому, которое способно повлиять на «здесь и сейчас», и будущему, на которое в принципе можно повлиять из «здесь и сейчас». Для событий, лежащих вне прошлой и будущей зон влияния, даже порядок их следования во времени зависит от движения наблюдателя. Предположение о возможности распространения сигналов быстрее скорости света приводит к логическим сложностям в виде петель во времени.

## Прогулка 6

# Всеобщее свободное падение

**Маршрут:** *Свободное падение: одно для всех. — Невесомость. — Склейка простого в сложное. — Самые прямые в искривленном. — Геодезические на смену Кеплеру и Ньютону. — Равенство без исключений. — Падения света. — Отрезанный ломоть пространства-времени. — Правила черной дыры для навигации. — Часть времени не помещается. — Кривизна: расхождение геодезических. — Нельзя не вращаться.*

**Главный герой:** *геодезические*

---

**Свободное падение: одно для всех.** Один аспект движения вокруг нас, который трудно не замечать, состоит в том, что тела *падают* (когда вы последний раз роняли чашку?). Смысл анекдота про Ньютона, сидящего под яблоней и разглядывающего Луну, в том, что и Луна тоже падает, причем по тем же законам, что и яблоко в его саду, только с другими начальными условиями [99]. В действительности Ньютону потребовалось некоторое время, чтобы сформулировать рассуждение, выраженное рисунком с пушкой на горе в его «Началах» (рис. 6.1). Идея здесь именно в том, что движение по околоземной орбите — это свободное падение. По мере увеличения скорости выстрела сначала снаряд приземляется все дальше от пушки, а затем скорость оказывается достаточной, чтобы, продолжая падать, снаряд так и не достиг земной поверхности: он постоянно поворачивает к центру Земли, но из-за большой скорости постоянно промахивается. Выражаясь современным языком, это и означает выход на орбиту. Сейчас изображенное на рисунке не изумляет ничем, кроме изящности самого рассуждения; но стоит помнить, в какой высокой степени это был именно мысленный эксперимент. Ньютон, кстати, смело пририсовал еще две — круговую и эллиптическую — орбиты, не уточняя, как туда попасть.

Свободное падение — вид движения, совершаемый всеми телами одинаково. Галилей первым понял, что движение падающего тела не зависит от его массы. Видимые же на Земле различия в падении пушинки и монеты определяются не притяжением Земли, а как раз наличием других воздействий — сопротивлением воздуха. Поэтому если быть педантом, то запускать тела из суперпушки надо на Луне. Кстати, на астероидах, если только они достаточно сферичны, вполне можно поупражняться таким образом практически вручную. На карликовой планете Церера, уже встречавшейся нам на прогулке 1, для запуска маленьких искусственных спутников понадобится ружьецо в космическом исполнении: скорость выхода на орбиту там около 360 м/с. На спутнике Сатурна Мимасе — 112 м/с: это близко к скорости, которую профессионалы сообщают бадминтонному волану сразу после удара; в общем, тренируйтесь и выходите с ракеткой, волан сделает оборот и вернется.

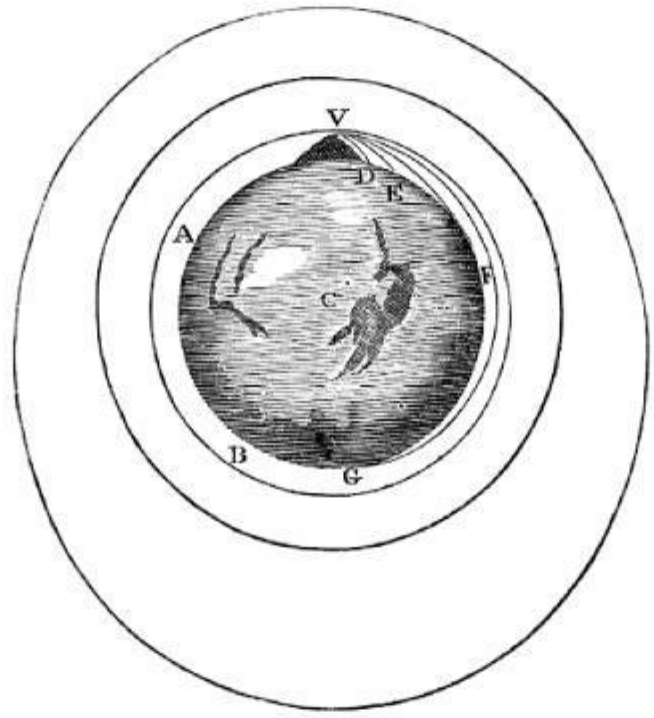



**Рис. 6.1.** Ньютон: от падения на поверхность Земли до движения по орбите

Одинаковое для всех ускорение должно показаться странным, если вспомнить, что у каждого тела своя масса, а масса есть мера инерции, т.е. выражает «неохоту к перемене движения». Движущийся автомобиль массой 5 тонн останавливается — *меняет* характер своего движения — «неохотнее», чем велосипед, едущий с той же скоростью. То же самое и с разгоном: грузовик с велосипедным приводом определенно уступит собственно велосипеду, потому что одно и то же усилие («сила», если выражаться точно) применяется к телам разной массы, т.е. с разной инерцией. Но не так со свободным падением. Гравитация *в точности компенсирует* различия в инертности: одна и та же Земля притягивает более массивные тела как раз во столько раз сильнее, во сколько раз они массивнее, а потому «ленивее». Трамвай массой 15,3674 тонны притягивается *точно* в 15 367,4 раза сильнее, чем гиря массой 1 кг. Налицо некоторый заговор материи и гравитации. Расследование показало, что основные фигуранты не совсем те, кем кажутся. Поиск настоящих виновников привел к результатам, которые в огромной степени превзошли ожидания, кардинально изменив наши представления о Вселенной.

**Рис. 6.2.** Стармэн

*****

**Невесомость.** Основным свидетелем на первых порах была невесомость. Из-за «договоренности» между инерцией и гравитацией холодильник, забытый в свободно падающем лифте, не давит на пол, а пол не давит на холодильник. Все без исключения весы, независимо от своего устройства, сообщают об исчезновении веса при движении под действием одной только гравитации [100]. Стармэн (рис. 6.2) не давит ни на сиденье, ни на спинку сиденья, ни на ремни безопасности. При этом неважно, какие виражи он заложит: пролетит ли вблизи Марса, а если да (хотя, скорее всего, нет), то захватит ли его тяготение планеты, или же выбросит куда-нибудь подальше. Никакого прижимающего усилия на поворотах! Свободное падение — это движение под действием *какой угодно* гравитации; траектория движения при этом — уж какая получится, но невесомость обеспечена всегда. Летящий к Луне космический корабль падает к Луне все время после старта с околоземной орбиты, за исключением коротких коррекций («на три короткие секунды включения двигателя служебного модуля Майк Коллинз окажется за рулем вместо сэра Исаака Ньютона»). Траекторию этого падения определяет притяжение Земли, Луны и Солнца. Про «Луну-1» можно сказать, что она падала сначала на Луну, а потом на Солнце. Маневр гравитационной пращи для «Вояджеров» (см. рис. 2.10) — это тоже свободное падение ровно в той мере, в какой отсутствовали другие воздействия (реактивная тяга, сопротивление газа, давление света). Любое такое движение сопровождается невесомостью.

### *Масса выполняет две различные функции*

### *Полное подчинение гравитации выключает ее*

Невесомость — особый вид взаимной гармонии падающих свободно. И для каждого участника это способ устранить гравитацию лично для себя. Стоит только полностью подчинить движение гравитации, как она, гравитация, как будто бы *выключается*: ни одна чашка не разобьется, как если бы никакой гравитации не было вовсе. Этот фокус неизменно удается безо всяких специальных приготовлений (кроме устранения других, негравитационных сил) именно потому, что масса тела делает два дела сразу: выражает его нежелание изменять свое движение (инерцию) и одновременно степень его участия в гравитационном взаимодействии. Ньютон, наблюдая за маятниками, смог установить, что эти две разные вещи действительно выражаются одним и тем же числом, с точностью около $10^{-3}$ (одной тысячной). В 1908 г. опыты Этвёша дали результат около $10^{-8}$ (одной стомиллионной). Неплохо, но, имея за плечами опыт предыдущей прогулки, уместно спросить, не может ли быть так, что это верно только при малых скоростях и/или для достаточно слабой гравитации? Ускорение свободного падения вблизи Земли невелико; сохранит ли движение под действием гравитации волшебное свойство «выключать» эту гравитацию, когда и ускорения, и скорости возрастут? Мы видели на прогулке 5, сколь многое из того, что кажется истинным при малых скоростях, на самом деле работает совсем по-другому. А все, что связано с гравитацией, приобретает дополнительную остроту: мгновенная передача гравитационного воздействия на сколь угодно большие расстояния, тревожившая уже Ньютона в 1692 г. (см. главу «прогулка 1»), после 1905 г. вступила в открытое противоречие с пониманием, что никакой физический агент не может распространяться быстрее света. В законе гравитации Ньютона скорость ее распространения не предусмотрена, а значит, этот закон в любом случае следует как-то модифицировать. Но как же узнать, остается ли «правильное» тяготение в том же сговоре с движением, из-за которого свободное падение происходит всегда одинаково для всех? Каким принципам доверять? Увы, от эксперимента реальной помощи тут нет: наши возможности разгонять что-то массивное до больших скоростей и ставить опыты с по-настоящему сильной гравитацией сильно ограничены, если выражаться оптимистически. Сверхточные измерения, позволяющие «ухватывать» крохи эффектов, в полной мере разворачивающихся где-то во Вселенной, но у нас проявляющих себя совершенно пренебрежимым образом, — это уже главным образом XXI век [101]. Тем не менее еще в начале XX в. удалось понять, как связаны движение, гравитация и материя, опираясь при этом на логические построения, примененные к удачно выбранному принципу и подкрепляемые необходимой математикой.

Достигнутое понимание двух вещей сразу — движения с любыми скоростями при наличии гравитации и самой гравитации, включая ее «производство», — известно как общая теория относительности, или теория гравитации Эйнштейна. Слово «относительность» указывает на равноправие различных (вообще-то *всех*) видов движения: законы природы никак не выделяют одни перед другими. Одинаковое действие законов природы для различных наблюдателей было в фокусе внимания на предыдущей прогулке, но только для наблюдателей из специального класса — движущихся равномерно и прямолинейно. Свободно падающие, или ускоряющиеся в ракете, или тормозимые трением, или разгоняемые солнечным ветром оставались дискриминированными по признаку наличия ускорения по отношению ко всему сонму «равномерных и прямолинейных» наблюдателей. *Общая* теория относительности — это полная победа демократии в отношении всех видов движения, но она потребовала вовлечения гравитации, а саму гравитацию пришлось для этого *перепридумать*. Из «теории всеобщего тяготения» гравитация в одной своей части превратилась в «теорию всеобщего свободного падения», а в другой — во взаимоотношения материи и пространства-времени. В результате мы научились понимать устройство Вселенной далеко за пределами курортного мирка Солнечной системы, но такая отдача потребовала серьезных инвестиций: полная теория достаточно сложна. К знакомству с ней приглашает тезис, принадлежащий Уилеру (он появлялся в главе «прогулка 5» и появится еще):

### *Это тизер общей теории относительности*

Пространство-время говорит материи, как ей двигаться; материя говорит пространству-времени, как ему искривляться.

Оба слова «говорит» тут — это указания на законы природы. Если говорить чуть более развернуто, эти законы утверждают, что гравитация, материя и движение связаны через геометрию пространства-времени. В присутствии материи пространство-время становится искривленным — в том смысле, что параллельные линии ведут себя не так, как мы привыкли, а сумма углов треугольника не равна 180°. Слово «геометрия» понимается в этом контексте в первую очередь как *отличие* от неискривленной геометрии — той привычной, где сумма углов треугольника все-таки 180°. Про неискривленную геометрию еще говорят, что она плоская [102]. Искривленная геометрия, в свою очередь, определяет движение всех чашек, снарядов, спутников и вообще любых пробных тел, которые мы пожелаем разбрасывать, — и даже не только тел, но и света.

### *Гравитация выражает отличия геометрии от плоской*

Дорога к новому — геометрическому — пониманию движения при наличии гравитации, как и к пониманию самой гравитации, начинается с признания, что для каждого куска материи одна и та же величина под названием «масса» *всегда* исполняет две функции: служит мерой инерции и мерой участия в гравитационном взаимодействии. Отсюда буквально полшага до провозглашения общего принципа, который затем становится частью «техзадания» для построения теории гравитации и движения при наличии гравитации. Этот принцип гласит, что любое движение невозможно зафиксировать внутренними средствами при наблюдении «в малом». В отсутствие других сил, кроме гравитации, никакие действия, которые вы пожелаете осуществить в изоляции от внешнего мира на борту *достаточно малой* ракеты, не позволят вам определить, движется ли ракета относительно чего бы то ни было и испытывает ли она действие гравитации. Требование, чтобы ракета (железнодорожный вагон, автомобиль, каюта…), в которой вы или другой упрямый наблюдатель проводит опыты, была достаточно малой, определяется тем, с чем мы встретились на прогулке 4: приливными силами. Длинный железнодорожный вагон (рис. 6.3) будет испытывать на околоземной орбите сжатие или растяжение, потому что гравитация Земли действует на разные его части по-разному, и тогда помещенный в него наблюдатель догадается, что поблизости есть источник гравитации. Но уменьшая «каюту», доступную наблюдателю, можно сделать такие перекосы сколь угодно малыми (вместе с пространственным охватом надо, кстати, ограничить и временной). Фактически мы оставляем наблюдателю небольшой кусок пространства-времени и предлагаем ему ставить опыты с целью удостовериться, что все законы природы у него в точности те же, какие были установлены в пределах элитного клуба «равномерных и прямолинейных» наблюдателей. А раз отличий нет, то у наблюдателя нет способа убедиться ни в присутствии гравитации, ни в собственном движении с ускорением относительно «равномерных и прямолинейных» наблюдателей.

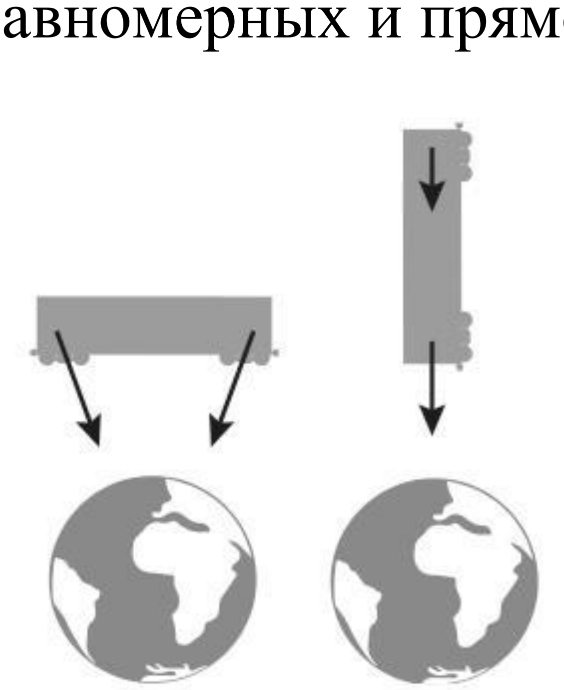


**Рис. 6.3.** Почему требуется, чтобы «каюта», в пределах которой наблюдатель изучает мир, была малой. *Слева:* направления к центру Земли различаются в двух концах вагона-лаборатории. *Справа:* расстояния до центра Земли различаются в двух концах лаборатории. В обоих случаях разницу между силами притяжения можно зафиксировать внутренними средствами

Отсюда вовсе не следует, что «никакой гравитации нет»; и гравитация есть, и порождаемые ею эффекты (как, например, черные дыры) есть. Но «все интересное» возникает как результат соединения воедино простых локальных картин. Сложное в том, как соединяется простое. Так строится и искривленная геометрия.

*****

**Склейка простого в сложное.** Транссибирская магистраль — это железная дорога длиной 9288 км. Если бы (скажем, для развлечения) жители населенных пунктов, расположенных вдоль дороги [103], отобрали картографов, каждый из которых снабжен картой своего района и близких окрестностей, но по стечению обстоятельств вызывающе необразован во всем остальном, и поручили им составить единую карту, то картографы столкнулись бы с проблемами. Все они привезли бы с собой карты, выполненные в близких масштабах, а кроме того, перекрывающиеся по краям: скажем, село Танга присутствует и на карте, привезенной из Петровска-Забайкальского (станция Петровский Завод), и на карте, привезенной из Читы. Но при попытке соединения локальных карт в одну большую возникли бы разногласия о том, где, собственно, север. В некотором роде направления на север различаются тем сильнее, чем дальше друг от друга находятся две области. Решение, к которому картографы могли бы прийти, чтобы не рассориться, — забыть про общий для всех север, а вместо этого договориться только попарно между соседями о том, как сопоставлять правый край карты, скажем, из Анжерска с левым краем карты из Мариинска, и точно так же — правый край карты из Мариинска с левым краем карты из Боготола и т.д. Буквальное наложение карт друг на друга по краям оказывается при этом неточным и требует некоторых усилий для установления соответствия в области перекрытия.

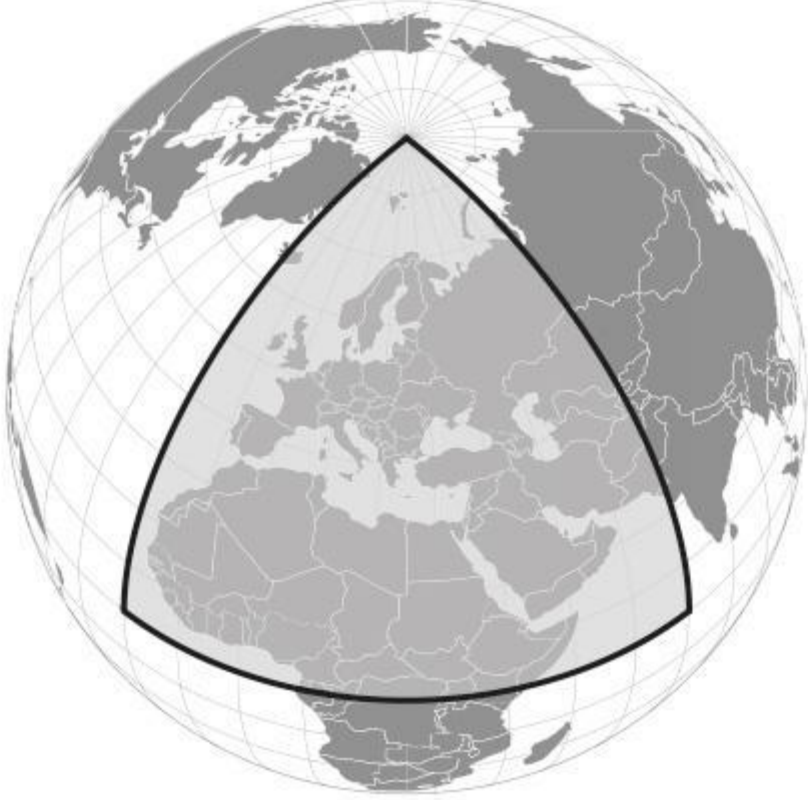


**Рис. 6.4.** Сферический треугольник образован «самыми прямыми из возможных» линиями на сфере (глобусе), но сумма углов этого треугольника сильно отличается от 180°: она составляет 270°

Мы-то знаем источник проблемы: карты на самом деле покрывают часть глобуса, и про меридианы, на которых расположены Москва (37°36'56" в.д.) и Владивосток (135°42'34" в.д.), никак нельзя сказать, что они параллельны, несмотря на то что оба указывают на север, — они пересекаются у Северного полюса под углом 98°. В треугольнике, образованном этими двумя меридианами и отрезком экватора между ними, сумма углов равна 278°, что больше трех прямых углов. (Вот она, искривленная геометрия!) Похожий треугольник — с *тремя прямыми* углами — изображен на рис. 6.4. Неудивительно, что у картографов возникают сложности, когда они раскладывают карты по плоской поверхности стола, где сумма углов треугольника всегда 180°.

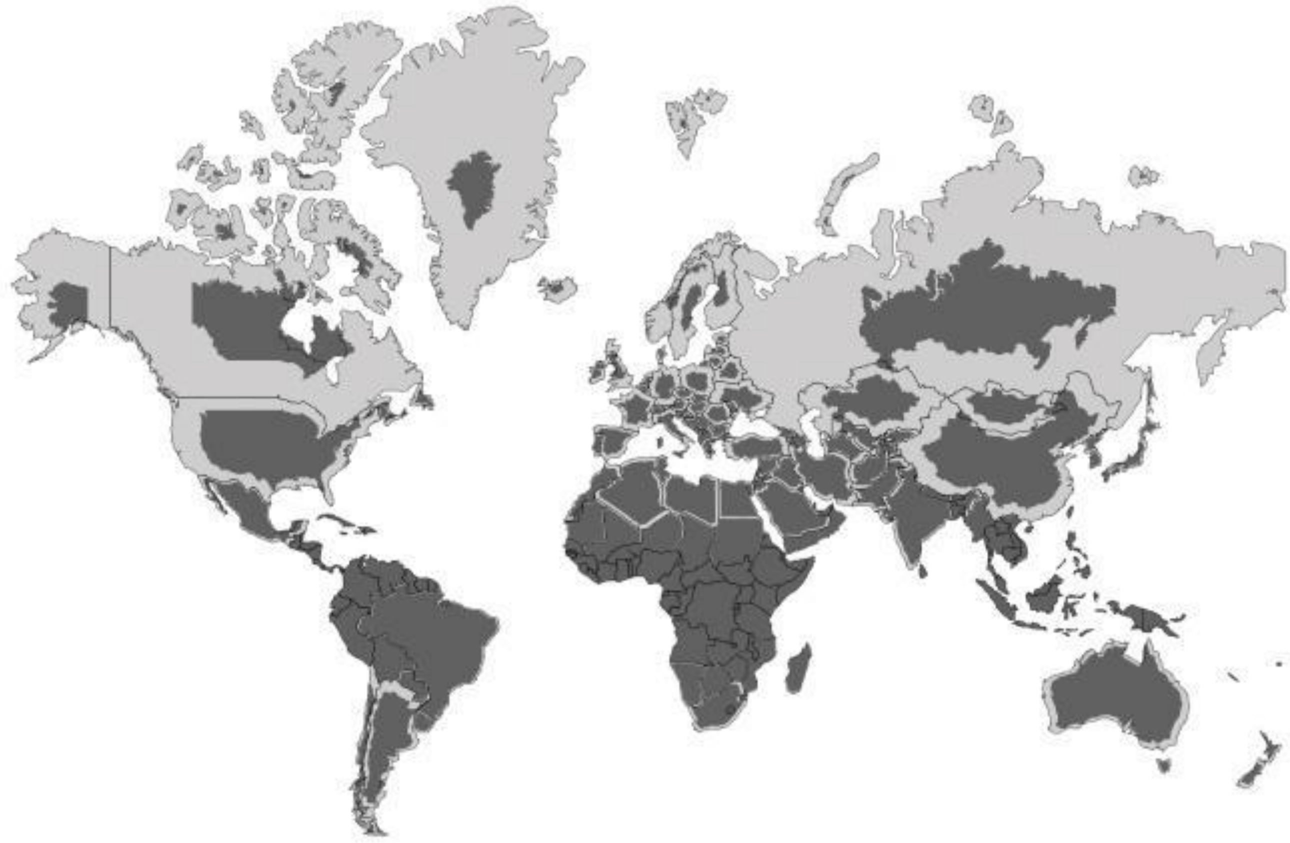


**Рис. 6.5.** В проекции Меркатора размеры искажаются все сильнее по мере удаления от экватора (истинные размеры некоторых стран и областей показаны темным). Для того чтобы по расстояниям на карте определить расстояние по земной поверхности, требуются поправочные множители, причем разные в различных точках

Локальные представления, устроенные настолько просто, что не вызывают затруднений даже у горе-картографов, могут оказаться частью чего-то глобально более сложного, часто — *искривленного*. Сфера имеет кривизну, и ее нельзя накрыть одной картой, даже если разрешить себе любые гладкие (без разрезов) искажения форм и размеров. В проекции Меркатора (рис. 6.5) радикально увеличены в размерах полярные области (маленькая Антарктида оказывается суперматериком, а Гренландия приобретает размер Африки, хотя в действительности она в 14 раз меньше по площади). Но настоящая проблема, собственно, с полюсами: если строго следовать геометрическим предписаниям по построению проекции, то они должны оказываться «бесконечно» далеко сверху и снизу; в реальности их помещают на некотором произвольном расстоянии от экватора, но каждый полюс при этом приходится изображать линией. Раздувать точку в линию — намного более «плохая практика», чем искажения формы и размера. Из-за кривизны сферы на ней нельзя нарисовать координатную сетку, которая работала бы во всех точках: как минимум в одной точке она непременно откажет. Стандартные координаты на земном шаре/глобусе — широта и долгота — введены для того, чтобы каждой точке на поверхности отвечали два числа; получилось же — каждой, кроме полюсов. В полюсах сходятся все меридианы и поэтому *нет* значения долготы (а все направления указывают на юг с Северного полюса и на север с Южного).

Не только сферу не накрыть одной картой с хорошей и всюду пригодной координатной сеткой. Похожее может случиться в пространстве-времени, стоит только расширить жизненный опыт за пределы того, что доступен «равномерным и прямолинейным» наблюдателям. Например, как мы видели в добавлениях к предыдущей прогулке, космонавты в ускоряющейся ракете теряют возможность разобраться, что творится за определенным пределом. Координаты — «разметка» пространства-времени, — которые они вводят для описания мира со своей точки зрения, не работают глобально.

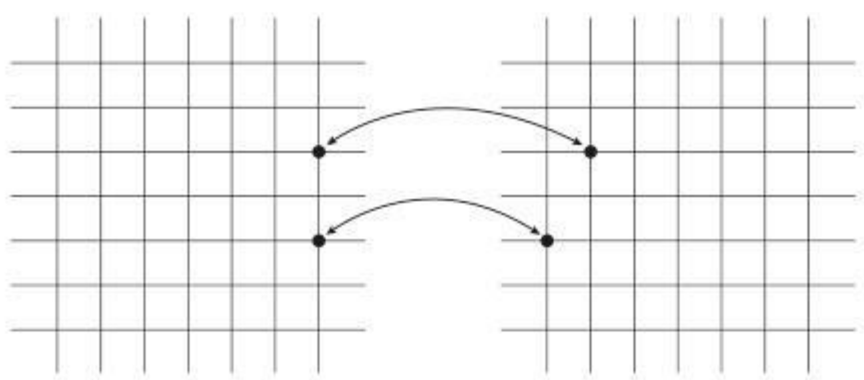


**Рис. 6.6.** Отождествления одних и тех же пунктов на двух картах. Если склеить карты так, чтобы соответствующие точки наложились друг на друга, координатные линии окажутся изогнутыми

Кривизна возникает, когда мы выбираемся за пределы локального. Сложное — искривленное — возникает в результате попарных склеек друг с другом простых локальных карт. Встреченные нами картографы устанавливают соответствия между одними и теми же пунктами в областях пересечения соседних карт, как схематично показано на рис. 6.6. Склейка карт по приграничным областям таким образом, чтобы все соответствующие пункты наложились друг на друга, требует деформации плоских листов, на которых эти карты нарисованы [104]. Из таких деформированных листов может «собраться» искривленная поверхность — например, сфера (а могут и другие!).

Географические карты двумерны, а куски пространства-времени четырехмерны, и потому там несравнимо богаче разнообразие возможностей для склейки сложного (искривленного) из простых кусков. Вместо воображаемых картографов мы расселяем про пространству-времени воображаемых *локальных наблюдателей*. Локальные наблюдатели тоже называют свои куски пространства-времени картами (это в данном случае профессиональный термин). Важное отличие от горе-картографов: у наблюдателей в пространстве-времени нет априорной сетки из параллелей и меридианов. Честно говоря, и картографы вполне могли бы оказаться в ситуации типа изображенной на рис. 6.7, если они не умеют определять направление на север. Но у них по крайней мере есть города, деревни, реки и отдельно стоящие деревья, чтобы установить соответствие между приграничными областями соседних карт; а в пространстве-времени ничего этого может не оказаться под рукой. А что есть в пространстве-времени, чтобы «привязывать» соседние карты друг к другу? Движение, причем в его самом популярном варианте: свободное падение. Его-то мы сейчас и используем.

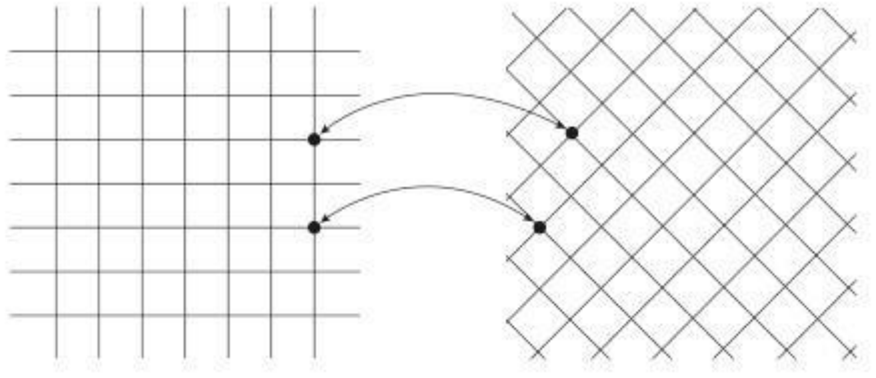


**Рис. 6.7.** Составители двух соседних карт наносят координатную разметку каждый по-своему

*****

**Самые прямые в искривленном.** Каждая карта, окружающая локального наблюдателя, — это маленький мирок, воспроизводящий фрагмент плоского пространства-времени, а там небольшие тела («камни»), предоставленные самим себе, движутся по прямым линиям с постоянной скоростью — в данном случае относительно наблюдателя, т.е. хозяина карты. Этим, собственно говоря, и поддерживается невесомость в кабине космического корабля, где поместился наш локальный наблюдатель. «Но как же это по прямой с постоянной скоростью?! — слышу я возмущенное недоумение. — Ведь космический корабль летит *вокруг* Земли, а вовсе не по прямой!» Конечно, все дело в склейке карт. У наблюдателя, как мы договорились, малый кусок пространства-*времени*, а это, в частности, означает, что ставит он свои опыты недолго. За очень небольшое время он не успеет никуда «завернуть». А на чуть более поздней стадии полета сидящего в кабине космонавта уже надо рассматривать как *другого* локального наблюдателя. Вокруг него все предметы в кабине корабля тоже движутся по прямым линиям с постоянной скоростью. Но картину мира первого локального наблюдателя необходимо подвергнуть преобразованию «на краю», чтобы сшить с картиной мира второго локального наблюдателя! В областях склейки карт требуется система соответствий, для того чтобы «передавать» описание движения из одной карты в другую. Простые локальные картины соединяются в нечто глобальное.

Это глобальное мы и называем искривленным пространством-временем. Оно может быть устроено сложно (пример, если забежать вперед, — черная дыра), но сохраняет ключевую преемственность с плоским в отношении движения. В «обычном» плоском пространстве предоставленное самому себе тело движется по прямой с постоянной скоростью. *Развертка* такого движения в пространстве-времени — прямая линия. Зафиксируем это: движение предоставленного самому себе тела описывается прямой в плоском пространстве-времени. «Преемственность» же состоит в том, что движение предоставленного самому себе тела в искривленном пространстве-времени описывается *самой прямой линией из всех, какие там возможны*. Там, где из-за кривизны нет «настоящих прямых», имеются тем не менее прямые-насколько-возможно. Например, на сфере или, что выразительнее, на глобусе эти насколько-возможно-прямые линии —

окружности большого круга, в том числе экватор (но не другие параллели) и все меридианы. Любые дуги таких окружностей называются для краткости геодезическими. Путешествующий по геодезической заключает из своего текущего опыта, что движется по прямой. Для примера на рис. 6.8 показан самый длинный *прямой* путь, проведенный на земном шаре только по воде. Его длина — 32 090 км; тот факт, что это действительно окружность большого круга, можно самостоятельно проверить на глобусе, но это видно и из рис. 6.9, откуда заодно понятно, что этот путь и правда лучшее приближение к прямой, да в некотором смысле прямая и есть.

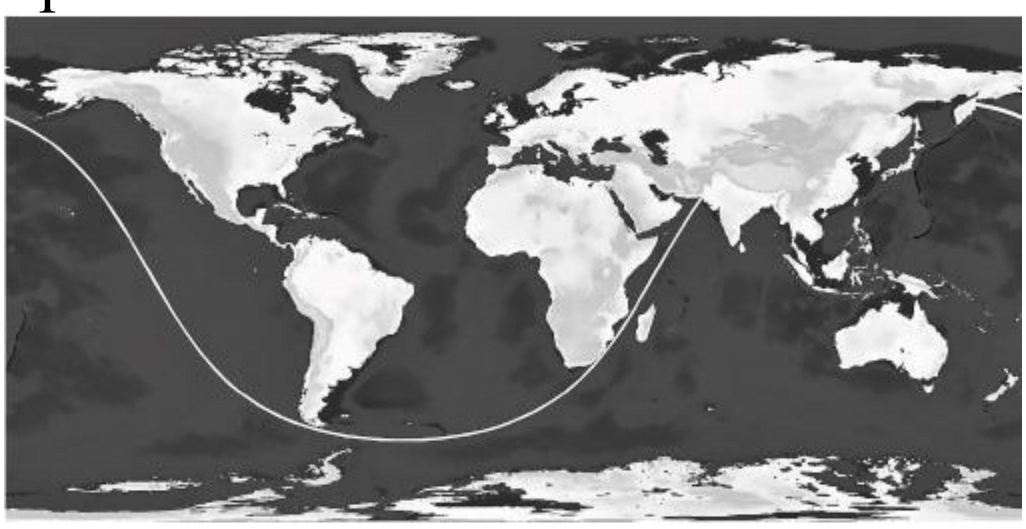


**Рис. 6.8.** Самый длинный прямой путь по поверхности Земли, проходящий только по воде

**Рис. 6.9.** Три фрагмента пути, изображенного на предыдущем рисунке

Лучшее возможное приближение к прямым в искривленном пространстве-времени — это математически определенный класс линий, для которых не очень оригинально оставили название *геодезические* (слово «линии» обычно опускают, превращая «геодезические» в существительное). И вот главное: все эффекты гравитации предлагается описывать, вводя *такое* искривленное пространство-время, что геодезические в нем — это в точности развертки движения под действием гравитации. Мы добрались до формулировки закона природы, обобщающего ряд наблюдений о движении, включая одинаковость движения всех тел под действием гравитации: в отсутствие других воздействий, кроме гравитационного, развертки движения — это геодезические в искривленном пространстве-времени. Такой закон движения несколько необычен из-за появившейся в нем *геометрии*, к ведению которой относится понятие «геодезические», но он оказался необычайно плодотворным (снова забегая вперед: именно отсюда следовало объяснение поворота орбиты Меркурия, и это было только начало!). Раз появившись, геометрия хочет теперь изгнать гравитацию как силу: стоит только каким-то независимым способом описать искривленное пространство-время, геодезические в котором точно отвечают движению под действием гравитации, как гравитация в качестве отдельной сущности больше не нужна. Все, что она могла сказать «разбросанным камням» (материи), — как им двигаться, но это можно теперь получить из математического описания искривленного пространства-времени: надо только найти в нем геодезические.

### *Геодезические — развертки свободного падения*

Замена гравитации геометрией — шаг прогрессивный, потому что он позволяет не вводить две разные сущности: пространство-время и действующую *в нем* гравитацию, которые к тому же как-то договорились, чтобы свободное падение локально выключало гравитацию. Вместо этого есть *одна* сущность — искривленное пространство-время, которое и проявляет себя как гравитация. Как проявляет? «Через геодезические», т.е. геометрически. «Пространство-время говорит» из тезиса Уилера — это высказывание про закон природы, согласно которому в отсутствие других воздействий, кроме гравитационного, движение пробных тел в пространстве описывается геодезическими в искривленном пространстве-времени. В ньютоновском представлении тела движутся по прямым линиям, пока на них не подействует какая-то сила, сбивая их с этих прямых. Более общее эйнштейновское понимание состоит в том, что движением тел управляют геодезические до тех пор, пока не вмешается какая-либо *негравитационная* сила! Гравитация, таким образом, «поглотилась» геометрией, она вся уже содержится в том, как устроены геодезические.

И заодно всякое свободное падение — движение под действием только гравитации — зачисляется теперь в «привилегированный» класс движений, при которых все законы природы одинаковы. Каждый наблюдатель, который так движется, волен эгоистично объявить себя неподвижным, а мир вблизи себя считать устроенным максимально просто — как (маленький, конечно) кусок обычного, плоского пространства-времени. Это, собственно, и есть его карта. А вот общение с другими членами клуба требует согласования картин мира — перевода данных между картами.

Но теперь возникает задача описания искривленного пространства-времени в целом. Нужны средства — разумеется, математические. Они должны сообщать нам все то знание, которое можно собрать по крохам, имея дело с толпой локальных наблюдателей, расселенных по картам; но при этом хотелось бы избежать «миллиона согласований» между локальными картинами мира и вообще не оплачивать каждый раз массовку. Подходящее для этого средство нашлось, и используется в нем то, что больше всего на слуху, когда речь заходит об искривленных геометриях: «фокусы» с параллельными линиями. В обсуждаемом сейчас случае возможностей для «фокусов» особенно много, потому что искривленное пространство-время искривлено в разных своих точках по-разному, и само понятие параллельности меняется от точки к точке. На него и переносится основное внимание. Если его — понятие параллельности — *задать* повсюду в пространстве-времени, то это, по существу, и определит, что за искривленное пространство-время получилось. При этом, в отличие от расхожего примера, каким является глобус, доступный нашему наблюдению со стороны, нет решительно никакого способа посмотреть со стороны на пространство-время. Действовать поэтому надо средствами, которые имеются у наблюдателей, живущих внутри; если они смогут тем или иным образом самостоятельно задать параллельный перенос, то будут в состоянии отвечать на вопросы об устройстве их искривленного пространства-времени.

Для «определения параллельности» внутренними средствами, как выясняется, недостаточно самих по себе двух точек, в которых мы желаем определить параллельные направления: нужно еще выбрать какую-то линию, их соединяющую, как показано на рис. 6.10. Математическое знание под названием *параллельный перенос* тогда сообщает, *что* значит перенести стрелку из одной точки в другую *вдоль* выбранной линии. Правда, результат параллельного переноса *зависит* от этой линии! В плоском пространстве мы привыкли к более простой ситуации: если две стрелки, прикрепленные к разным точкам, параллельны, то они «просто» параллельны, вне зависимости от каких бы то ни было кривых, соединяющих выбранные точки. Но тут уж ничего не поделаешь, в искривленных геометриях нельзя избежать зависимости от кривой, вдоль которой происходит параллельный перенос. (А если этой зависимости совсем нет, то это-то и означает, что геометрия оказалась плоской; подробности впереди.) И в нашем случае математическое определение параллельного переноса должно быть согласовано с тем, что лежит в основе всего построения искривленного пространства-времени: со свободным падением. Поэтому мы все-таки обращаемся к локальным наблюдателям с заданием превратить их наблюдения за свободным падением в знание о том, каким образом стрелки/направления следует параллельно переносить вдоль кривых. Мы покупаем у них это знание в виде пакета услуг, а после этого о локальных наблюдателях наконец забываем.

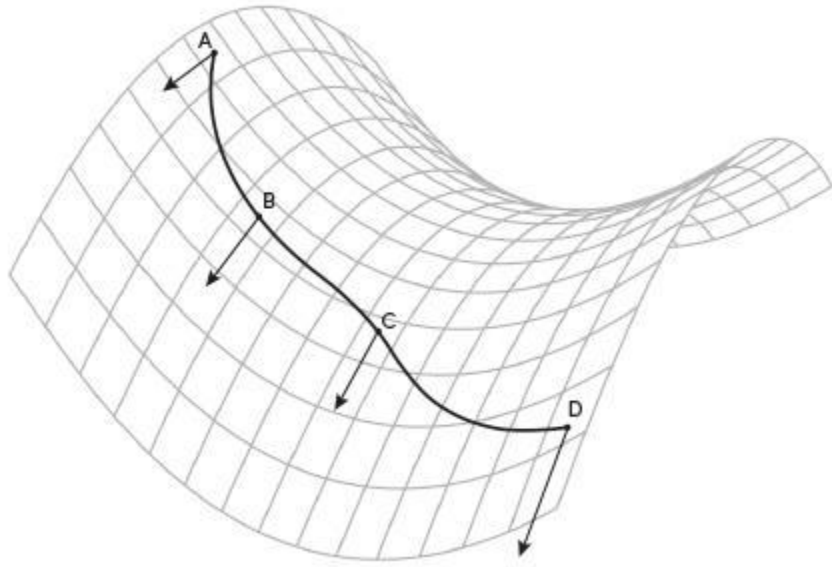



**Рис. 6.10.** Параллельный перенос вектора, заданного в точке А, вдоль кривой. Кривая проведена на двумерной искривленной поверхности. Задача параллельного переноса — в любой точке кривой указать векторы, которые считаются параллельными исходно выбранному вектору

Толпе локальных наблюдателей, оказывается, по силам определить процедуру параллельного переноса вдоль кривой в пространстве-времени, используя конструкцию, которая называется лестницей Шильда [105]. Это система «параллелограммов», точнее, того, что заменяет параллелограммы в мире, где вместо прямых линий — геодезические. Для простоты мы ограничимся такими кривыми в пространстве-времени, которые в принципе могут описывать движение какого-нибудь тела — под действием чего угодно, но все-таки с досветовыми скоростями. На рис. 6.11 слева изображена такая кривая, а из точки $A_0$ на ней торчит стрелка: она определяет направление, которое и нужно перенести вдоль кривой. Идея в том, чтобы построить «параллелограмм», одна сторона которого — заданная стрелка, а другая — направление на некоторую «следующую» точку на кривой; тогда сторона, противоположная заданной стрелке, и окажется ее параллельным переносом в ту другую точку. Строить «параллелограмм» предлагается по двум диагоналям, пользуясь тем, что (как и в настоящем параллелограмме) точка их пересечения делит каждую из них пополам. Ключевое же обстоятельство состоит в том, что линии, используемые во всех построениях, включая и диагонали, — отрезки геодезических! Это означает, что локальные наблюдатели проводят их, отправляя тела в свободное падение [106]. Получающееся отсюда правило параллельного переноса в результате «знает» о том, как происходит свободное падение. Поэтому и искривленное пространство-время, по существу определяемое параллельным переносом, оказывается пригодным для описания гравитации, служащей причиной этого вида движения, — чего мы, собственно говоря, от искривленного пространства-времени и хотели.

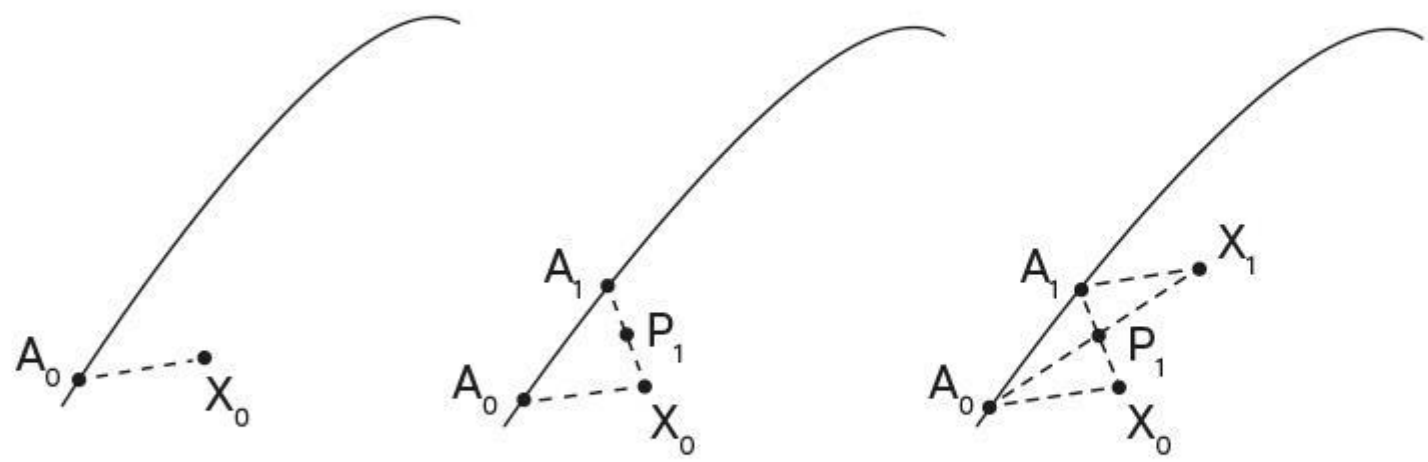



**Рис. 6.11.** Построение лестницы Шильда для параллельного переноса какого-то направления вдоль произвольной кривой. Наблюдатели создают «параллелограммы» из отрезков геодезических

Построение «параллелограммов» из коротких отрезков геодезических называется *лестницей* Шильда, потому что процедура, приводящая к параллелограмму на рис. 6.11 справа, повторяется, и вдоль кривой появляются новые параллелограммы, составленные из отрезков геодезических. Если лестницу Шильда строить в плоском пространстве-времени, то она вся состоит из настоящих *параллело*граммов, поэтому перенос получается *параллельным* в привычном нам смысле. Используя же вместо прямых отрезки геодезических, мы получаем обобщение на случай, когда настоящих прямых нет, а с параллельностью заранее ничего не ясно.

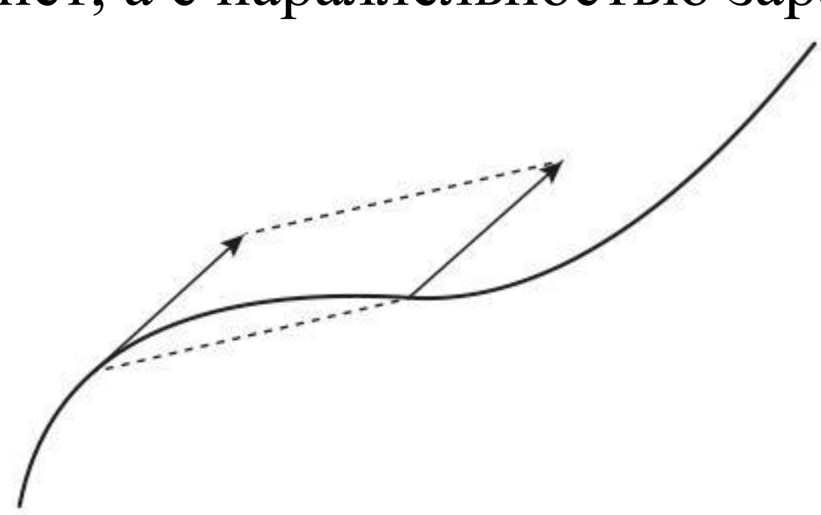


**Рис. 6.12.** Левая стрелка — касательный вектор к кривой. Если его перенести параллельно в какую-то другую точку кривой, то даже в плоском пространстве (где параллельный перенос происходит по правилу

параллелограмма) он перестает быть касательным к кривой

Мы покупаем услугу «безлимитный параллельный перенос любой стрелки вдоль любой кривой» в готовом виде и больше не вникаем в хлопоты локальных наблюдателей по построению лестниц Шильда. Параллельный перенос как система правил, определяющих, как переносится любая стрелка вдоль любой кривой, — это главное математическое средство, позволяющее разбираться с тем, что происходит в искривленных геометриях. Наши траты быстро окупаются — уже одним тем, что у нас появляется способ проводить «длинные» геодезические (далеко за пределы одной карты). Дело в том, что параллельный перенос позволяет выразить все то, чего мы хотим от геодезических — чтобы они были «самыми прямыми из возможных», — в виде уравнений. Изящная идея основана на совсем простом наблюдении. Параллельному переносу вдоль кривой можно подвергнуть вектор, *касательный* к кривой в выбранной точке, как показано на рис. 6.12; при этом, однако, нет никаких причин, по которым перенесенный вектор оказался бы тоже касательным: *произвольная* кривая «поворачивает куда захочет», никак не сообразуясь с правилами параллельного переноса. В плоском пространстве, правда, есть одно исключение: если сама выбранная кривая является *прямой линией*, то касательный вектор остается касательным при параллельном переносе. Звучит это настолько банально, что вроде бы и внимания не заслуживает, ведь касательный вектор к *прямой* направлен вдоль самой этой прямой и уж, конечно, остается касательным, когда его переносят параллельно. Пусть банально; но в таком виде это свойство обобщается на все случаи, где имеется параллельный перенос!

*Геодезические становятся решениями уравнений!*

*Геодезические — «самые прямые» при заданном параллельном переносе*

Геодезические — это в точности такие кривые, что касательный вектор к каждой из них остается касательным, когда его параллельно переносят вдоль кривой. Именно в этом смысле геодезические — «самые прямые из возможных»: они «менее всего поворачивают», но измеряется это «менее всего» с помощью правил параллельного переноса. Это свойство и выражается в виде уравнения: решить его — значит *найти* кривую, касательный вектор к которой остается касательным при параллельном переносе вдоль нее. Записать уравнение для геодезических несложно, если мы заранее озаботились приобретением параллельного переноса — тоже, конечно, на языке формул [107].

И вот награда за все пережитое: фраза «пространство-время говорит материи, как ей двигаться» теперь становится уравнением — фактически уравнением движения для пробных тел («камней», которые мы захотели разбросать в разные стороны). В другой половине цитаты Уилера приведённой ранее в данной главе «говорит» материя: она определяет, какой быть кривизне пространства-времени. Это высказывание тоже скрывает в себе закон природы (называемый уравнениями Эйнштейна), и до него мы доберемся на следующей прогулке; пока же, считая кривизну известной (прежде всего в задаче, заменяющей задачу Кеплера), мы посмотрим, какие движения в пространстве получаются из геодезических в искривленном пространстве-времени. Возможность краем глаза заглянуть в этот новый мир нам предоставил Меркурий, но прецессия его орбиты — только начало. От поворота орбит мы доберемся до остановки времени, но и этим не ограничимся.

*****

**Геодезические на смену Кеплеру и Ньютону.** Геодезические в плоском пространстве-времени — это прямые линии без всяких кавычек и слов «как бы». Наши старые знакомые, равномерные и прямолинейные наблюдатели, даже не знали, что говорят прозой — что их движение описывается геодезическими. Но, признав этот факт, они обнаруживают себя в совершенно равном положении со всеми, чье движение описывается геодезическими и в более сложных ситуациях. Все законы природы для них одинаковы, потому что *локально*, в малом, каждого из них окружает кусок плоского пространства-времени. Законы природы одинаковы не только для равномерных и прямолинейных наблюдателей, но и для всех свободно падающих — и для «Луны-3», когда она падала от Земли к Луне и потом обратно к Земле, и для Стармэна, закинутого на гелиоцентрическую орбиту. Эта одинаковость — часть того, что утверждает общая теория относительности. Измеряя скорость света вблизи себя, каждый наблюдатель всегда найдет ее равной *c*. Закон движения, говорящий, что в пространстве-времени оно, движение, описывается геодезической, «поддерживает» все эффекты, составляющие содержание специальной теории относительности; общая теория относительности обобщает специальную, *включая* ее в себя.

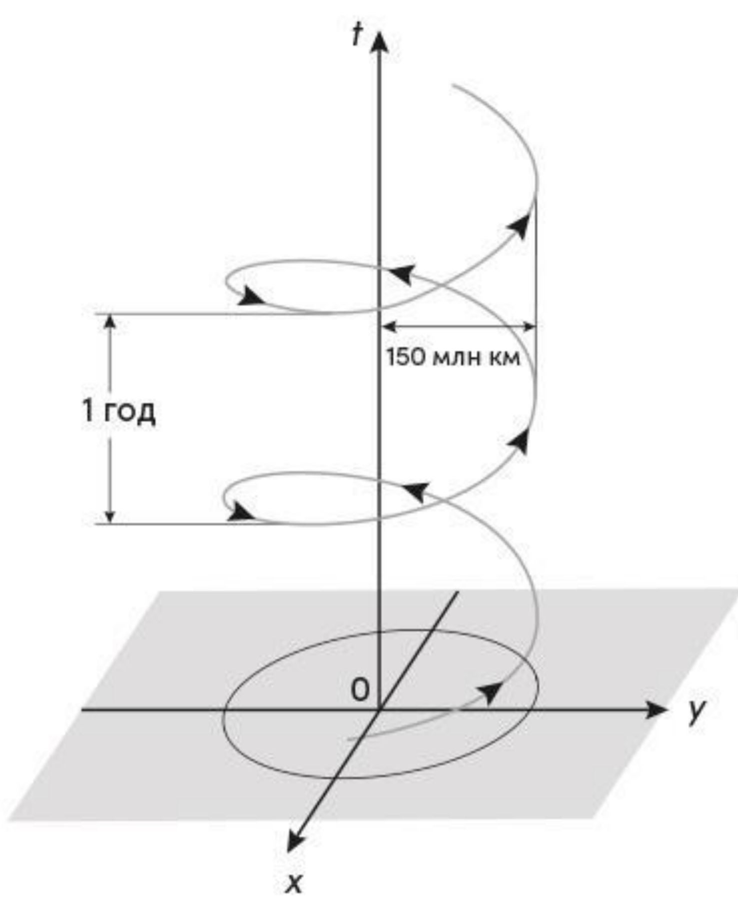



**Рис. 6.13.** Геодезическая, на которой находится Земля, с точки зрения наблюдателя, неподвижного относительно Солнца. На рисунке не выдержан масштаб: радиус спирали в проекции — около 150 млн километров, но ее шаг — 9,5 трлн километров времени

Пример того, что дает «лучшая замена прямых» в виде геодезических, — это само по себе хорошо знакомое нам движение планеты вблизи звезды (источник кривизны в данном случае — звезда; это предмет второй части фразы Уилера, и он ждет следующей прогулки). Общее представление о ситуации дает рис. 6.13; как всегда на таких рисунках, вертикальное направление занято временем, а одним из пространственных направлений приходится пожертвовать (что в данном случае совершенно безболезненно, потому что орбита лежит в одной плоскости). Трудно не заметить, что описание движения вблизи притягивающего центра с помощью математически определенной «самой прямой» в королевстве кривых линий — это довольно значительное развитие представлений, восходящих к Кеплеру. Для начала его эллипсы — это линии в пространстве, а не в пространстве-времени, как геодезические. Чтобы увидеть, какая пространственная орбита получается из той или иной геодезической, надо взглянуть на геодезическую «сверху», вдоль оси времени. Другими словами, траектория в пространстве — это «тень» геодезической, отбрасываемая вдоль оси времени на *пространство*. Но эта тень вообще-то оказывается *не* эллипсом; эллипс — лишь хорошее приближение в условиях малой кривизны и медленного движения. Нас же сейчас интересует, как все устроено на самом деле в мире, где кривизна значительна, а гравитация, соответственно, сильна.

Там все иначе. Геодезические довольно остро реагируют на то, как ведет себя кривизна по мере приближения к притягивающему центру. На правах новичков мы начнем с упражнения, где нет никакой зависимости от направления в пространстве, если смотреть из центра: там сидит звезда или нечто похожее, а притяжение ее устроено совершенно одинаково по всем направлениям от нее. Этакое идеальное (идеально круглое) Солнце, к тому же еще и не вращающееся (в астрофизических применениях, как обычно, приходится смотреть сквозь пальцы на *медленное* вращение). И конечно, теперь мы готовы поместить в центр что-то, создающее кривизну посильнее Солнца. Все эффекты мы собираемся наблюдать через *движение*. Для этого нам потребуется запас «пробных тел», чтобы разбрасывать их и смотреть, как они полетят. Мы выбираем эти тела маленькими по размеру, чтобы отложить обсуждение животрепещущего вопроса о том, что случается, когда разные части одного тела оказываются на разных геодезических, расходящихся одна от другой или, наоборот, сходящихся все ближе. Кроме того, хорошо, когда пробные тела имеют малую массу. Их движение не зависит от массы, как я не перестаю повторять с самого начала этой прогулки, но мы хотим, чтобы тела оставались *пробными*, т.е. сами не оказывали обратного воздействия на центр (это не новое требование; на прогулке 4 мы видели, например, что оно сильно упрощает задачу трех тел). Лучше всего запастить набором стандартных гаек, скажем, массой 1 кг (или 1 г) — тогда, записывая в таблицу обстоятельства каждого запуска, мы автоматически будем относить все величины к единице массы (что и подразумевается в дальнейшем).

Таких величин, которые, собственно, и определяют судьбу разбрасываемых гаек, две: энергия и «количество вращения», которыми мы их снабжаем при запуске. Энергия во многом определяет общий характер развития событий; слишком много энергии может означать, что пробная гайка не станет спутником центральной массы, а улетит куда-то неопределенно далеко. «Количество вращения» — термин для домашнего употребления [108], выражающий примерно то, что в нем и слышится. Вращающееся колесо имеет большое количество вращения, когда оно крутится быстро и/или масса его сосредоточена ближе к ободу, чем к центру. Количество вращения запущенной гайки относительно центра равно нулю, если мы целимся точно в центр, и, наоборот, велико, когда на значительном расстоянии от центра гайка летит так, что, глядя на нее из центра, надо быстро поворачивать голову. Согласно Ньютону, планету/гайку можно запустить на орбиту вокруг притягивающего центра, сообщив ей любое количество вращения, кроме нулевого (последнее означало бы прямое попадание в центр; с учетом геометрических размеров Солнца очень малое количество вращения тоже означало бы попадание, но мы временно это игнорируем). Ньютоновы орбиты могут подходить сколь угодно близко к центру, но тело при этом на центр никогда не падает. Мы отметили это как хорошую новость в главе «прогулка 1», но наши знания были тогда ограничены тепличными вариантами орбитального движения. Искривленное пространство-время говорит гайкам и планетам (и всему остальному, включая даже свет) не совсем то, что Ньютон, а часто — совсем не то. Просто к содержимому нашей Солнечной системы оно обращается, можно сказать, шепотом, буквально едва слышным (всего 43 угловые секунды *в столетие*!). Но когда оно говорит в полный голос, картина меняется радикально: в истории про движение небесных тел появляется спираль — вид движения вблизи притягивающего центра, отсутствовавший у Ньютона. Это означает перспективу упасть на центр; орбитальное движение оказывается рискованным предприятием.

*При сильной гравитации возможны спиральные орбиты*

Как, кстати говоря, проще всего было бы сообщить Ньютону, какое движение получается из решения уравнений для геодезических, на его, Ньютона, языке — не посвящая его в общую теорию относительности, но (что в таком случае неизбежно) попросив принять на веру *один* результат? *В данном простом случае* математика геодезических приводит к результату, который можно сформулировать в терминах силы притяжения: в дополнение к Ньютонову обратному квадрату в ней появляется еще одно слагаемое, зависящее от расстояния как обратная четвертая степень, $1/R^4$, но одновременно с этим *зависящее от количества вращения,* приходящегося на единицу массы запущенной гайки (пропорциональное квадрату количества вращения) [109]. У меня нет больших сомнений, что вскоре после того, как Ньютон справился бы с удивлением, он смог бы получить отсюда все разнообразие «неньютоновых» орбит, к которым мы сейчас и переходим.

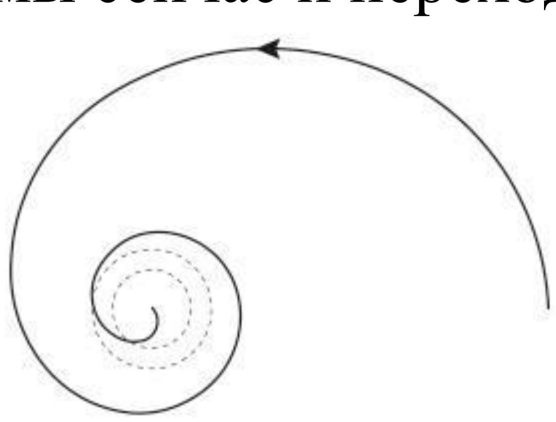


**Рис. 6.14.** При малом количестве вращения пробное тело неизбежно падает на центр. Таких траекторий движения вблизи притягивающего центра нет в соответствии с законами Ньютона, а на самом деле они есть

Для начала оказывается невозможным запустить гайку на орбиту, если ее количество вращения меньше некоторого порогового; гайка (или планета) неминуемо упадет на центр, как показано на рис. 6.14. (Для Солнца это пороговое значение невелико — в полторы тысячи раз меньше, чем для такой же гайки примерно на орбите Меркурия.) Если же мы желаем вывести гайку на орбиту с *минимальным* количеством вращения, которое все-таки позволит ей не упасть, то вариант только один: круговая орбита вполне конкретного радиуса (при заданной массе центрального тела). Это специальная — *самая внутренняя устойчивая круговая* — орбита. Слово «круговая» понятно; «устойчивая» означает, что мелкие нарушения не приводят ни к падению на центр, ни к уходу прочь; а «самая внутренняя» означает, что все остальные устойчивые *круговые* орбиты лежат дальше от центра. По-английски она стандартно называется ISCO (*innermost stable circular orbit*), что я на свой страх и риск переведу как БУКО — ближайшая устойчивая круговая орбита.

БУКО лежит близко к центру, в области сильной гравитации, и из-за этого движение по ней происходит *быстро* — со скоростью, равной половине скорости света с точки зрения наблюдателя, сумевшего каким-нибудь (довольно непостижимым) образом зафиксировать себя в одной точке этой орбиты. Ее радиус, $r_{\text{БУКО}}$, зависит только от массы центрального тела и для тела массы Солнца равен 8862 м. Пожалуй, имеет смысл заменить Солнце на что-то помассивнее, чтобы БУКО пролегала, скажем, на расстоянии ближайшего приближения (настоящего) Меркурия к (настоящему) Солнцу: около 46 млн километров. Насколько массивнее? Всего в 5 млн раз. Земля (или то, что от нее осталось) летала бы вокруг такого «усиленного» Солнца примерно по своей *настоящей* орбите — скажем, по круговой орбите радиусом в одну астрономическую единицу — заметно быстрее, чем летает сейчас: год для ее обитателей занимал бы 3 *часа* 37 минут. Вот что называется «пространство-время говорит в полный голос» — и правда ведь, здорово? [110]

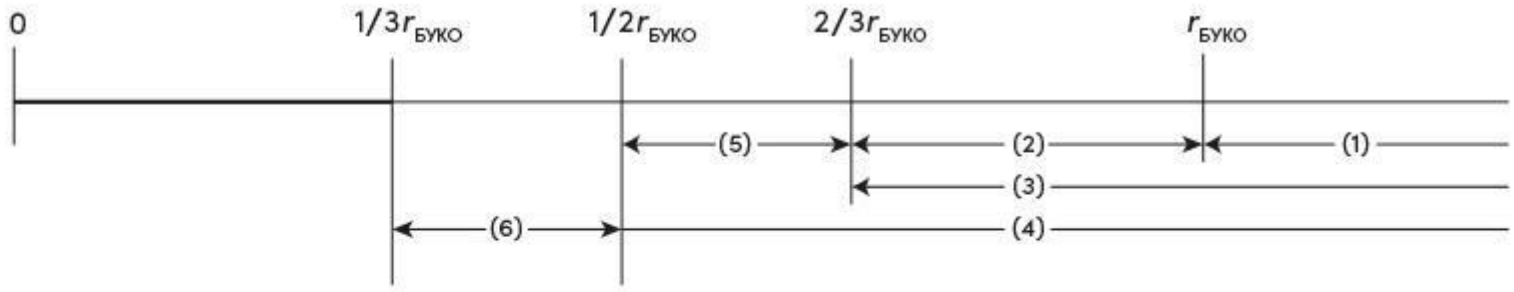



**Рис. 6.15.** Допустимые рубежи приближения орбит к центру (справа налево). Орбита здесь понимается как траектория, устойчивая или нет, точно следуя которой тело не падает на центр и не уходит от центра навсегда. Показаны интервалы вдоль радиуса (расстояния от центра), которые определяют: (1) допустимые радиусы устойчивых круговых орбит; (2) допустимые радиусы неустойчивых круговых орбит, соскальзывание с которых наружу не приводит к уходу от центра; (3) минимальные расстояния, на которые может приближаться к центру любая устойчивая орбита; (4) минимальные расстояния, на которые может приближаться к центру любая геодезическая, не приводящая к падению на центр; (5) допустимые радиусы неустойчивых круговых орбит, соскальзывание с которых наружу приводит к уходу от центра. Любая геодезическая, описывающая движение пробного тела и зашедшая в область (6), ведет к падению тела на центр

Мы, пожалуй, останемся в такой «усиленной Солнечной системе» и продолжим отправлять гайки на орбиты, раз за разом сообщая им все большее количество вращения. Радиус БУКО — величина, отсутствовавшая в Ньютоновой постановке задачи, — определяет расстояние от центра, где неньютоновы эффекты вступают в полную силу. Чем ближе к центру, тем «труднее» существовать орбитам. Кроме самого радиуса БУКО, характерными рубежами являются и доли от него: две трети, половина и одна треть, как мы сейчас увидим. Эти доли $r_{БУКО}$ изображены на рис. 6.15. В области (1), внешней по отношению к БУКО, возможны разнообразные орбиты, и в частности устойчивые круговые. Пребывание на БУКО, как мы только что говорили, требует минимального количества вращения, при котором возможно орбитальное движение. Задавшись же количеством вращения больше БУКОвского, мы можем запустить гайку даже на две круговые орбиты: одна из них, устойчивая, проходит дальше от центра, чем БУКО, но, кроме нее (при том же количестве вращения!), обнаруживается еще и *неустойчивая* круговая орбита, проходящая ближе к центру, чем БУКО [111]. Радиусы всех неустойчивых круговых орбит лежат в области (2) между 2/3 $r_{\text{БУКО}}$ и самим $r_{\text{БУКО}}$. Впрочем, все эти неустойчивые круговые орбиты представляют собой статью расхода гаек, потому что немалая часть из них будет «чуть что» сваливаться с неустойчивой орбиты на центр и пропадать там (а другая часть — соскальзывать наружу, где их в принципе можно отлавливать).

Пока количество вращения запускаемой гайки превосходит БУКОвское значение не сильно (не более чем в $2/\sqrt{3} \approx 1{,}15$ раза), можно отправить ее на довольно экзотическую орбиту, демонстрирующую «тягучее» разматывание и наматывание: для этого надо попросить кого-то сильно заранее поместить гайку на неустойчивую круговую орбиту и *едва* подтолкнуть ее наружу. Тогда бы мы увидели, как гайка очень неспешно «раскручивается» по спирали, пока не окажется очень далеко от центра, а затем начинает обратное «наматывание», делая неопределенно большое число оборотов по мере приближения снова к той самой неустойчивой круговой орбите. Сообщив гайке количество вращения, превосходящее БУКОвское точно в $2/\sqrt{3} \approx 1{,}15$ раза, можно сначала устроить ее на неустойчивой круговой орбите на расстоянии в две трети радиуса БУКО (2/3 $r_{\text{БУКО}}$), а затем едва заметно подтолкнуть наружу; получившаяся разматывающаяся спираль уже уходит неопределенно далеко от центра: гайка улетает навсегда, хотя и делает это с максимальной неохотой. У Ньютона способом максимально «неохотно» распрощаться с притягивающим центром были параболы, но они не делали никаких витков, а кроме того, минимальное расстояние парабол до центра не было ничем ограничено (само собой, раз там не было падения на центр). В сильной гравитации движение одновременно и разнообразнее, и капризнее.

Сообщая гайкам все большее количество вращения, можно запускать их на неустойчивые круговые орбиты, которые лежат еще ближе к центру, чем 2/3 $r_{\text{БУКО}}$, но только не ближе чем 1/2 $r_{\text{БУКО}}$; это область (5) на рис. 6.15. Сваливаясь с каждой такой орбиты наружу, гайка «бодро» улетит прочь от центра. А поместить какое-либо тело на круговую орбиту еще ближе к центру — с радиусом 1/2 $r_{БУКО}$ или меньше — невозможно. Как понять это «невозможно»? Нет соответствующих геодезических; а попытка втиснуть туда гайку методом грубой силы упирается почти в точности в то же, что не позволяет разогнать никакое тело до скорости света: по мере приближения радиуса *круговой* орбиты к 1/2 $r_{БУКО}$ неограниченно растут и энергия, и количество вращения, необходимые для пребывания на ней.

### *Круговые орбиты малого радиуса невозможны*

Своеобразные рубежи в две трети и половину $r_{БУКО}$ — это не только про круговые орбиты. Устойчивое пребывание любого тела без моторчика ближе чем 2/3 $r_{БУКО}$ от центра вообще *преходяще*: в зависимости от количества вращения и энергии оно или улетит далеко прочь (аналог ситуации с Ньютоновой гиперболой; собственно, и здесь траектория становится неотличимой от гиперболы на большом удалении от центра), или упадет на центр (Ньютонова аналога нет). Значит, никакие планеты и другие тела (включая космический мусор) не могут *оставаться* ближе к центру, чем расстояние 2/3 $r_{БУКО}$. Их ареал обитания — это область устойчивых орбит, область (3) на рис. 6.15. Еще более драматическим оказывается рубеж в 1/2 $r_{БУКО}$, ограничивающий область (6): попадание в эту область по *любой* геодезической неминуемо вызовет падение на центр. Другими словами, все геодезические, не приводящие к падению, ограничены областью (4). Мы можем убедиться в фатальном характере рубежа в половину радиуса БУКО, взявшись простреливать гайками всю проблемную область внутри двух третей радиуса БУКО. Мы потеряем все те снаряды, которые влетели «под» половину радиуса БУКО; те же, которые туда не попали, в конце концов вылетят прочь, совершив, возможно, какое-то количество витков вокруг центра, а затем навсегда уйдут от него по траекториям, которые вдали от центра становятся все ближе к гиперболам. И не стоит выполнять маневр гравитационной пращи в слишком близкой окрестности притягивающего центра —

даже тем, кто не боится проблем, вызванных приливными силами. Правда, космический корабль с *включенными* (желательно фотонными или какими-то другими сверхпродвинутыми) двигателями еще имеет шансы спастись из-под половины радиуса БУКО, но и ему нельзя подходить на одну треть радиуса БУКО, если только стоит задача вернуться домой. Вернуться с расстояния 1/3 $r_{\text{БУКО}}$ и ближе никакой возможности нет; мы же, наоборот, еще вернемся к этой таинственной области чуть позже на этой прогулке.

Временно оставим посягательства на область вблизи центра; какие вообще бывают орбиты, если это не окружности? Урок, который мы извлекли из истории с Меркурием, говорит, что эллипсы могут не получиться. Вообще-то при движении по всякой некруговой орбите расстояние до центра изменяется в пределах от некоторого минимального до некоторого максимального. При этом форма орбиты критически зависит от того, на какой угол поворачивается планета, на взгляд из центра, за то время, пока расстояние проходит полный цикл (уменьшается от максимального до минимального и затем снова возрастает до максимального). Если этот угол мало отличается от полного оборота, то мы и правда можем воспринимать траекторию как поворачивающийся эллипс, как на рис. 6.16 слева. Но если полный цикл изменения расстояния от центра сильно рассинхронизирован с полным оборотом, то получается что-то, определенно эллипсом не являющееся, как, например, на рис. 6.16 справа.

*Вместо вытянутых эллипсов — фигуры «лепесток-намотка»*

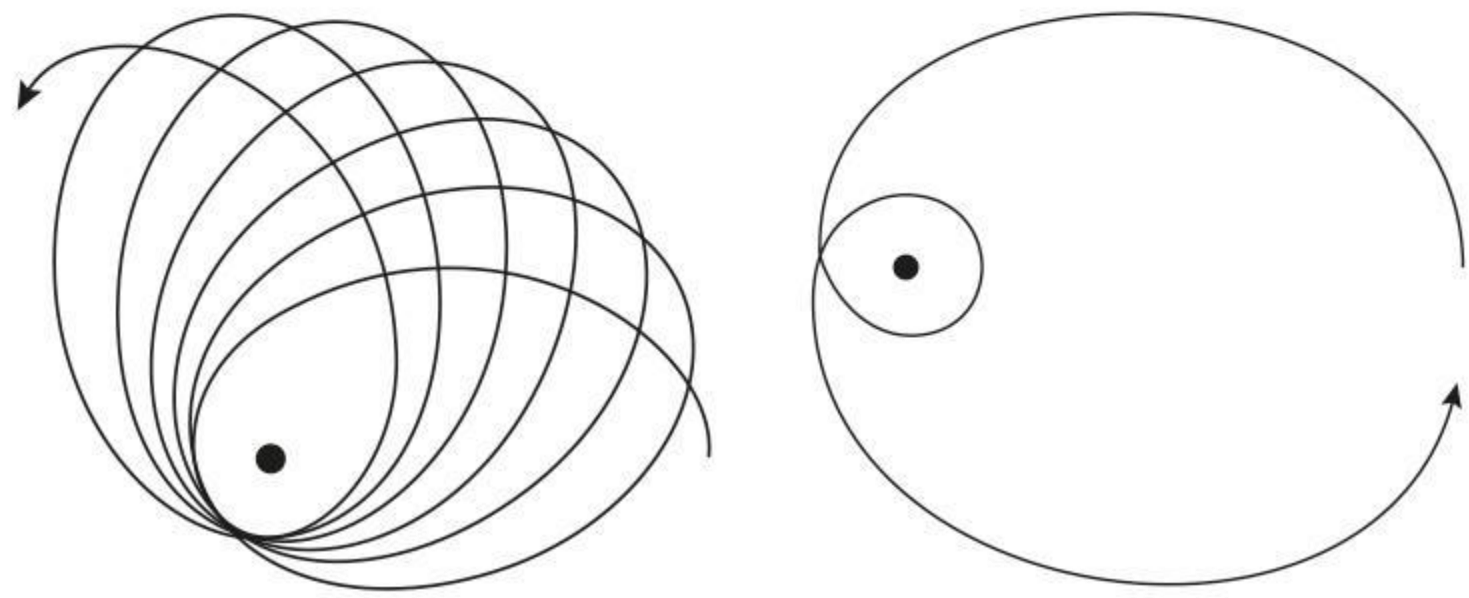


**Рис. 6.16.** Расстояние планеты до центра меняется периодически, но поворот на 360° планета завершает раньше, чем расстояние возвращается к прежним значениям. *Слева:* орбиту можно охарактеризовать как поворачивающийся эллипс. *Справа:* орбиту трудно назвать эллипсом (хотя отличие от орбиты слева — в скорости прецессии, т.е. количественное)

Типичные вытянутые орбиты — разнообразные фигуры «лепесток-намотка». Наши гайки проводят некоторое время вдали от центра («лепесток»), затем устремляются ближе и, пока расстояние еще не увеличилось, могут несколько раз обойти вокруг центра («намотка»). В зависимости от тех же двух параметров орбиты, энергии и количества вращения, число намоток может быть любым. Любым может быть и число лепестков, и очередность их прохождения, как показано на рис. 6.17. И даже более того: за то время, пока расстояние прошло несколько полных циклов изменения между максимальным и минимальным, угол поворота вовсе не обязательно набирается равным *целому* числу раз по 180°, и орбита «лепесток-намотка» тогда просто-напросто не замыкается. С математической точки зрения незамкнутые орбиты встречаются неизмеримо чаще замкнутых; но любое наблюдение за реальной орбитой определяет ее параметры с некоторой точностью, и в пределах этой точности всегда найдется какое-то — возможно, очень большое — число оборотов, через которое орбита замкнется. В этом смысле математически различные случаи «замыкания после очень большого числа оборотов» и «незамыкания» выглядят одинаково. На рис. 6.18 видно, как начинают развиваться такие орбиты. Едва ли в этих узорах можно усмотреть многое от Кеплера. И вся эта не-кеплерово-ньютоновость — не результат тех или иных случайностей (например, сделавших центральное тело несферическим), а элемент фундаментального устройства, причем в самом «симметричном» случае, когда центр притягивает одинаково по всем направлениям (кривизна не зависит от направления). Само собой, все орбиты с необходимостью находятся в пределах области (3) на рис. 6.15. Пожалуй, теперь лучше понятно, какой же удачей оказались наши «домашние» эллипсы: математически, как решения уравнений движения в рамках закона тяготения Ньютона, они замкнуты, а отклонения, наблюдаемые в нашей медленной Солнечной системе, представляют собой, что называется, академический (хотя и немалый) интерес. При медленном движении в слабой гравитации орбиты замкнуты с большинства практических точек зрения, что открывает шансы для относительной устойчивости планетных систем, включая, конечно, Солнечную, и для возможности возникновения там жизни.

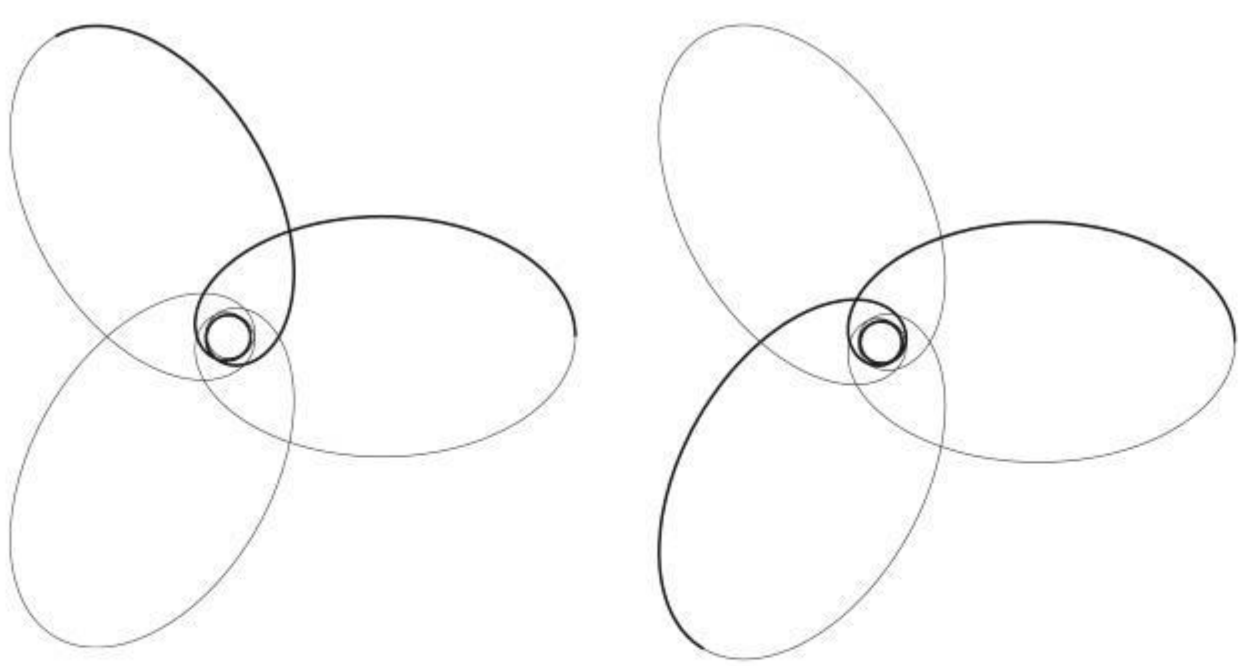


**Рис. 6.17.** Орбиты с тремя лепестками, одной дополнительной намоткой в центре и разной последовательностью прохождения лепестков, как это показано утолщенной линией для части орбиты. Справа тело каждый раз пропускает один лепесток. Максимальное удаление от центра составляет около 25 $r_{\text{БУКО}}$, а минимальное расстояние лишь несильно превосходит 2/3 $r_{\text{БУКО}}$

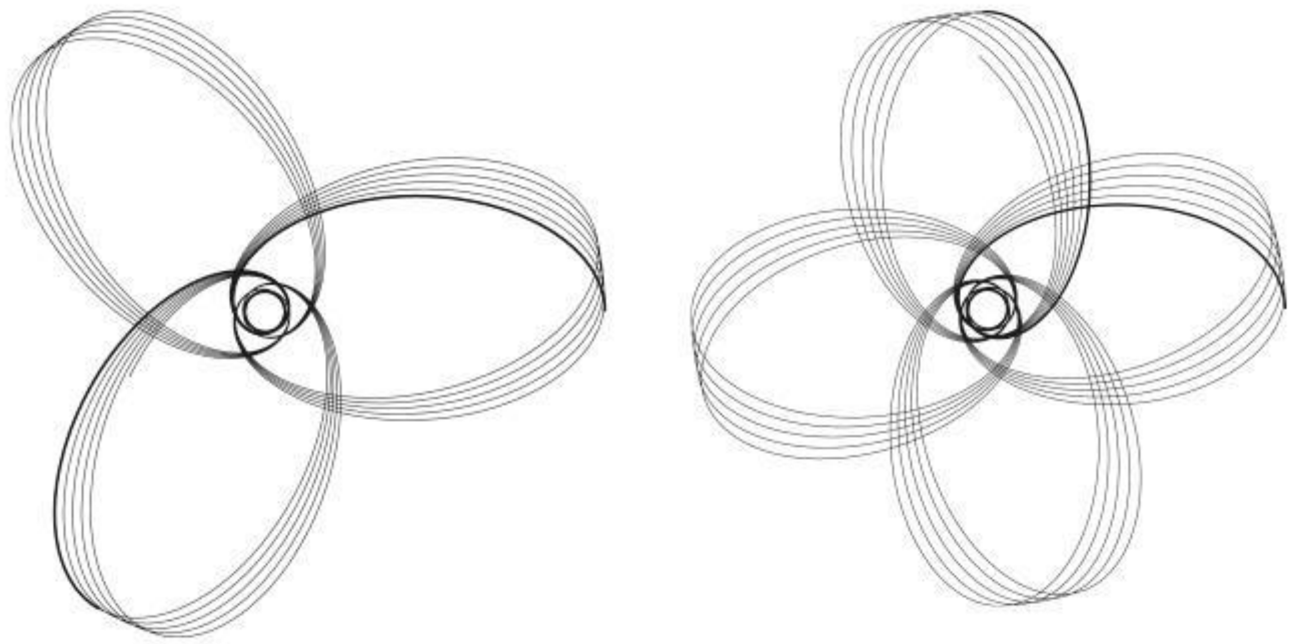


**Рис. 6.18.** Незамкнутые траектории на практике трудно отличимы от тех, которые замы-каются после очень большого числа оборотов. Показано несколько первых оборотов таких траекторий. Начало обхода орбиты показано утолщенной линией. *Слева:* орбита с тремя лепестками, одной дополнительной намоткой и правилом «пропустить один лепесток». *Справа:* орбита с четырьмя лепестками и одной дополнительной намоткой

*****

**Равенство без исключений.** Мы позабыли о наблюдателях, не падающих свободно в кораблях с выключенными двигателями (или верхом на гайках), а включающих двигатель в своей ракете, или замедляемых атмосферой, или испытывающих давление света, или просто сидящих у себя дома. Одинаковы ли законы природы в картах (малых областях) всех таких наблюдателей? Да, одинаковы. *Никакого* клуба избранных наблюдателей на самом деле нет, все они равны перед законами природы, и единственное требование, которое остается, — чтобы они (наблюдатели) были локальными, т.е. изучали мир в пределах малого куска пространства-времени. Конечно, включение или невключение двигателя — это две разные ситуации, которые не спутаешь; однако в каждой из них наблюдатель, изолировавшийся от внешнего мира, может упрямо считать себя неподвижным — ценой того, что ему, возможно, придется зафиксировать наличие гравитации. Это видно вот как. Свободное падение с тем или иным ускорением на взгляд со стороны ($1g$ вблизи поверхности Земли; как всегда, требуется убрать воздух) «выключает» гравитацию для участников падения: они ощущают невесомость. Но если ракета, в которой они падали, включает двигатели так, чтобы прервать падение и *остановиться* на фиксированной высоте над поверхностью (похожая задача решается на рис. 6.19), то вместо невесомости они немедленно ощутят силу тяжести — ту самую, земную, сообщающую всем телам ускорение $1g$. А если теперь в такой же ракете где-нибудь вдали от Земли, Солнца и чего угодно включить двигатель с такой же тягой, то ракета полетит с ускорением $1g$ (относительно равномерных и прямолинейных наблюдателей, о которых, впрочем, мы вот-вот забудем), а на борту будет *ощущаться та же самая сила тяжести*, сообщающая всем телам ускорение $1g$, — гравитация как будто на Земле. Так вот, главное: никакого «как будто». Это *и есть гравитация* — точно такая же, как на Земле рядом с поверхностью, локально *неотличимая* от земной. Другими словами, если наблюдатель, на чей-то сторонний взгляд, решил ускориться (затормозить, повернуть или все сразу), то испытываемая им перегрузка неотличима от действия гравитации: отказываясь выглядывать в окно, он может с равным успехом считать, что покоится, но находится в области действия гравитации. Никакие эксперименты, охватывающие малый кусок пространства-времени, не позволяют отличить ускорение от гравитации. В дополнение к двум пунктам в главе «прогулка 5» мы теперь имеем ключевое утверждение, известное как *общий принцип относительности*:

Все законы природы одинаковы для всех локальных наблюдателей, движущихся произвольным образом относительно друг друга. Локальный наблюдатель не может определить, вызвано ли относительное ускорение какого-либо тела гравитацией или ускорением самого наблюдателя.

*Локальные эксперименты не позволяют отличить ускорение от гравитации*

**Рис. 6.19.** Падающая ракета включает двигатель, чтобы остановиться перед касанием поверхности

Эквивалентность гравитации и ускорения имеет множество следствий; одно из них состоит в том, что гравитация замедляет ход времени. Чем в более сильной гравитации находится наблюдатель, тем медленнее течет его время по сравнению с наблюдателем где-то далеко в пустом пространстве. Ускорение ракеты, как мы видели в главе «прогулка 5» (где ракета меняла направление движения на противоположное), имеет эффект замедления времени; общий принцип относительности тогда говорит нам, что это же верно и для гравитации.

*Гравитация замедляет время*

Поскольку притяжение Земли несколько слабеет с высотой, те, кто работает на верхнем этаже небоскреба, стареют чуть быстрее, чем их коллеги на первом этаже. *Сейчас* это замедление времени можно измерить для разницы высот уже в несколько десятков сантиметров той же техникой, которая позволила проверить замедление времени на велосипедно-автомобильных скоростях. В эпоху, когда лучшие средства измерения времени были менее точными, требовалась несколько большая разница высот. Осенью 1971 г. прецизионные для того времени цезиевые часы отправились в путешествие на самолетах, после чего их показания сравнили с показаниями часов, остававшихся на базе. Показания разошлись; ситуация эта прекрасна тем, что причин расхождения *две* и они действуют в разных направлениях в зависимости от направления движения самолета, поэтому часы проделали два кругосветных путешествия в противоположных направлениях. Часы в самолете находятся на некоторой высоте над поверхностью и должны от этого идти быстрее тех, что на базе; часы в самолете движутся относительно базы с контрольными часами, но из-за вращения Земли вокруг своей оси и сама база движется относительно наблюдателя, условно помещенного в центр Земли. С точки зрения этого наблюдателя наибольшей скоростью обладают часы, летящие на восток; с «промежуточной» скоростью движется сама база; меньшая из трех скоростей — у самолета, летящего на запад. Формулы для вычислений простые, сложность же была в том, чтобы как можно точнее оценить условия эксперимента: измерить те, которые меняются (скорость и высота), а остальные поддерживать неизменными. Использовались обычные рейсовые самолеты; для часов и батарей были куплены два отдельных билета на имя Mr. Clock. В восточном направлении цезиевые часы за 65 часов и 25 минут полета проделали путешествие из Вашингтона в Вашингтон через Лондон, Франкфурт, Стамбул, Бейрут, Тегеран, Нью-Дели, Бангкок, Гонконг, Токио, Гонолулу, Лос-Анджелес и Даллас. Ожидаемые расхождения, накапливающиеся за это время, лежат в пределах 200 наносекунд, но сокращение двух эффектов оставило от этих двух сотен лишь десятки: время, прошедшее в самолете, должно было превышать время на базе на $(144 \pm 14)_{\text{из-за высоты}}$ + $(-184 \pm 18)_{\text{из-за скорости}} = (-40 \pm 23)$ нс (минус означает, что на самом деле не превышать, а быть меньше). Измерения же показали $(-59 \pm 10)$ нс. Интервалы перекрываются! В западном направлении полет через Лос-Анджелес, Гонолулу, Гуам, Окинаву, Тайбэй, Гонконг, Бангкок, Бомбей, Тель-Авив, Афины, Рим, Париж, Шаннон и Бостон занял около 80 часов 20 минут чистого времени, и здесь ожидаемые эффекты складывались: $(179 \pm 18)_{\text{из-за высоты}} + (96 \pm 10)_{\text{из-за скорости}} = (275 \pm$

21) нс. Актуальная же разница показаний часов составила (273 ± 7) нс. Этот эксперимент Хафеле и Китинга затем повторяли в нескольких вариантах, в том числе постоянно отслеживая положение и скорость самолета с помощью радара. На 25-ю годовщину оригинального опыта его частично повторили на участке Лондон — Вашингтон и обратно, а в 2010 г. благодаря дальнемагистральным рейсам удалось облететь вокруг Земли всего с тремя промежуточными пунктами: на маршруте Лондон — Лос-Анджелес — Окленд — Гонконг — Лондон ожидаемую разницу вычислили как 246 ± 3 нс, а реально зафиксировано было 230 ± 20 нс.

*****

**Падения света.** «Материя» в высказывании Уилера включает и свет. Ему (свету) пространство-время тоже говорит, как двигаться: по геодезическим. «Надменность» света, впрочем, никуда не делась, и подходящие для него геодезические несколько отличаются от остальных — они не могут описывать движение никакого *тела*, но это тоже геодезические в строгом математическом смысле. Они ожидаемо называются «световые геодезические». Особая роль света проявляет себя и в том, что свет движется *только* по геодезическим. Обычное тело можно толкать палкой, увозить в трюме ракеты или приделать к нему моторчик — и тогда оно уже не будет свободно падать, т.е. двигаться под действием одной только гравитации, и в пространстве-времени его движение не будет описываться геодезической. Но со светом ничего такого проделать нельзя; его можно только притянуть гравитационно, а это и значит, что его траектории в пространстве описываются геодезическими в пространстве-времени. И пространственные траектории вовсе не обязательно оказываются прямыми!

*Распространение света — это всегда свободное падение*

Световые геодезические таковы, что, в частности, свет далеких звезд, проходя вблизи Солнца, отклоняется от прямой линии. Эти отклонения можно измерить; правда, к таким измерениям надо специально готовиться, потому что требуется загородить Солнце, чтобы оно не слепило. Для этой цели прекрасно подходит Луна — правда, только в короткие минуты солнечных затмений и в тех регионах, где затмение полное. После первого такого измерения в 1919 г. Эйнштейн буквально проснулся знаменитым: почему-то именно отклонение света, а не вращение орбиты Меркурия вызвало публичный резонанс. Возможно, дело в исторически сложившейся «драматургии»: аномалия в движении Меркурия была сначала измерена, а потом получила объяснение, тогда как отклонение света сначала было предсказано, а потом измерено. Современные высокоточные наблюдения позволяют зафиксировать и отклонения лучей света, проходящих на таком угловом расстоянии от Солнца, что «выключения» светила не требуется; космический телескоп Hipparcos Европейского космического агентства, а затем его преемница Gaia, работающая в точке Лагранжа $L_2$ системы Солнце — Земля, проделали десятки тысяч таких измерений. Отклоняют свет, только намного сильнее, и объекты в сотни миллиардов и более раз массивнее Солнца — галактики и скопления галактик; этот эффект называется гравитационным линзированием. Здесь для успеха наблюдения нужно найти яркий источник света *за* какой-нибудь галактикой. Не очень далекая галактика ZW 2237+030 (400 млн световых лет) учетверяет изображение такого яркого источника (квазара), находящегося на расстоянии около 8 млрд световых лет, а изображение галактики SDP.81 (11,7 млрд световых лет от нас) имеет вид кольца из-за линзирования другой, более близкой галактикой (рис. 6.20) [112].

Чтобы увидеть, как проявляют себя законы, по которым отклоняется — да, свободно падает — свет, вместо разбрасывания гаек надо светить фонариком в сторону притягивающего центра. Из-за того, что вместе со светом нельзя отправить никакие предметы, включая часы, нет «внутреннего» способа измерять протяженность вдоль световой геодезической; как следствие — в световых геодезических меньше *разнообразия*, чем в «обычных». Это станет заметно, как только мы заменим космический разбрасыватель гаек на тот или иной вариант космического лазера: разнообразие возможных орбит сократится, и вместо двух параметров (энергии и количества вращения относительно центра) результаты наших экспериментов по запуску света в сторону притягивающего центра будут зависеть только от одного. В этом качестве особенно удобно использовать «прицельное расстояние» — минимальное расстояние, на котором луч прошел *бы* от центра, *если бы* двигался по прямой. Свет *не* распространяется по прямой мимо центра притяжения, но параметр все равно удобный, да и название хорошее. А вот от энергии света ничего не зависит: если вы одновременно пошлете свет из обычной лампы и из рентгеновского лазера, то эти два «света» нигде не разделятся, не разойдутся в стороны и не отстанут друг от друга.

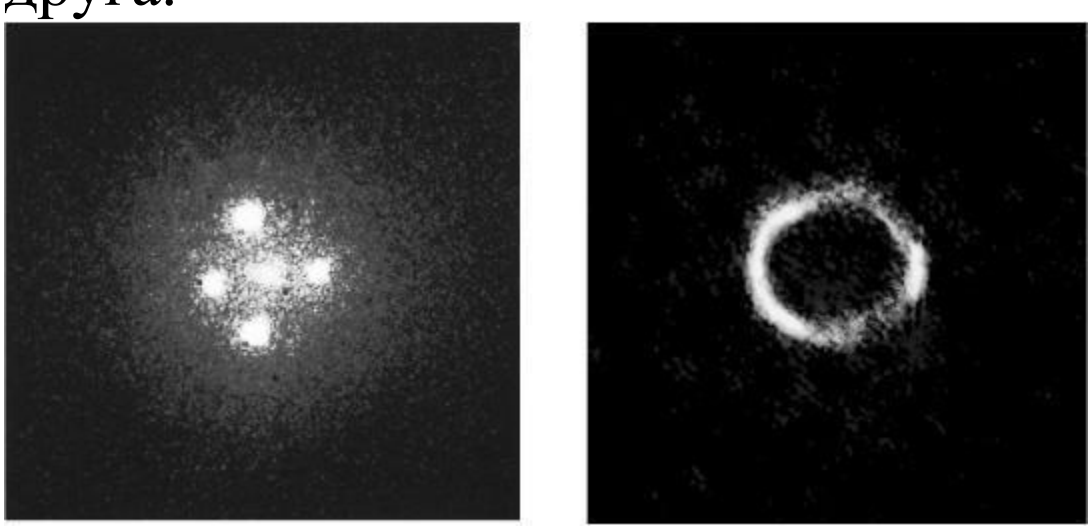


**Рис. 6.20.** Гравитационное линзирование. *Слева:* эйнштейновский крест — более тусклая галактика в центре создает четыре изображения яркого объекта, находящегося далеко за ней. *Справа:* эйнштейновское кольцо — искаженное изображение далекой галактики. (Близкой галактики-линзы не видно на этом изображении, полученном в субмилли-метровом диапазоне)

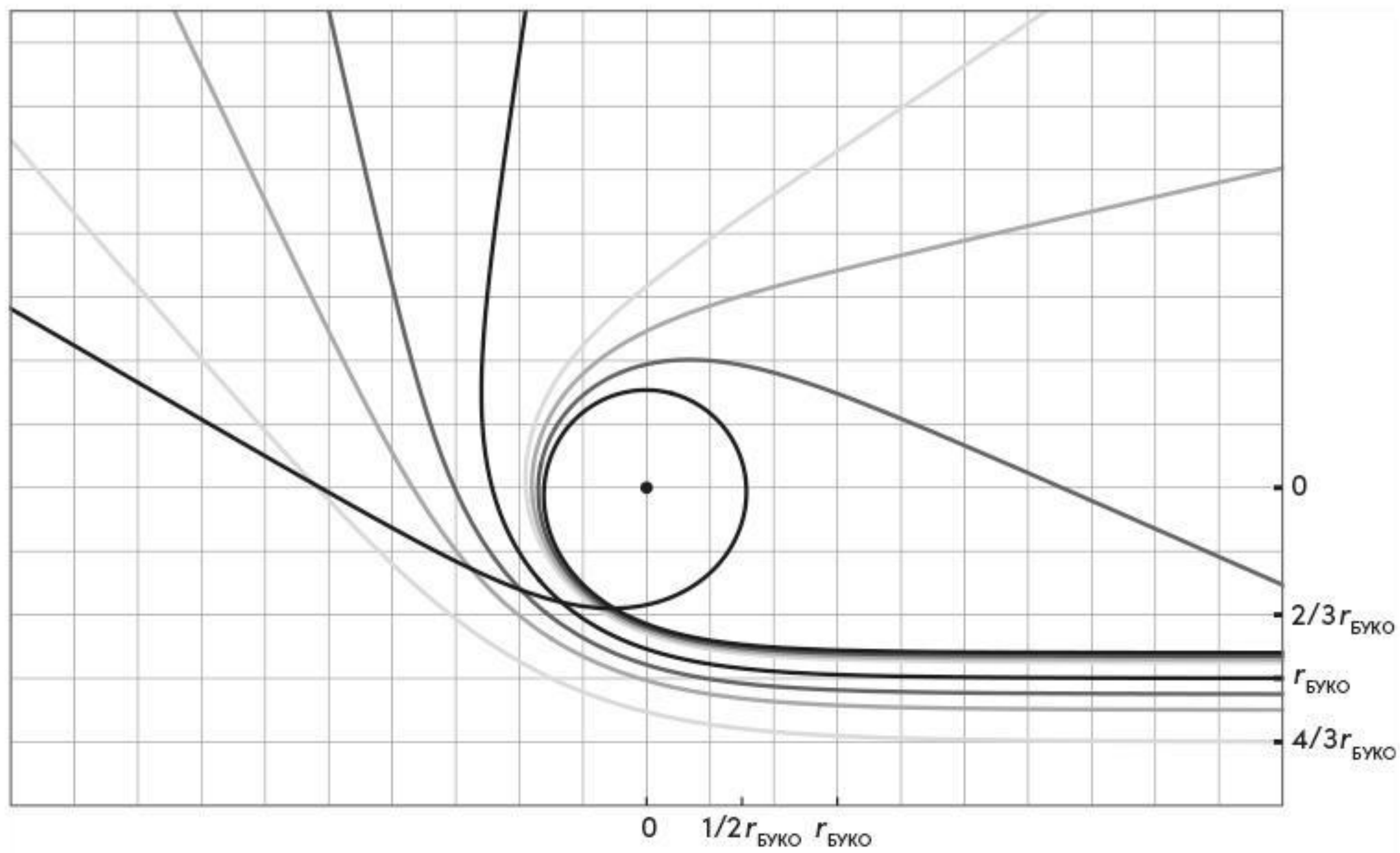



**Рис. 6.21.** Траектории света вблизи притягивающего центра. Лучи света испущены издалека справа с прицельными расстояниями (снизу вверх) $8 \cdot 1/6\, r_{\text{БУКО}}$, $7 \cdot 1/6\, r_{\text{БУКО}}$, $6{,}5 \cdot 1/6\, r_{\text{БУКО}}$, $6 \cdot 1/6\, r_{\text{БУКО}} = r_{\text{БУКО}}$, $5{,}5 \cdot 1/6\, r_{\text{БУКО}}$, $5{,}4 \cdot 1/6\, r_{\text{БУКО}}$, $5{,}3 \cdot 1/6\, r_{\text{БУКО}}$ и («завивающийся» луч) $5{,}2 \cdot 1/6\, r_{\text{БУКО}}$. Начиная с прицельного расстояния $5{,}19615 \cdot 1/6\, r_{\text{БУКО}}$ лучи перестают возвращаться наружу, а точно с этого прицельного расстояния свет попадает на круговую орбиту радиуса $1/2\, r_{\text{БУКО}}$. Различные оттенки серого использованы для того, чтобы различать лучи

На рис. 6.21 лучи света направляются к центру с различными прицельными расстояниями и в зависимости от этого отклоняются сильнее или слабее. Там выбраны прицельные расстояния, измеряемые в «шестых долях от $r_{\text{БУКО}}$»: $8 \cdot 1/6\, r_{\text{БУКО}}$, $7 \cdot 1/6\, r_{\text{БУКО}}$ и еще несколько. Про лучи, которые повернули на 180°, уже как-то неловко говорить «отклоняются»; выбрав определенное прицельное расстояние (около $0{,}892826\, r_{\text{БУКО}}$, что в «шестых долях», как на рисунке, составляет примерно $5{,}357 \cdot 1/6\, r_{\text{БУКО}}$), можно увидеть вернувшийся свет нашего же лазера, причем без всяких зеркал — из пустоты. Эта необычная ситуация — если угодно, предельный случай гравитационного линзирования. Совсем небольшое дополнительное уменьшение прицельного расстояния заставит свет делать обороты вокруг центра — возможно, более одного раза (в этой области малые изменения в прицельном расстоянии приводят к сильно различающимся траекториям).

*Притягивающий центр выглядит как черный диск*

Падающий свет *перестает выходить* в какую бы то ни было сторону, если он отправляется к центру с прицельным расстоянием менее $\sqrt{3}/2 r_{\text{БУКО}} \approx 5{,}19615 \cdot 1/6 r_{\text{БУКО}}$. Центр притяжения выглядит со стороны как черный диск, улавливающий свет. Куда свет девается? На расстоянии 1/2 $r_{\text{БУКО}}$ от центра лежит (неустойчивая) *круговая орбита* света. Мы видели чуть выше, что никакие тела на эту круговую орбиту «не впихнуть» из-за запретительного роста энергии (да и количества вращения), но для света законы, как всегда, особые; как раз свету на этой орбите хорошо (впрочем, и здесь есть свои ограничения: она неустойчивая) [113]. Но чтобы издалека отправить свет на такую орбиту, надо выбрать прицельное расстояние точно равным $\sqrt{3}/2 r_{\text{БУКО}}$. А весь свет, приходящий с меньшими прицельными расстояниями, не попадает даже на орбиту радиуса 1/2 $r_{\text{БУКО}}$ и ни на какую другую орбиту, а просто падает на центр.

*Свет может обращаться по круговой орбите*

Способ исследовать происходящее подробнее — соединить гайки и фонарики, т.е. посмотреть, как распространяется свет, испущенный фонариками, которые приделаны к разбросанным повсюду гайкам. Впрочем, для распространения света не важно, свободно или не свободно падал его источник, поэтому вместо многих гаек с лампами можно отправить в полет один космический корабль с мощным двигателем, чтобы потом использовать оборудование повторно. На рис. 6.22 источник света находится относительно далеко от центра для самой правой диаграммы и тем ближе к центру, чем левее диаграмма. Диаграммы показывают, какая часть света, излученного во все стороны, пропадет в центре притяжения. Пока корабль или гайки с фонариками находятся далеко от центра (справа на рис. 6.22 — на расстоянии 15 $r_{\text{БУКО}}$ от центра; ничего специального в числе 15 нет, оно фигурирует просто в качестве сравнительно большого), мы, по существу, повторяем опыт, проделанный с лучами света на рис. 6.21: лишь малая часть света, испущенного во все стороны, пропадает в центре: это узкий темный сектор на диаграмме. Но когда источник достигает БУКО, угол раствора «сектора пропавшего света» вырастает уже до 90°, а на знакомом нам расстоянии 2/3 $r_{БУКО}$ (третья справа диаграмма на рис. 6.22) свет пропадает уже из сектора с углом раствора 133,4°. Свет, испущенный вдоль половины направлений, не выйдет наружу, когда космический корабль доберется (или гайка упадет) до половины радиуса БУКО (1/2 $r_{БУКО}$); именно здесь, конечно, космонавтов слепит свет от разных других источников, «подзадержавшийся» на круговых орбитах. В области ближе половины радиуса БУКО световые сигналы во внешний мир удастся послать, только если луч наведен в пределах все более узкого конуса, смотрящего прочь от притягивающего центра, — все более узкого по мере приближения к фатальному расстоянию 1/3 $r_{БУКО}$. Точно на этом расстоянии от центра посылать сигналы поздно: диаграмма, как на рис. 6.22, становится полностью черной. С этого расстояния наружу не ведут даже световые геодезические; геометрия пространства-времени такова, что их нет. Это положение дел часто выражают словами: «Гравитация настолько сильна, что ее не может преодолеть даже свет».

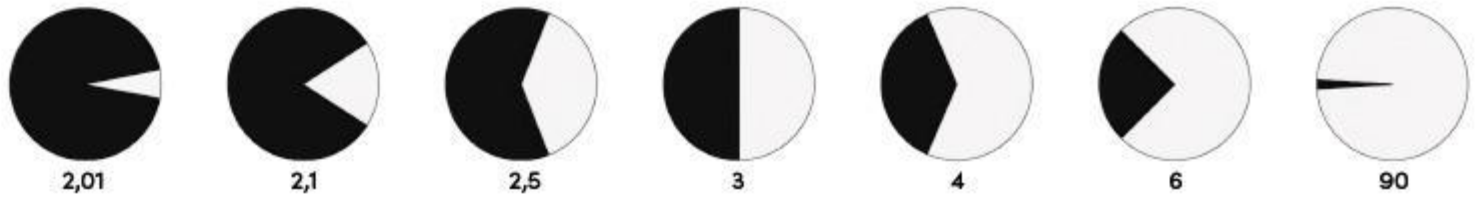



**Рис. 6.22.** В зависимости от расстояния до центра свет, испущенный вдоль некоторых направлений (показаны в виде черных секторов), падает на центр. Расстояния от источника света до центра (*слева направо*): 2,01 · 1/6 $r_{БУКО}$, 2,1 · 1/6 $r_{БУКО}$, 2,5 · 1/6 $r_{БУКО}$, 3 · 1/6 $r_{БУКО}$ = 1/2 $r_{БУКО}$, 4 · 1/6 $r_{БУКО}$ = 2/3 $r_{БУКО}$, 6 · 1/6 $r_{БУКО}$ = $r_{БУКО}$ и 90 · 1/6 $r_{БУКО}$ = 15 $r_{БУКО}$

## *Горизонт «полупроницаем» — пройти через него можно только в одну сторону*

Граница той области пространства-времени, из которой не ведут наружу даже световые геодезические, называется горизонтом событий или просто горизонтом [114]. (Мы встречались с рукотворным горизонтом в главе «прогулка 5», но то была разминка.) Явление, закрытое горизонтом, носит название, которое в 1967 г. популяризировал (или придумал и популяризировал) Уилер, — «черная дыра».

*****

**Отрезанный ломоть пространства-времени.** Мы начали с безобидных орбит вокруг Солнца, потом для большей выразительности увеличили массу Солнца в 5 млн раз и продолжили изучать орбиты. Почему же «оказалось», что это орбиты вокруг черной дыры? Короткий ответ: чтобы насладиться всеми эффектами высокой кривизны, нужно подобраться близко к телу, которое эту кривизну создает, но для обычных звезд мы уткнемся в саму звезду задолго до того, как эти эффекты проявят себя в полной мере.

Чуть подробнее: тело, имеющее массу Солнца и размер Солнца, притягивает вблизи своей поверхности (а там оно притягивает сильнее всего) недостаточно сильно, чтобы имелись *выразительные* отличия от движения в соответствии с законами Ньютона. По-настоящему интересное, как мы видим, происходит на расстояниях, сравнимых с радиусом БУКО. Но радиус БУКО для тела массы Солнца — 8862 м (внимание: *метров*), что меньше радиуса самого Солнца примерно в 78 500 раз. Чтобы впихнуть в такие пределы всю массу Солнца, потребуется сжать Солнце от нынешней средней плотности около (чуть меньше) полутора тонн на метр кубический до плотности в несколько сотен миллионов миллионов ($10^{14}$) тонн на метр кубический. Это много по любым стандартам, и тем не менее объекты примерно с такой плотностью во Вселенной есть: это нейтронные звезды. Вопрос о том, какой в точности радиус они имеют, — сложный, потому что наши знания о веществе с такой плотностью далеко не полны; известно, что их массы не сильно превосходят солнечную — 1,4 массы Солнца или несколько выше. Относительно недавно из наблюдений за нейтронной звездой массой как раз 1,4 солнечных масс удалось, достаточно сложным образом, извлечь оценку ее радиуса — около 11 км. Радиус же БУКО для тела такой массы — 12,4 км, что формально пролегает снаружи тела, но следующий интересный радиус $2/3r_{\text{БУКО}}$ оказывается уже внутри. Однако нейтронные звезды быстро вращаются, а вращение влияет на то, как искривляется пространство-время вокруг них, и история с орбитами оказывается сложнее. Как бы то ни было, вблизи нейтронных звезд и в самом деле реализуется сильная гравитация, а в них самих и вблизи них происходит разнообразнейшее интересное, но для того, чтобы мы полностью насладились разбрасыванием гаек, им слегка не хватает плотности.

### *Сверхсжатие материи создает горизонт событий*

А при дальнейшем уплотнении материи она (материя) переходит порог, за которым наступает еще большее и *неостановимое* уплотнение под действием собственной гравитации. Материя в известной степени исчезает, а вместо нее остаются кривизна и горизонт. От Вселенной *безвозвратно* «полуотрезается» кусок, укутанный горизонтом. «Полу-» — потому что прерываются причинные связи в одном направлении, оттуда сюда, что и выражается словами «черная дыра» [115]. От «провалившейся» внутрь материи не могут приходить никакие сигналы, и по сю сторону горизонта от нее остается не так много информации: только о массе и количестве вращения (и, если он вдруг случится, об электрическом заряде). Эта информация закодирована в том, как именно искривлено пространство-время снаружи горизонта. Под горизонтом продолжающееся сжатие материи, полностью скрытое от нас, приводит к состояниям, для описания которых у нас нет никаких средств; имеющиеся теоретические знания теряют там свою применимость.

### *Черная дыра не имеет твердой границы*

Определяющий признак черной дыры — наличие горизонта (событий); строго говоря, горизонт ограничивает не только область в пространстве, но область в пространстве-времени, из которой не может прийти никакой сигнал [116]. Горизонт в более простом понимании, как поверхность в пространстве, — «пустая» поверхность, а не граница какого-либо тела, и сквозь нее внутрь можно проникнуть разнообразными способами: по геодезическим (падая свободно) или нет (включая двигатель); и свет, и тела проходят через него в направлении центра, ничего не замечая, однако, пройдя его, уже не могут вернуться. Эту «пустую» поверхность в пространстве довольно естественно называть границей черной дыры, но, в отличие от границы всех обычных *тел,* это не «твердая» граница. И снаружи горизонта, и на самом горизонте, и под горизонтом пусто: там просто *ничего нет* (ведь задержаться там, вместо того чтобы продолжить падать, не в состоянии даже свет).

*****

**Правила черной дыры для навигации.** Итак, наши эксперименты с гайками и фонариками, *оказывается,* относились к черной дыре — причем к черной дыре простейшего вида, для которой все направления в пространстве равноценны. Это невращающаяся черная дыра (для вращающейся уже не все направления равноценны, потому что есть выделенное — ось вращения). Вообще-то, все астрофизические черные дыры вращаются: во Вселенной едва ли найдется тело без собственного вращения, и невращающимся черным дырам особенно не из чего возникнуть. Поэтому простейшая, невращающаяся, черная дыра — не точное описание реальных черных дыр. Тем не менее пользы от такого описания все равно немало. Оно годится для оценок того, что происходит вокруг вращающихся черных дыр; эти оценки могут быть не точны, но никогда не бессмысленны. А главное — геодезические вокруг невращающейся черной дыры можно использовать не только для черных дыр, но и для звезд и даже планет, включая Солнце и Землю, когда нужно описать эффекты их гравитации точнее, чем на это способен закон тяготения Ньютона. Тот факт, что Солнце — все-таки нормальная звезда радиусом примерно 700 000 км, а не черная дыра, никакого значения не имеет! Все геодезические на большем расстоянии от центра, чем эти 700 000 км, «не знают», создает гравитацию Солнце или сидящая в центре черная дыра, имеющая массу Солнца. В отсутствие вращения и звезды, и «заменяющей» ее черной дыры это верно с абсолютной точностью. Реальное Солнце, конечно, вращается, но по чернодырным стандартам его вращение невелико, и при вычислении ряда эффектов им можно спокойно пренебречь, а при большой необходимости есть способы учесть его в виде очень небольших поправок, существенных только для сравнения с прецизионными измерениями. Разумеется, БУКО и горизонт формально оказываются глубоко внутри Солнца, и ничего похожего на них в недрах настоящего Солнца нет. Но именно чернодырные геодезические в той их части, которая высовывается за пределы Солнца, и ответственны за поворот орбиты Меркурия.

Геодезические, рассчитанные для черной дыры с массой Земли (радиус горизонта для которой чуть меньше девяти миллиметров), говорят о том, какие поправки по сравнению с расчетами по Ньютону следует вносить в работу систем глобальной навигации вроде ГЛОНАСС (рис. 6.23). Критически важно поддерживать синхронизацию часов на спутниках: они летают длительное время, и неучтенные рассогласования в определении времени, если они есть, накапливаются [117]. Поэтому приходится учитывать среди прочего и разницу в ходе времени на поверхности Земли (для оценки: 6400 км от центра) и на орбите (6400 + 19 100 = 25 500 км). *Сила* притяжения на этой высокой орбите примерно в 16 раз меньше, чем на поверхности Земли; правда, замедление времени откликается не на силу, а на величину энергии притяжения, и в результате делить надо не на 16, а всего лишь на 4. Но далее в вычисления вторгается величина скорости света, и в итоге замедление времени ожидаемо оказывается скромным: около 40 микросекунд за сутки. Но время в системах глобальной навигации нужно для определения расстояний, которые проходит «свет» (радиосигнал), а здесь снова вмешивается скорость света: 40 световых микросекунд — это почти 12 километров. Такая ошибка делает задачу определения местоположения нерешаемой. Даже в *тысячу* раз меньшее неучтенное расхождение в ходе времени между двумя спутниками приведет через день к характерной ошибке около 10 м.

Навигационным спутникам приходится подучить кое-что про черные дыры.

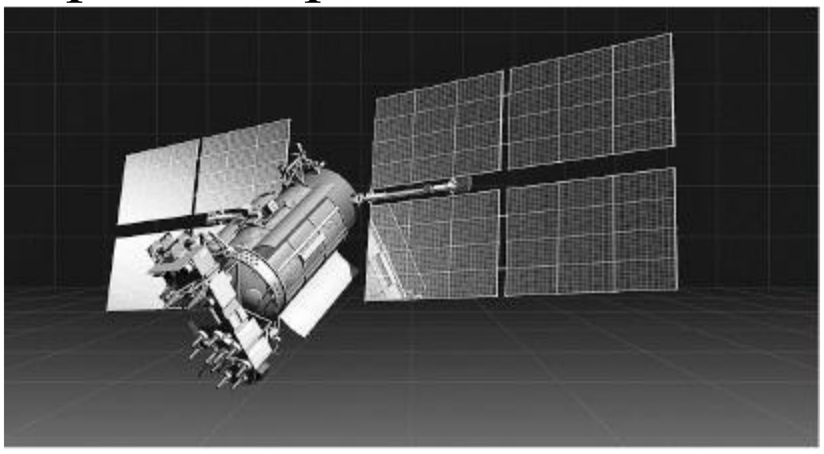


**Рис. 6.23.** Спутник, осведомленный об эффектах кривизны пространства-времени

Кроме «помощи» навигационным спутникам, невращающиеся черные дыры ясно демонстрируют набор эффектов, которые во вращающихся черных дырах могут несколько видоизменяться и/или действовать совместно с другими эффектами, но не отменяются. Они проявляют себя в первую очередь через движение.

*****

**Часть времени не помещается.** Область вблизи горизонта — площадка для серии необычных фокусов. Нам понадобится путешественник — наблюдатель, готовый с некоторого удаления туда прыгнуть. Перед началом своего путешествия, еще находясь далеко от черной дыры, он включает часы. Одновременно с ним это делает и персонал, который собирается бросить его в сторону черной дыры. В момент включения все часы показывают 0 (нуль), и это общее время для всех вовлеченных сторон. Но по мере того как путешественник удаляется от «базы», его представления о времени начинают отличаться от представлений о времени всех провожающих. Вклад в относительное замедление времени вносят и скорость, и гравитация, но, в отличие от опыта Хафеле и Китинга с часами на пассажирских сиденьях, здесь увеличение скорости происходит вместе с попаданием в область все более сильной гравитации. Происходящее дальше я попробую описать в рамках оптической иллюзии или, если угодно, «фотошопного» эффекта. Высокое здание довольно странным образом скособочено с одной стороны (рис. 6.24): пол на втором этаже не весь горизонтальный, а делается наклонным и опускается до уровня улицы; пол третьего этажа тоже наклонно спускается на землю, скажем, на расстоянии метра от того, где уткнулся в нее пол второго этажа. Пол четвертого этажа сходит к поверхности еще через полметра; следующего этажа — еще через четверть метра и так далее: все этажи подходят к поверхности и при этом *теснятся все плотнее*. Прогуливающийся вдоль этой постройки прохожий отмечает, что прошел мимо пола второго этажа; затем третьего и так далее. Довольно скоро он перестает считать пересекаемые им этажи, потому что слишком много их попадает в один сантиметр его пути, а потом и в один миллиметр и так далее. Даже не прибавляя шага, прогуливающийся наблюдатель довольно скоро минует их *все*. Да, и я забыл сразу сказать, что этажей в здании больше, чем любое число, которое вы можете назвать.

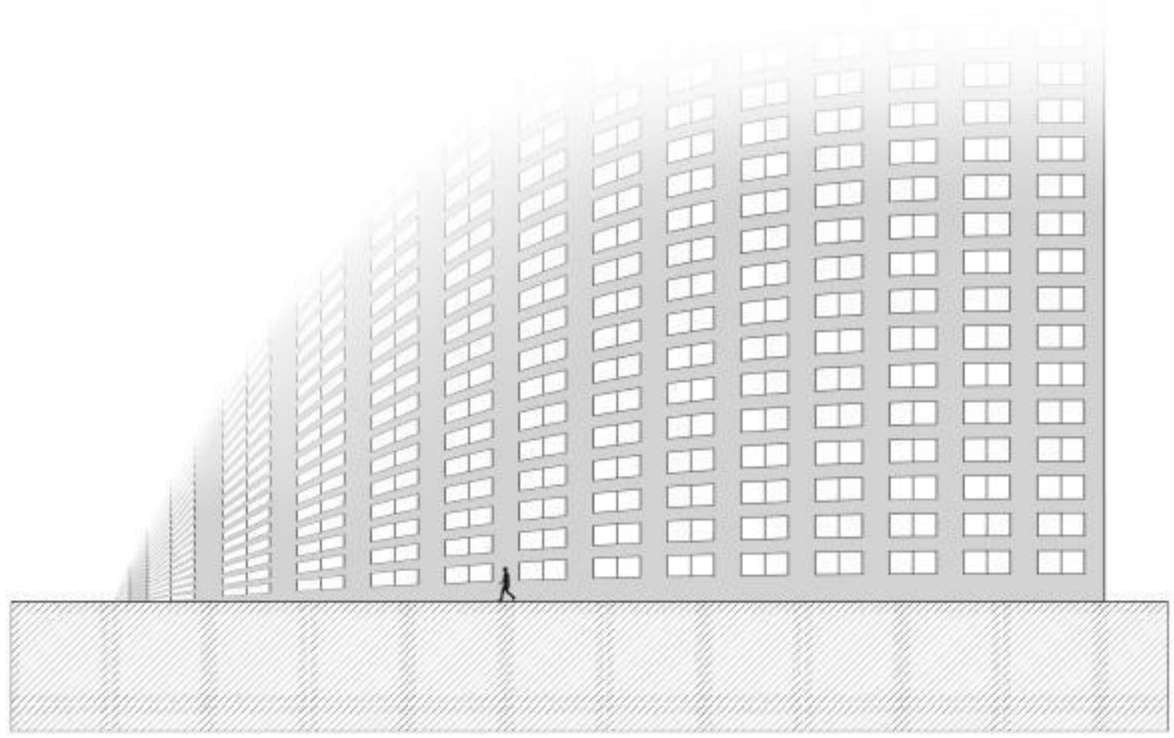


**Рис. 6.24.** Наблюдатель, идущий вдоль скособоченного здания

Этот неоднозначный образец городской архитектуры — в математическом смысле относительно приемлемая аналогия: если пытаться как-то геометрически представить себе искривленное пространство-время в окрестности черной дыры, то нечто похожее и получается, но только, как всегда в таких случаях, направление вверх — это ось *времени*. Архитектура — «застывшая музыка» — сейчас показывает нам застывшее время. Этажи с номерами 1, 2, 3, … в недеформированной части здания — это моменты времени 1, 2, 3, … на стартовой площадке, а каждый этаж, взятый целиком, — это все то, что происходит *одновременно* по мнению находящихся там, на старте. «Листы одновременности» искривляются в искривленном пространстве-времени. Путешественник, летящий через пространство к черной дыре, быстро пересекает листы одновременности, отвечающие будущим моментам времени по часам своих бывших товарищей. Если, скажем, сразу после пересечения листа 1000 он вдруг вспомнит про сверхмощный двигатель, все-таки положенный в рюкзак, и захочет повернуть обратно, то вернется он не раньше — а в действительности заметно позже — момента 1000 по часам своих заново обретенных друзей. Но если не вспомнит, то, пролетев определенное расстояние в пространстве — до горизонта, — он пересечет *все* моменты будущего времени для своих друзей.

### *Приближение к горизонту исчерпывает время далеких наблюдателей*

А если он все-таки захочет вернуться после пересечения горизонта? Возвращаться *некуда*. Времени, *в которое* можно было бы вернуться, для него не осталось. Друзья определенно стали бывшими; и не только они, но и все, что случится с внешней Вселенной в их будущем, остается — *уже осталось* — в прошлом путешественника, который пересек горизонт. Собственно говоря, это один из способов объяснить, почему вернуться нельзя — потому что для возвращения требуется не космический корабль, а машина времени.

### *Под горизонтом пространство и время меняются ролями*

Попадание под горизонт меняет жизнь несколькими способами, наиболее занимательный из которых, если отвлечься от всего личного, — замена времени на пространство. Часы на руке у падающего туда наблюдателя продолжают, разумеется, отсчитывать его собственное время; но из-за кривизны это время — давайте думать о некотором промежутке времени — «уложено» вдоль радиуса, ведущего к центру черной дыры. Из-за того, что радиальное

направление стало для него временем, попадание в центр теперь столь же неотвратимо, как наступление ближайших моментов будущего. Центр черной дыры для падающего наблюдателя представляется не точкой в пространстве, а моментом будущего времени. И наступит он довольно скоро по часам падающего. Как скоро? Чтобы узнать время движения от горизонта до центра, надо знать, конечно, радиус горизонта. Здесь, правда, в дело снова вмешивается несовпадение картин мира удаленных зрителей и самого путешественника. Когда мы говорим о радиусе горизонта и других характерных расстояниях вроде показанных на рис. 6.15, всегда подразумеваются их значения, определяемые удаленными наблюдателями. Для падающего же путешественника не только промежутки времени, но и пространственные расстояния — «свои собственные». В результате время, за которое он, продолжая свободно падать, долетит от горизонта до центра, оказывается равным $2/3R$, если в качестве единиц измерения использовать километры (деление на скорость света, как всегда, даст время в секундах) [118]. Радиус же горизонта тем больше, чем больше масса черной дыры. Для черной дыры солнечной массы у путешественника, *если бы* он дожил до приближения к горизонту, осталось бы не так много времени на раздумья о смысле жизни под горизонтом — менее 7 микросекунд (миллионных долей секунды). Для черной дыры, волюнтаристски выбранной выше так, чтобы ее БУКО проходила на расстоянии ближайшего приближения Меркурия к Солнцу, это уже 34 секунды. Пожалуй, более оптимистично падение в сверхмассивную черную дыру M87*, «фотография» которой приведена на рис. 3.13: по оценкам от телескопа EHT, с помощью которого и получено изображение, ее масса около 6,5 млрд масс Солнца.
Для *невращающейся* черной дыры такой массы свободное падение от горизонта к центру по радиусу заняло бы 11 часов 51 минуту и (неполные) 39 секунд. Это не так мало, чтобы провести серию интересных физических экспериментов — увы, совершенно бесполезных для мирового научного сообщества.

Само по себе путешествие под горизонтом M87* будет комфортным на большей своей протяженности, но не до самого конца. Та часть тела путешественника, которая находится ближе к центру, стремится следовать туда быстрее, чем более удаленные части тела. В какой степени? Щадя чувствительную часть аудитории, заменим смелого туриста на два шара массой по 50 кг каждый, соединенные друг с другом так, что расстояние между их центрами составляет 1 м, и будем считать, что тело этого «муравья» ориентировано вдоль радиуса: один шар как раз на 1 м ближе к центру, чем другой. На большей части пути натяжение в «талии» остается незаметным. Еще за 20 секунд до прибытия в пункт назначения натяжение слегка превосходит то, которое создает груз массой 5 г, подвешенный здесь у нас в земных условиях; но за 0,9 секунды до прибытия натяжение приближается к 2,8 кг. «Голова» муравейного человека, если она дальше от центра, чем «ноги», испытывает такое усилие на отрыв. За 0,05 секунды до финиша никакого робо-человека-муравья не останется: натяжение между двумя его составными частями приблизится к такому, которое создает подвешенный груз в одну тонну. К моменту 10 микросекунд «до» не останется и настоящих муравьев: две половинки тела весом по 5 *миллиграмм*, соединенные талией длиной в 1 миллиметр, будут разрываться сильнее, чем у нас растягивает подвес гиря весом 2 кг. В конечном итоге, однако, и муравьи, и атомы, из которых они состоят, окажутся не растянутыми, а сжатыми: геодезические *сходятся* в центре примерно как улицы в некоем городе с радиальной структурой, показанном на рис. 6.25 слева, но только делают это, как и полагается геодезическим, неотвратимо и до *самого* центра. На рис. 6.25 справа условно показаны растяжения и сдавливания по разным направлениям, причем не надо забывать, что картина на самом деле трехмерная. Сдавливание с боков в конце концов одерживает верх над растяжением вдоль радиуса, и совсем близко к центру объем каждой единицы материи неотвратимо уменьшается (это состояние и вызывает отказ имеющихся теорий).

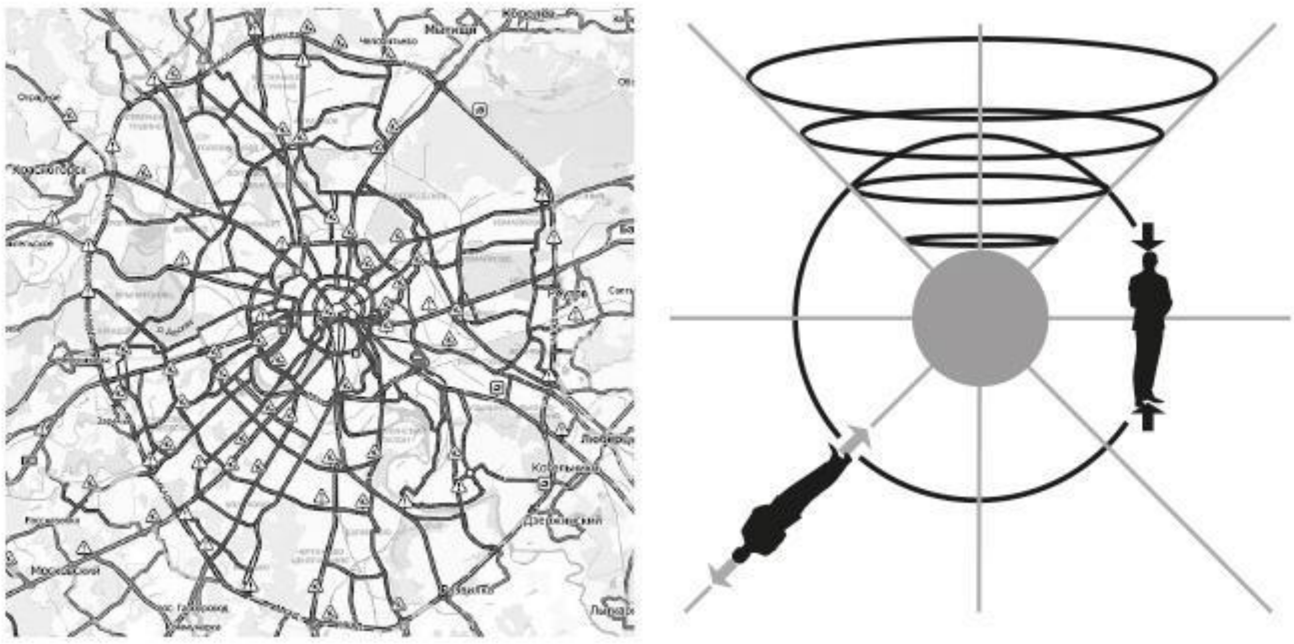


**Рис. 6.25.** *Слева:* автотранспорт, въезжающий по радиусам в центр города, заполняет улицы все более плотно из-за «сдавленности с боков» — уменьшения периметра по мере приближения к центру. *Справа:* растяжения и сжатия, действующие на протяженные тела вблизи притягивающего центра

Но с точки зрения зрителей, оставшихся на базе, все выглядит иначе. Путешественник, за которым они наблюдают, по мере своего приближения к горизонту пересекает листы одновременности (*этажи* на рис. 6.24), отвечающие все более поздним моментам времени с их точки зрения; это значит, что они смогут увидеть его на том расстоянии от горизонта, где он пересек лист номер 1000, *не раньше*, чем их собственное время доползет до момента 1000. Но ближе к горизонту листы одновременности упакованы все более тесно (этажи скособоченного здания утыкаются в асфальт все ближе один к другому), и поэтому путешественник пересекает их один за другим: от листа с номером 1000 до листа с номером 10 000 буквально рукой подать, и он пролетит это *расстояние* за чепуховое время по своим часам. Но болельщикам надо ждать 9000 единиц *времени*, пока это случится по их часам (и потом еще сколько-то, чтобы до них дошел сигнал от путешественника). Падение, на взгляд со стороны, не ускоряется, а замедляется! [119] По мере приближения к горизонту малейшее продвижение путешественника в сторону горизонта будет требовать от болельщиков, желающих это увидеть, все более долгого ожидания (Ахилл и черепаха наоборот в некотором роде). С точки зрения болельщиков *время путешественника замедляется до полной остановки* на горизонте. Лазерный луч, которым путешественник (направив его должным образом, сверившись с рис. 6.22) пожелает сигнализировать о своем приближении к горизонту, будет приходить на базу все более сдвинутым в красную область спектра, затем в инфракрасную, микроволновое излучение, радиоволны и в конце концов станет недетектируемым. В этом смысле «информационная потеря» падающих в черную дыру вещей происходит не скачком, а постепенно. Путешественник «зависнет», «замрет» — и «растает» вблизи горизонта. Отдаленные зрители не смогут дождаться даже пересечения горизонта (неважно, для массивной черной дыры или нет), потеряют терпение и разойдутся. Прыжки на горизонт событий — незрелищный спорт. При этом, однако, никак не получается сказать «*пока* зрители скучают, у путешественника начинаются проблемы». Даже в ответ на вопрос, живы ли еще, или уже нет путешественник и все муравьи на борту, приходится переспрашивать: в каком смысле?

*****

**Кривизна — расхождение геодезических.** Схождение и расхождение геодезических измеряется *кривизной пространства-времени*. До сих пор я употреблял это слово, надеясь, что его значение примерно понятно из контекста, но сейчас подходящий момент, чтобы определить кривизну точнее. Искривленное пространство-время, которое встречается на этой прогулке буквально за каждым углом, потому и «искривленное», что неосторожным муравьям там может оторвать голову (и прыгать под горизонт для этого совершенно не обязательно, это может случиться где угодно). Технически кривизна описывает все способы, которыми могут пострадать муравьи, и выражает «уровень опасности» числами. Этих чисел несколько, и они, как правило, меняются от точки к точке в пространстве-времени.

*Кривизна выражает «уровень опасности» со стороны приливных сил*

Мы отчасти знакомы с кривизной, потому что это — *почти* приливные силы, которые впервые встретились нам на прогулке 4. Это геометрическая подоплека приливных сил. В ньютоновском мире приливные силы были в основном растяжениями и служили источником разнообразных явлений — от приливов и синхронизации вращений Луны до разрушения тел на пределе Роша. Их продолжают называть тем же словом и в более общей ситуации, но теперь это слово превращается в термин и не обязательно обозначает то же самое, что обозначало в своей прошлой жизни: в гравитации, описываемой как геометрия, более разнообразны несчастья, которые могут выпасть на долю муравья; а кроме того, дело происходит в пространстве-времени.

*Кривизна — это сбои в гармонии невесомости*

Кривизна выражает, насколько желают удалиться, или сблизиться, или обвиться друг вокруг друга соседние геодезические (не траектории в пространстве, а геодезические в пространстве-времени, как, возможно, стоит подчеркнуть). «Соседние» здесь понимается в строго определенном математическом смысле, да и «желают» тоже — как относительное ускорение (подробности того, как оно определяется, приведены в добавлениях к этой прогулке). Поскольку каждое малое тело, развертка движения которого есть геодезическая, находится в состоянии свободного падения, можно сказать, что кривизна — это нарушения «одинаковости» свободного падения для соседей по геодезическим. Муравей испытывает нарастающий дискомфорт в точности потому, что движение его головы и тела описывается различными геодезическими. Поэтому кривизну нельзя «испытать» или измерить, имея лишь одно пробное тело: требуется как минимум два, движение которых отвечает двум «соседним» геодезическим. А поскольку в пространстве-времени четыре независимых направления, изучить относительные ускорения геодезических необходимо вдоль каждого из направлений; но и геодезические можно «прокладывать» в любых направлениях, поэтому требуется немало по-разному ориентированных муравьев. Из наблюдений за тем, как они разрываются, сдавливаются или скручиваются, получается набор из нескольких чисел в каждой точке пространства-времени.

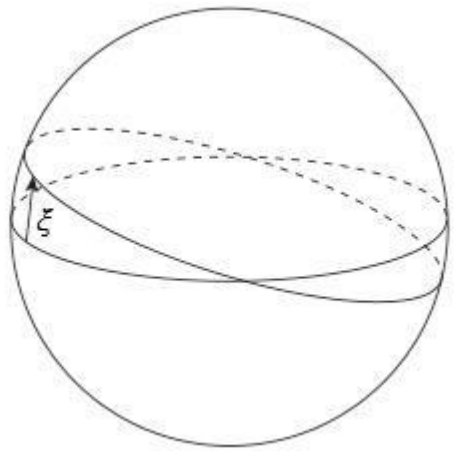



**Рис. 6.26.** Расхождение/схождение геодезических на сфере

В двумерии, как всегда, все намного проще, и дежурный пример поведения геодезических на сфере показан на рис. 6.26. Там в качестве одной геодезической выбран экватор (если считать, что полюса расположены сверху и снизу), а на некотором расстоянии $\xi$ от него выбрана точка, и через нее проведена другая геодезическая, «максимально параллельная» экватору. На рисунке показан ее участок. Она, как и экватор, представляет собой окружность большого круга и по этой причине не может оставаться на неизменном расстоянии от экватора; на рисунке две геодезические сходятся (в общем случае я говорю о *рас*хождении геодезических; сходятся или расходятся — это вопрос знака). Сейчас, конечно, мы говорим о геодезических в традиционном «геодезическом» понимании, что, как всегда, несколько портит аналогию с пространством-временем. Тем не менее если бы на сфере жили двумерные существа и *если бы* имелся закон природы, что они могут передвигаться только по геодезическим, то они заключили бы, что когда Существо А и Существо Б ползут каждое своим путем, некая *сила* тянет их друг к другу: они неизбежно сближаются, а после встречи, наоборот, неизбежно начинают расходиться. В нашей Вселенной свободное падение тел в пространстве описывается геодезическими в пространстве-времени, а мы, глядя на происходящее изнутри *пространства*, ощущаем расхождение/схождение геодезических как неустранимые эффекты гравитации.

И еще: происходящее на сфере для нас наглядно, потому что мы смотрим со стороны, а в отношении пространства-времени такой возможности нет, поэтому расхождение геодезических требуется описывать в тех же внутренних терминах, в которых мы и строим искривленную геометрию. По счастью, ничего изобретать не нужно, имеющегося основного инструмента — параллельного переноса — достаточно для придания кривизне точного смысла. Подробности того, как это делается и что получается, описаны в добавлениях к этой прогулке. Чисел, выражающих все способы взаимного поведения соседних геодезических, заметно больше одного. Они организованы в таблицу формата 4 × 4 × 4 × 4, в которой вообще-то 256 ячеек. Правда, 112 из них никогда не заполнены (технически это выражается в том, что в них *всегда* проставлены нули, не несущие никакой информации). Половина оставшихся — это повторение чисел из некоторых других ячеек, но с противоположным знаком; таким образом выражается взаимность типа «если А удаляется от Б, то Б удаляется от А». Но и из оставшихся 72 ячеек далеко не все содержат независимые данные — числа в них тоже повторяются или выражаются друг через друга; в этом проявляются более глубокие свойства взаимности, следующие из правил параллельного переноса. Так или иначе все числа, раскиданные по таблице 4 × 4 × 4 × 4, выражают те свойства геометрии, которые служат объяснением приливных сил — т.е. сил, которые различным образом растягивают, сжимают и скручивают подвернувшиеся куски материи. И кривизна не устранима никакими трюками типа применения принципа относительности. Она не выключается переходом к какому-либо специальному виду движения, ведь расхождение между двумя геодезическими остается расхождением независимо от того, какую из них вы выбрали в качестве «своей собственной». Мы еще вернемся к этому «монстру» 4 × 4 × 4 × 4, а заодно увидим, что он не так и страшен, а пользы от него необычайно много. А пока обсудим наконец класс черных дыр, у которых кривизна устроена поинтереснее, чем мы видели до сих пор.

*****

**Нельзя не вращаться.** Как мы уже говорили, черные дыры в космосе должны вращаться. Наличие оси вращения немедленно нарушает «одинаковость по всем направлениям», которая упрощала картину в случае невращающихся черных дыр. Разбрасывать гайки по окрестностям вращающейся черной дыры — занятие практически бесконечное, потому что разнообразие велико; орбиты незамкнуты, если только не случатся условия резонанса (рис. 6.27), но теперь, в отличие от невращающейся черной дыры, требуется синхронизация циклических изменений радиуса и *двух* углов оборота вокруг центра [120].

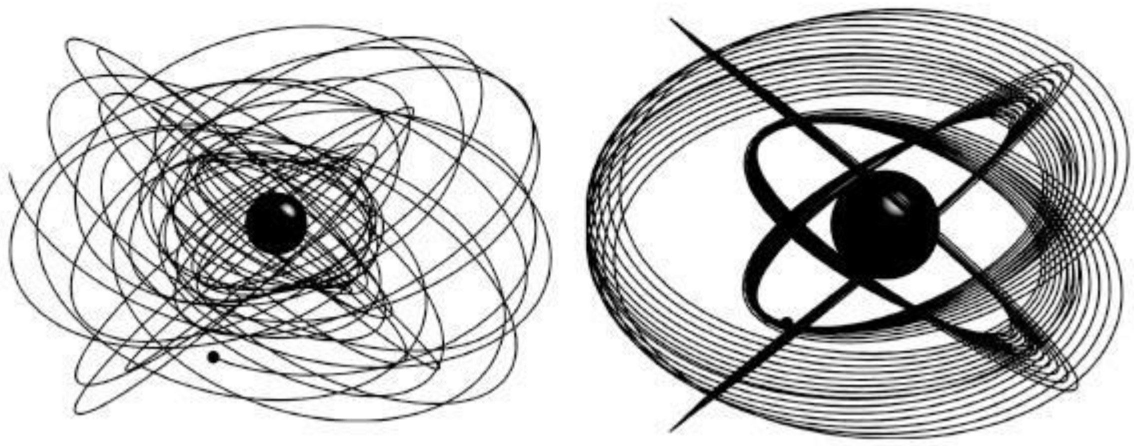


**Рис. 6.27.** Орбиты пробных тел вокруг вращающейся черной дыры. *Слева:* незамкнутая орбита, постепенно заметающая весь объем. *Справа:* периодическая орбита в случае, когда выполнены некоторые резонансные условия

Новый аттракцион предлагается тем, кого бросают во вращающуюся черную дыру строго по радиусу: падение происходит вовсе *не* по радиусу! Более сложное устройство кривизны определяет такие геодезические, что гайки и наблюдатели, начавшие падение по радиусу, *вовлекаются* во вращение в пространстве — вокруг оси вращения черной дыры и в ту же сторону. Это неблизкая нам ситуация, когда гравитация действует не только как *при*тяжение, но еще и как «утяжение» вбок, определяемое собственным вращением того, что притягивает. Источнику кривизны не надо даже быть черной дырой (хотя, конечно, с черными дырами все всегда отчетливее). Измерение этого тончайшего эффекта для *Земли*, с ее слабой гравитацией и медленным вращением, удалось выполнить в 2004 г. с помощью спутника Gravity Probe B. Вовлечение во вращение вокруг центрального тела выражалось в прецессии гироскопа, которая, собственно, и фиксировалась на спутнике. Близнецы, кстати, могут использовать вовлечение во вращение, чтобы в очередной раз рассогласовать свой возраст (рис. 6.28): кривизна, как мы помним, — это свойство пространства-*времени*, и облет вращающегося тела в двух разных направлениях, по вращению и против вращения, влияет на ход времени по-разному. У того из близнецов, кто летит против вращения, времени до встречи пройдет меньше. В околоземном пространстве это пренебрежимые во всех смыслах сотни аттосекунд, но вращающиеся черные дыры только и ждут, чтобы их облетели с двух разных сторон.

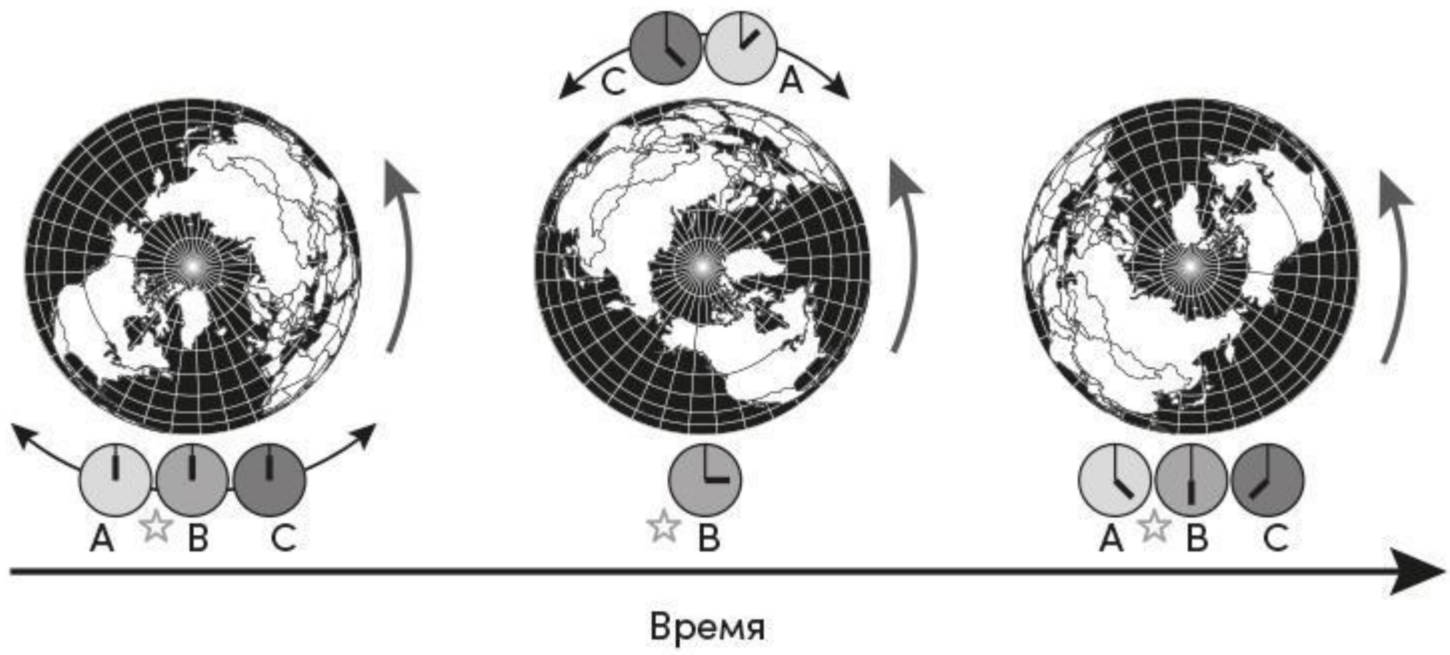



**Рис. 6.28.** Вовлечение во вращение вызывает различия в ходе времени. Наблюдатель A огибает вращающееся тело против направления вращения, наблюдатель C — по направлению, а наблюдатель B не делает ни того ни другого. Показания всех часов в итоге различаются

Падающему наблюдателю, впрочем, не до этого. В отличие от своего приятеля, он поступил очень разумно, заплатив турагентству больше за возможность падения именно во вращающуюся черную дыру: приятель, сэкономивший на вращении, будет двигаться только по радиусу, а от шампанского при пересечении горизонта его будет отвлекать смена ролей пространства и времени. У вращающейся же черной дыры эффекты следуют по отдельности, а горизонтов вообще в два раза больше (есть внешний, собственно, и окутывающий черную дыру, а кроме него, еще и внутренний), так что один горизонт обходится дешевле, *плюс* еще до внешнего горизонта наблюдатель пересекает эргосферу. Это звучное название выбрано для еще одной математически определенной поверхности — в том смысле «математически», что ее расположение и правда известно математически, но еще и в том смысле, что проходит она в пустом пространстве и поэтому не является «физической» поверхностью чего бы то ни было. Эргосфера объемлет вращающуюся черную дыру снаружи от (внешнего) горизонта (рис. 6.29) и сходится с горизонтом только на полюсах, а в плоскости экватора отстоит от него на расстояние, сравнимое с радиусом самого горизонта в той же экваториальной плоскости. После пересечения эргосферы время приобретает свойства пространственных направлений, хотя до настоящего горизонта еще далеко. Внутри эргосферы время вытягивается «вокруг», по направлению вращения самой черной дыры, и именно поэтому все предметы, которые туда попали, не могут не вращаться: увеличение угла поворота вокруг черной дыры становится таким же неотвратимым, как наступление ближайших моментов будущего времени. При этом все еще *можно* как приближаться к горизонту, так и удаляться от него, и, насмотревшись на это чудо «пространственного времени», еще можно вернуться назад — так, собственно, и делают те, кто купил дешевый вариант экскурсии, в который не включено посещение горизонтов.

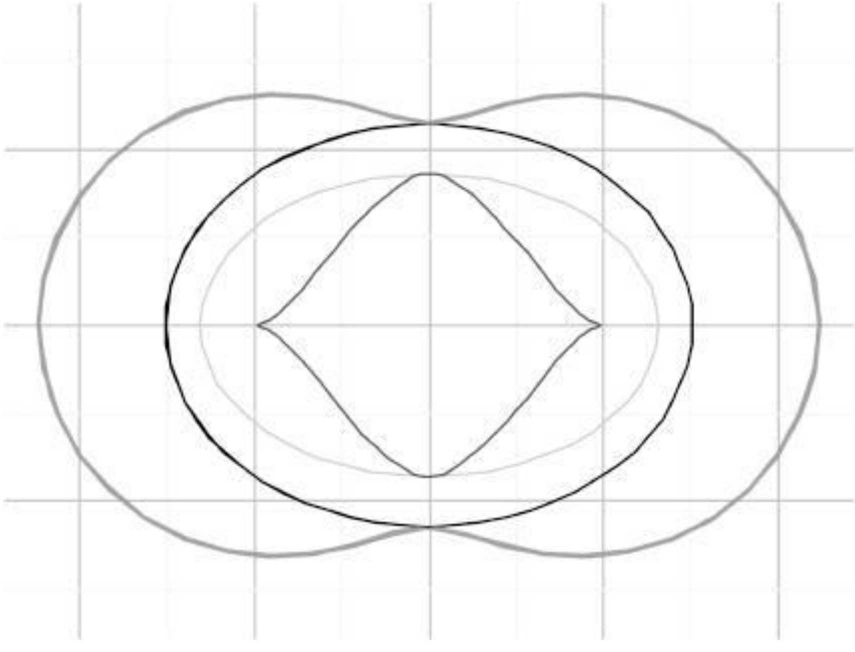


**Рис. 6.29.** Важные границы вокруг вращающейся черной дыры в разрезе. Ось вращения проходит вертикально. Форма поверхностей зависит от выбора координат, но их относительное расположение и точки соприкосновения от этого не меняются. Снаружи внутрь: эргосфера, внешний горизонт, внутренний горизонт и внутренняя эргосфера. Зазор между внешним горизонтом и эргосферой тем больше, чем сильнее раскручена черная дыра

А после пересечения внешнего горизонта — теперь уже непременно *не* по радиусу, что, конечно, было отдельно отмечено в рекламной брошюре, — время еще раз «поворачивается» и вытягивается вдоль радиуса. Это значит, что уменьшение радиуса — приближение к центру — наконец-то стало неотвратимым (хочется сказать «как наступление завтрашнего дня», но события, как правило, развиваются быстрее, чем за сутки). Вернуться назад больше нельзя. Но агентство, как довольно скоро выясняется, не обмануло: ближе к центру находится *второй*, внутренний горизонт. После его пересечения приближение к центру перестает, строго говоря, быть обязательным, во всяком случае, для тех путешественников, кто запасся двигателем [121].

Впрочем, до второго горизонта надо еще добраться невредимым (как всегда, чем больше черная дыра, тем *позднее* — ближе к центру — приливные силы разойдутся вовсю). Кривизна пространства-времени вокруг вращающейся черной дыры проявляет себя по полной, и порождаемые ею приливные силы умеют делать намного больше, чем вызывать приливы и создавать разрыв и сжатие, как мы видели на рис. 6.25 справа; теперь еще и неоднородность вовлечения во вращения создает усилие, заставляющее каждое тело скручиваться вокруг различных направлений (или ломаться от скручивающих усилий; это уж как получится). Если ваше левое плечо толкают вперед сильнее, чем правое, то, кроме общего движения вперед, вы начнете поворачиваться направо. Примерно эта особенность окрестностей вращающейся черной дыры схематично показана на рис. 6.30; надо только помнить, что полная картина трехмерная и каждое тело испытывает подобные усилия вдоль трех осей — и это в добавление к сжатиям/растяжениям, показанным на рис. 6.25 справа. В контракте с турагентством все-таки был мелкий шрифт.

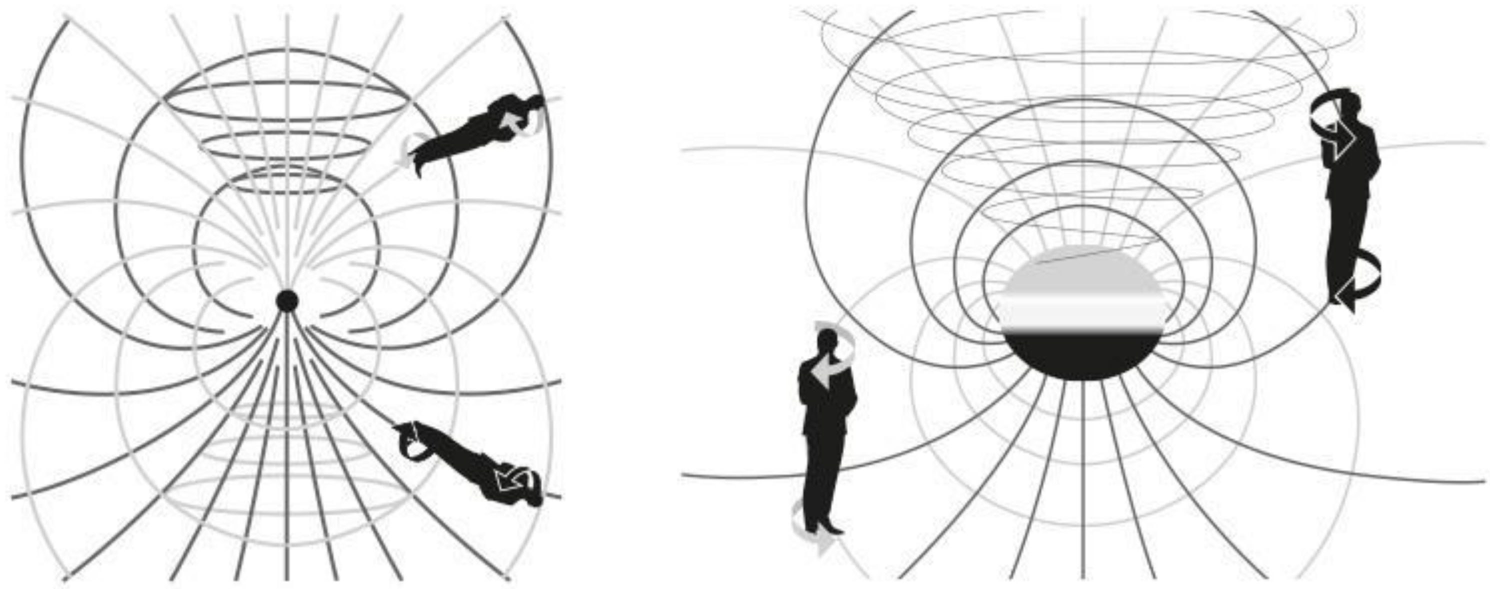


**Рис. 6.30.** Закручивания пробных тел; серым и черным показаны закручивания в разных направлениях. *Слева:* вдали от вращающегося тела. *Справа:* около вращающейся черной дыры. Закручивания по пересекающимся линиям действуют одновременно. Серый и черный на горизонте указывают на максимальную степень закрученности в двух противоположных направлениях. Светлым показана область, где закрученность близка к нулевой

## Добавления к прогулке 6

**Сила ли гравитация?** Является ли гравитация *силой*, раз она «стала геометрией»?.А вообще, что такое сила? Это нечто, что «действует» (скажем, на тела) таким образом, что вызывает изменение их количества движения. Сказать что-то еще о «силе вообще» довольно трудно. Сообщение закона Ньютона в том и состоит, что сила — это темп изменения количества движения, но природа «силы» при этом никак не конкретизируется. Важно лишь, что она *вызывает* изменения в движении. «Сила говорит материи, как ей двигаться», — мог бы сказать и Ньютон, если бы согласился записать интервью для новостного канала, не вдаваясь в детали (все подробности про дифференциальные уравнения второго порядка все равно бы вырезали при монтаже) [122]. В обсуждаемом случае искривленная *геометрия* прекрасно справляется с ролью силы именно потому, что говорит материи, как ей двигаться.

Убедиться же, что гравитацию как силу никто не отменял, по-прежнему можно разнообразными способами, например уронив что-нибудь тяжелое себе на ногу или исходя из того, насколько в общем невысоко удается подбросить камень.

**Принцип максимального старения.** Как всякая хорошая вещь, геодезические в пространстве-времени известны с более чем одной стороны. Геодезические для тел оказываются решением еще одной задачи, часто возникающей по разным поводам и выражающей несколько неожиданный аспект той идеи, что геодезические — «самые прямые из возможных».

Любые два события в пространстве-времени, одно из которых лежит в абсолютном прошлом другого, можно соединить несчетным числом путей в пространстве, по которым, кроме того, можно двигаться, по-разному меняя скорость. Это дает «еще более несчетное» число «путей», соединяющих выбранные события в пространстве-времени. Только один из этих путей представляет собой геодезическую. Например, путешествовать от космодрома до того же космодрома в будущем можно разными способами: на ракете, летящей до TRAPPIST-1 и обратно, или же поселившись в палатке неподалеку от стартовой площадки на все время от старта до возвращения ракеты; последнее, конечно, тоже «путешествие» между фиксированными событиями старта и финиша, из одной точки в пространстве-времени во вполне определенную другую точку в пространстве-времени. Про космодром, кстати, мы решили на прогулке 5 (см. рис. 5.19), что это космическая платформа где-то в межпланетном, а может быть, и межзвездном пространстве, и в таком случае оставаться на космодроме означает путешествовать из собственного прошлого в собственное будущее по геодезической.

### *Геодезические гарантируют самые долгие путешествия*

Для каждого пути в пространстве-времени, соединяющего выбранные события, будем записывать время, проведенное в пути, т.е. время, которое покажут часы, которые *сами путешествуют*. Среди *всех* возможных вариантов путей тот, который описывается геодезической, выделен особым свойством: отправленные по нему часы показывают максимальное время путешествия по сравнению со всеми другими часами, путешествующими между теми же событиями.

Это выглядит противоположно нашим представлениям о «самом прямом». Геодезические на глобусе (и вообще там, где нет времени как отдельного «направления») — это пути *минимальной* длины между двумя точками, они же и «самые прямые из возможных». Но перед нами еще один случай, когда отличие времени от пространства вносит свои поправки, и в пространстве-времени обстоятельства поворачиваются таким образом, что самые прямые линии, соединяющие два события, — это самые *долгие* путешествия для путешествующих. На космодроме, плавающем в космосе, как мы видели на прогулке 5, проходит больше времени, чем на борту: понятно, скажем мы теперь, ведь на космодроме двигателей нет, поэтому он следовал по геодезической (*даже если* по чьей-то неосмотрительности начал падение в сверхмассивную черную дыру), а ракета — определенно не по геодезической, раз включала двигатели. «Парадокс близнецов» (кто именно постареет сильнее) разрешается мгновенно: тот, кто на космодроме.

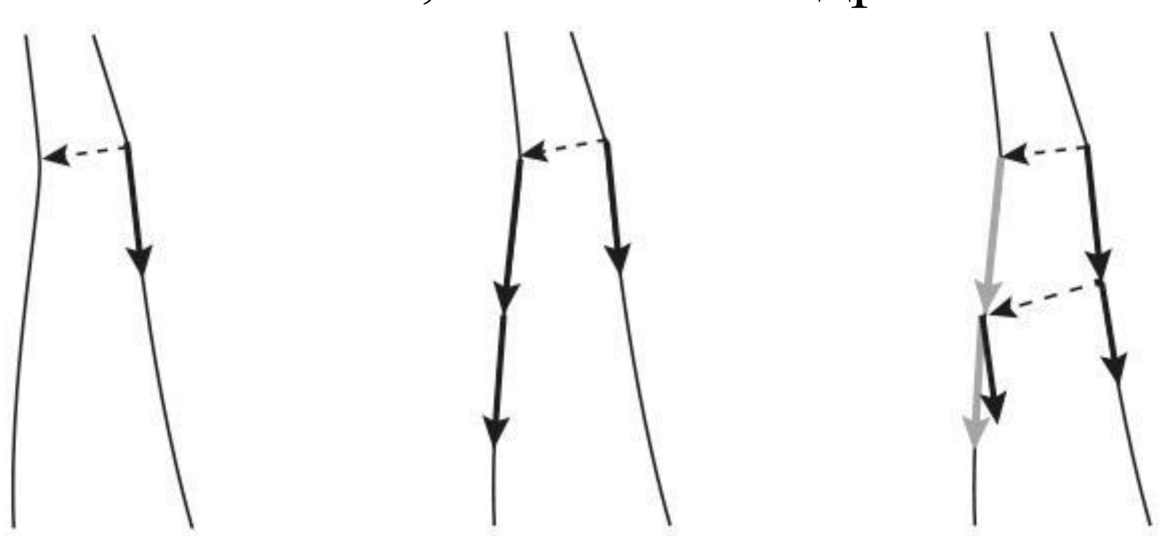


**Рис. 6.31.** Расхождение геодезических измеряется как разность двух способов параллельного переноса касательного вектора. *Слева:* на геодезической выбрана точка, в которой проведен касательный вектор к геодезической. В точке, кроме того, указано направление к какой-то соседней геодезической. *В центре*: касательный вектор, перенесенный на вторую геодезическую, параллельно переносится вдоль этой геодезической. *Справа:* касательный вектор сначала подвергается параллельному переносу вдоль «своей» геодезической, а затем параллельно переносится на соседнюю. Разница между результатами в центре и справа и выражает расхождение геодезических

### *Свободное падение обеспечивает максимальное старение*

Это свойство геодезических иногда называют «принципом максимального старения». Пространство-время говорит материи двигаться так, чтобы время на часах, путешествующих между событиями А и Б, было максимальным по сравнению с показаниями часов, добирающихся от А к Б любыми другими способами — при участии любых воздействий, кроме гравитации. Показания путешествующих часов часто называют собственным временем. Три с виду различные идеи выражают одно и то же: геодезические — свободное падение — максимальное собственное время.

### *Свойства параллельного переноса определяют кривизну*

**Кривизна: расхождение геодезических и забор.** Кривизна — это «мера неодинаковости» близких геодезических, измеряемая их относительным ускорением. Определение кривизны опирается на правила параллельного переноса, и точный ответ на вопрос «кривизна *чего*?» звучит как «кривизна заданных правил параллельного переноса». Чтобы выразить количественно, в каком темпе расходятся две соседние геодезические (рис. 6.31), мы выбираем место (точку) на одной из них, соединяем эту точку стрелкой $\underleftarrow{\xi}$ с другой геодезической и в той же выбранной точке проводим касательный вектор к первой геодезической. Относительное ускорение геодезических выражается как разность результатов параллельного переноса, выполняемого двумя способами, которые различаются порядком действий. В первом варианте сначала параллельно переносим касательный вектор вдоль стрелки $\underleftarrow{\xi}$ на вторую геодезическую, а затем то, что получится, переносим параллельно вдоль второй геодезической. (Стрелку $\underleftarrow{\xi}$ мы при этом проводим так, чтобы после переноса вдоль нее получился касательный вектор ко второй геодезической; это всегда можно сделать.) Во втором варианте сначала касательный вектор переносится параллельно вдоль первой геодезической, а уже затем получившийся вектор параллельно переносится на вторую.

Разница между двумя результатами — относительное ускорение — и выражает схождение/расхождение геодезических. Эта математическая процедура выполняется для «очень близких» геодезических.

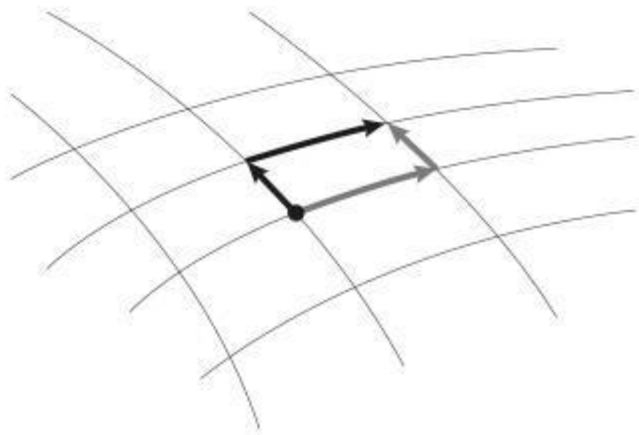


**Рис. 6.32.** Площадка, определяемая небольшими смещениями вдоль двух координатных линий. Показаны два различных пути, соединяющие начальную точку с противолежащей на координатной сетке

Кривизна — это набор «всех» таких расхождений, подходящим образом организованный по направлениям в пространстве-времени. Чтобы перечислить «все» расхождения указанного вида, надо перечислить все базовые способы направить геодезические и провести стрелку, которая их соединяет. Это удобнее сделать, решая эквивалентную, но чуть другую задачу о параллельном переносе двумя способами — задачу по постройке забора. В облюбованном уголке пространства-времени выберем каким-нибудь способом координатные линии; на рис. 6.32 показаны два семейства координатных линий. Вообще-то четырехмерное пространство-время полагается «расчертить» четырьмя такими семействами, но нам сейчас нужны именно два — любая пара из имеющихся четырех. Предпримем очень короткое путешествие: пройдем немного вдоль одной из координатных линий (назовем ее $x$), свернем на другую (скажем, $y$) и, пройдя по ней немного, отправимся назад по соседней линии $x$ и, наконец, вернемся в исходную точку по линии $y$. Путешествие мысленное, и требуется оно только для того, чтобы обозначить «участок» в форме параллелограмма. Этот участок теперь и предлагается обнести забором из досок. Первую доску поставим в исходно выбранной точке и направим ее, скажем, вдоль координатной линии $z$ (на рисунке не показана). Хороший забор — такой, который не «заваливается», а это означает, что следующую доску надо поставить *параллельно* первой, еще следующую — тоже параллельно и т.д. В дело оказывается вовлечен параллельный перенос! Для ускорения строительства работу поручают двум бригадам: каждая «привязывается» к самой первой доске, а затем первая продвигается сначала вдоль координатной линии $x$, а потом по координатной линии $y$, а вторая бригада идет сначала вдоль $y$, а потом вдоль $x$. В искривленном пространстве-времени забор «не сойдется»: первая и вторая бригады не согласятся по поводу того, как должна стоять финальная доска в месте их встречи. Это несогласие и определяется кривизной. Как всегда, стороны «участка» считаются малыми в математически точно определенном смысле. Полученная кривизна тогда относится к точке, откуда мы начали построение. (Чтобы узнать кривизну в какой-то другой точке, надо повторить все действия начиная оттуда.)

Чтобы выразить кривизну, надо сказать, как именно следует повернуть доску, которую ставит вторая бригада, чтобы она совпала с доской, которую ставит первая. Сказать это нужно, конечно, не для одного конкретного забора, который мы велели строить, направив самую первую доску вдоль линии $z$, а для *любого* забора — такого, первая доска которого смотрит в любом направлении. Базовых направлений четыре, по числу измерений пространства-времени [123]. А сам участок, обносимый забором, можно построить не только на малых смещениях по $x$ и $y$, но и на малых смещениях вдоль любой пары направлений. Итак: два направления задают участок, а третье определяет ориентацию первой доски. Каждое направление — это одна из осей ($x$, $y$, $z$, $t$). Все эти возможности организуются в таблицу $4 \times 4 \times 4$; в ней определенно встречаются случаи, когда площадки на самом деле нет (в качестве первого направления выбран, скажем, $x$, но в качестве второго — тоже $x$), но нам удобно в таких случаях не беспокоиться отдельно, а заменять все данные нулями. В остальных случаях, когда с площадкой все в порядке, мы вносим в таблицу данные, определяющие «доводку» финальной доски второй бригады, — и это *еще четыре* числа [124]. Так и получается, что данные, описывающие кривизну, размещены в таблице формата 4 × 4 × 4 × 4. Часть ячеек в ней заведомо содержит нули, содержимое части ячеек выражается через содержимое других, но все равно штука впечатляющая. Такую таблицу кривизны следует построить в каждой точке пространства-времени. Если пространство-время плоское, то все заборы всегда сходятся и в таблице одни нули. Наличие же кривизны означает, что *есть* несходящиеся заборы. У нас большие планы на кривизну на следующей прогулке.

## Признания и литературные комментарии

«Развертки», которые в пространстве-времени представляют любое движение тел в пространстве, называются мировыми линиями. Геодезические «для тел» называются времениподобными (световые геодезические по этой причине иногда называются светоподобными; для них распространилась и калька с английского «нулевые», что примерно означает, что у них нет собственного времени). «Лепесток-намотка» для орбит в сильной гравитации — мой вольный («смысловой») перевод английского *zoom-whirl*; БУКО — тоже мое изобретение, стандартная аббревиатура — ISCO. Орбиты, «сматывающиеся и наматывающиеся» на неустойчивую круговую орбиту, называются гомоклинными. Количество вращения, как уже было сказано, официально называется моментом импульса или моментом количества движения. Невращающаяся черная дыра называется черной дырой Шварцшильда (я так и буду называть ее в дальнейшем), вращающаяся — черной дырой Керра. «Таблица кривизны» формата 4 × 4 × 4 × 4 — это тензор кривизны, или тензор Римана.

Самые основные положения общей теории относительности в прекрасном популярном формате обсуждает Гарднер [9]. Мое изложение концепции искривленного пространства-времени в значительной степени опирается на идеи из книги [18]. Своим уникальным стилем (книгу интересно просто подержать в руках, вне зависимости от того, собираетесь ли вы ее читать) она обязана Уилеру. В русском переводе трехтомник вышел больше сорока лет назад и стал событием. Содержание его, несомненно, устарело в отношении ряда астрофизических задач; тем не менее изложение там основ общей теории относительности является одним из классических, а сокращение MTW (по фамилиям трех авторов) — безошибочно распознаваемый способ на него сослаться. Относительно недавно на языке оригинала даже вышло переиздание, которое Мизнер и Торн просто сопроводили комментариями о том, где именно наука заметно ушла вперед со времени написания книги (Уилер скончался в 2007 г.; Торн получил Нобелевскую премию в 2017-м). Из [18] я, кроме того, позаимствовал идею изображения секторов, свет из которых пропадает в черной дыре, как на рис. 6.22.

Основные представления об общей теории относительности (кратко) и все главные свойства черных дыр (с комфортной степенью подробности) изложены в книге [7]. Приливные эффекты, производимые компактными объектами, учитываются среди прочего в задаче об ускорении космического зонда за счет гравитационной пращи у белых карликов и нейтронных звезд [26]. Упомянутое определение радиуса нейтронной звезды массой 1,4 солнечных выполнено в работе [50]. Изображения орбит пробных тел вблизи черной дыры взяты из работы [87], где предлагается способ их классификации. Источник рис. 6.28, изображающего вовлечение систем отсчета (на этой прогулке — вовлечение гаек) во вращение вблизи вращающегося тела, — статья [57]. Картины сжатия, растяжения и скручивания на рис. 6.25 и 6.30 заимствованы из [39, 95]. Самый длинный прямой путь на земном шаре, проходящий по воде, построен в работе [54]. По Транссибирской магистрали я, к сожалению, никак не соберусь проехать.

## Движение на прогулке 6

Движение под действием одной только гравитации — свободное падение — происходит одинаково для всех малых тел, вне зависимости от их массы и каких-либо других свойств. В космических полетах при выключенном двигателе это свойство обеспечивает невесомость, независимо от того, какие небесные тела притягивают космический аппарат и как он от этого движется. Такое положение дел, возведенное в фундаментальный принцип, позволило считать гравитацию выражением того, насколько геометрия пространства-времени отклоняется от плоской геометрии. Движение в пространстве под действием гравитации происходит так, что в искривленном пространстве-времени ему отвечают геодезические — самые прямые из возможных линий. Движение, описываемое геодезической, локально «выключает» гравитацию: каждый локальный наблюдатель, испытывающий действие только гравитации, может логически непротиворечивым образом считать себя неподвижным и не испытывающим ее действия. Более того, локальный наблюдатель, испытывающий ускорения за счет негравитационных сил, может считать себя неподвижным, приписав ускорения эффектам гравитации. В этом состоит общий принцип относительности — равноправия всех видов движения. Из всех возможных способов движения между двумя событиями в пространстве-времени движение под действием одной только гравитации обеспечивает максимальный интервал времени по движущимся часам. Распространение света описывается особыми, «световыми» геодезическими в пространстве-времени, из-за чего и траектория света в пространстве искривляется притягивающими массами.

В условиях сильной гравитации и больших скоростей движение вблизи притягивающего центра происходит не по Кеплеру — Ньютону: появляется возможность падения на центр, эллипсы размыкаются и могут деформироваться до орбит «лепесток-намотка», а устойчивые орбиты не существуют слишком близко к центру и при количестве вращения ниже некоторого порогового. Вокруг притягивающего центра возникает горизонт событий — воображаемая поверхность, из-под которой не может выйти наружу ничто, даже свет. Движение от удаленных областей до горизонта происходит за ограниченное время по движущимся часам, но занимает все будущее время с точки зрения удаленных наблюдателей. Движение под горизонтом черной дыры неотвратимо ведет к ее центру, который из точки в пространстве превращается в момент будущего времени. Движение вблизи вращающихся тел и черных дыр демонстрирует вовлечение во вращение, и внутри эргосферы вращательное движение неотвратимо.

Расхождение соседних геодезических определяет кривизну пространства-времени — геометрическую основу приливных сил. Сколько-нибудь протяженные объекты, движущиеся в области с высокой кривизной, не могут сохранить свою целостность.

## Прогулка 7

# Говорит и движется материя

**Маршрут:** *Десятирукий Агент. — Наследник Пифагора. — Почти произвольные правила. — Десять голосов материи. — Двадцать оттенков кривизны. — Уравнения Эйнштейна. — Конструктор вселенных. — Совсем не наши вселенные. — Наконец-то обмануть систему? — Пустая кривизна. — Два тела, поле и волны.*

**Главный герой:** *уравнения Эйнштейна*

---

**Десятирукий Агент.** Движением пробных тел распоряжаются геодезические. Геодезическими распоряжаются уравнения, в формулировке которых использованы правила параллельного переноса. Эти правила во многом определяют искривленное пространство-время, но они — еще не тот Агент, существование которого Ньютон в большой степени подозревал, но степень «материальности» которого не могла быть ему ясна (см. главу «прогулка 1»). Современное название для всех таких агентов — *поле*: это явление, существующее в пространстве в некотором «распределенном» виде, изменяющееся с течением времени и проявляющее себя в воздействии на другие элементы реальности. Для этого ему (полю) необходимо самому обладать энергией, что и означает его материальность. И еще оно должно каким-то образом создаваться, в зависимости от окружающей реальности. Для гравитации, которая «стала геометрией», нужен Агент, который умеет все это, но одновременно с этим описывает геометрию: как минимум требуется, чтобы он понимал, что такое параллельный перенос.

Воздействие любого поля на другие элементы мира (электрон, кирпич, Луну, свет — что угодно) выражается в каких-то изменениях их состояния, очень часто — движения. Воздействия измеряются числами, поэтому и говорят, что поле — это сколько-то чисел в каждой точке пространства, которые могут меняться с течением времени. Во всяком случае, я часто так говорил, пока мне эта фраза не разонравилась; не из-за того, что она неверная, а из-за того, что она неполная. К сказанному надо как минимум добавить, каким же образом из чисел, задающих поле, получаются изменения в состоянии каких-то пробных объектов. И правила, по которым поле создается, тоже не будут лишними. Две главные новости про Агента — отвечающее за гравитацию поле, существование которого смутно предугадывал Ньютон, — таковы:

1. У него десять (!) компонент, т.е. десять чисел в каждой точке пространства-времени. Ньютон был бы, вероятно, удивлен таким изобилием; но двести лет после публикации «Начал» определенно не были потрачены впустую, и подобные «многосоставные» сущности стали появляться естественным образом при изучении природы.

2. Столько чисел требуется как раз для того, чтобы Агент имел все полномочия, которые требуются, чтобы полностью отвечать за геометрию четырехмерного пространства-времени.

Агент замыкает взаимоотношения пространства-времени и материи в единое целое. Он *сам* определяет параллельный перенос в пространстве-времени; при этом он достаточно внимателен, чтобы ни в чем не противоречить тому, что способны сделать наши старые знакомые локальные наблюдатели (а их главное достижение — лестница Шильда). Организовав параллельный перенос, а значит, и уравнения для геодезических, Агент определяет, как полетят разбросанные по космосу гайки: именно через него теперь «пространство-время говорит материи, как ей двигаться». Одновременно он вступает в отношения с материей: когда она «говорит пространству-времени, как ему искривляться», Агенту приходится внимательно ее, материю, слушать (эти отношения — самая сложная часть истории, которая разворачивается на этой прогулке). Агент обслуживает обе части канонического тезиса в главе «прогулка 6».

Я хочу представить этого «десятирукого» персонажа, но сделать это, с одной стороны, необременительно, а с другой стороны, так, чтобы была видна его связь с пространством-временем. Приоритет я отдаю второму, из-за чего Агент может показаться несколько назойливым. Как бы то ни было, все десять его компонент перечисляются не как «первая», «вторая», …, «десятая», а в виде треугольника

$$\begin{matrix} а & д & з & к \\ & б & е & и \\ & & в & ж \\ & & & г \end{matrix},$$

где в качестве различных компонент я расставил первые десять букв русского алфавита [125]. У такой треугольной таблицы как раз десять «слотов». Но таблица с пустотами — хрупкая, ажурная конструкция, да и за расстановкой пустых мест надо отдельно следить. Удобный способ действий состоит в том, чтобы вместо треугольника всегда пользоваться квадратом

$$\begin{pmatrix} а & д & з & к \\ д & б & е & и \\ з & е & в & ж \\ к & и & ж & г \end{pmatrix},$$

в котором ровно столько же различных букв, потому что он получен из треугольника отражением. Дополнительно квадрат обычно укрепляют скобками. В таком виде мы и желаем видеть нашего Агента. Получившаяся квадратная таблица имеет размер 4 × 4 в точности по той причине, что наше пространство-время четырехмерно. Как и во всякой таблице, в этой есть столбцы и строки; каждая строка соответствует одному из измерений пространства-времени, и каждый столбец — тоже. Я буду придерживаться старомодного соответствия: последняя строка и последний столбец отвечают времени. Это, значит, буквы *г*, *ж*, *и*, *к*.

Вообще буквы в этой и других похожих ситуациях — это обозначения для чисел, причем для чисел, которые могут быть различными в различных точках пространства и в различные моменты времени. И все вместе буквы *абвгдежзик* должны каким-то образом сообщать все необходимое про геометрию.

Самая простая геометрия — у плоского пространства-времени, того самого, которое появилось у нас на прогулке 5. Ему отвечают конкретные значения всех букв *абвгдежзик*, причем *постоянные* значения, т.е., в отличие от общего случая, не зависящие от точки в пространстве и не меняющиеся со временем (что едва ли удивительно: плоское пространство-время везде и всегда одинаково). И значения эти очень незамысловатые: буквы *а, б, в* равны единице, *г* — минус единице, а остальные шесть букв — нулю. Заменяя в таблице букву *а* на единицу и так далее, получаем таблицу вполне определенного вида

$$\begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -1 \end{pmatrix}.$$

Три единицы отвечают трем направлениям в плоском пространстве, а присоединившаяся к ним минус единица — времени. Когда «десятикомпонентное гравитационное поле» имеет такой вид, *никакой гравитации нет*: пространство-время совершенно плоское. Немного странно, пожалуй, что отсутствие гравитации — это не все нули, ведь *отсутствие* большинства вещей — в широком диапазоне от денег до числа людей в комнате — обычно выражается числом нуль. Но здесь не так. Записанная таблица с тремя единицами и одной минус единицей — это самая простая, самая элементарная форма, какую только могут принимать *абвгдежзик*-таблицы в интересующем нас контексте Агента гравитационного взаимодействия.

Но что Агент в таком виде *делает* в плоском пространстве-времени?

*****

**Наследник Пифагора.** Четыре ненулевых обитателя приведенной выше таблицы напоминают, как пользоваться теоремой Пифагора [126]. *Разумеется*, все знают как и в напоминаниях не нуждаются, но в математике иногда требуется, чтобы и самые очевидные вещи были высказаны явно. Сумма квадратов катетов равна квадрату гипотенузы. Посмотрим на первые две единицы из левого верхнего угла в приведенной таблице:

$$\begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{pmatrix}.$$

Первая единица здесь говорит: «Возьмите квадрат первого катета и умножьте его на меня» — т.е. на единицу. Вторая единица говорит: «Возьмите квадрат второго катета и умножьте его на меня» — снова, получается, на единицу. Вульгарным языком то же самое выражается как «пифагоровы штаны на все стороны равны»; *равны* друг другу эти две единицы — но это только пока мы в плоском пространстве, о чем автор прибаутки, возможно, не подозревал. После взятия квадратов катетов никто специально не говорит «Сложите то, что получится», но это и так все знают:

$$1 \cdot (\text{первый катет})^2 + 1 \cdot (\text{второй катет})^2 = (\text{гипотенуза})^2.$$

*Пифагор: квадрат каждого катета умножаем на единицу*

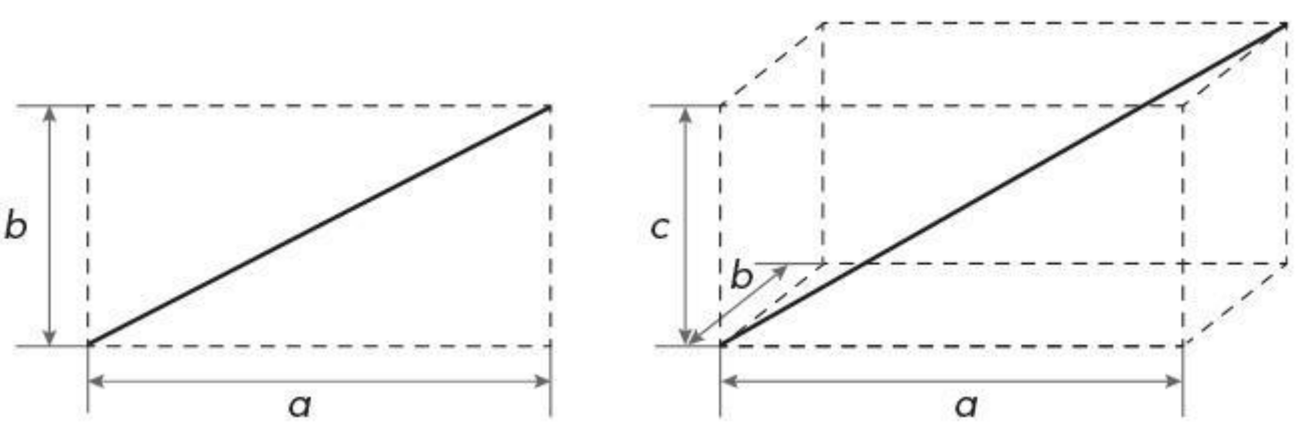



**Рис. 7.1.** *Слева:* квадрат расстояния на плоскости равен $a^2 + b^2$. *Справа:* квадрат расстояния в пространстве равен $a^2 + b^2 + c^2$. (Здесь *c не* обозначает скорость света)

Единицы, взятые из таблицы, напоминают, что квадраты катетов надо брать с коэффициентами не полтора, три или две трети, а именно единица [127]. Тогда мы в точности находим гипотенузу, а это — *расстояние* между точками, как видно на рис. 7.1 слева. Если — скажем, в городе с прямоугольной сеткой улиц — у вас нет возможности пройти по прямой, чтобы измерить расстояние между двумя точками, но вы в состоянии измерить отрезки $a$ и $b$, а угол между ними 90°, то ответ для расстояния — в теореме Пифагора.(рис. 7.1 слева). Все то же самое происходит и в трехмерном пространстве: длина отрезка на рис. 7.1 справа известна, как только известны длины $a$, $b$ и $c$ вдоль трех осей: нужно просто сложить их квадраты, т.е. вычислить $a^2 + b^2 + c^2$, что окажется равным квадрату искомой длины. Здесь тоже скрытым образом присутствуют три единицы — те самые, которые мы видим в левой верхней части приведенной выше таблицы:

$$\begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \Rightarrow 1 \cdot a^2 + 1 \cdot b^2 + 1 \cdot c^2.$$

Но далее к компании из трех единиц присоединилась минус единица. Она стоит на том месте (пересечение четвертой строки и четвертого столбца), которое отвечает времени. Если не останавливаться, а продолжать действовать по той же схеме «умножить на меня», а потом все полученное сложить, то из квадрата расстояния в пространстве придется *вычесть* квадрат промежутка времени:

$$\begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -1 \end{pmatrix} \Rightarrow 1 \cdot a^2 + 1 \cdot b^2 + 1 \cdot c^2 - 1 \cdot u^2.$$

Что это получилось?

### *Квадрат времени умножаем на минус единицу*

Не прибавляя, а вычитая квадрат буквы $u$ (промежутка времени между событиями) [128], мы получаем единственное и уникальное «расстояние», но уже не между точками в пространстве, а между событиями в (плоском) *пространстве-времени*. Я некоторое время подержу слово «расстояние» в кавычках, когда оно употребляется в этом значении. В плоском пространстве-времени имеется единственное *настоящее* «расстояние», т.е. такое, которое всегда одинаково для всех наблюдателей. Мы видели на прогулке 5, насколько могут различаться картины мира наблюдателей в зависимости от их скорости: различными могут быть их представления о длинах и промежутках времени, об одновременности, прошлом и будущем; но имеется и нечто абсолютно одинаковое для всех: «расстояние» *в пространстве-времени* между двумя событиями, которое определяется по правилу «теорема Пифагора с минусом для времени». Каждый наблюдатель измеряет, насколько два события разнесены «в ширину» (вдоль какого-то выбранного направления), насколько «в глубину» (вдоль направления под прямым углом к первому) и насколько «в высоту» (под прямым углом к двум предыдущим), а кроме того, измеряет промежуток времени между событиями. У разных наблюдателей все эти отдельные данные — три пространственных отрезка и один временной отрезок — окажутся различными. Но далее случается чудо: каждый из них смотрит на таблицу $\begin{pmatrix}1&0&0&0\\0&1&0&0\\0&0&1&0\\0&0&0&-1\end{pmatrix}$ как на руководство к действию и возводит все результаты своих измерений в квадрат, а потом складывает три первых квадрата и вычитает четвертый. У всех получится *в точности* одно и то же.

Будучи студентом инженерного факультета, Дирак (один из основоположников квантовой теории, с которым мы еще встретимся) впервые увидел формулу, содержащую три единицы и одну минус единицу, на лекции по философии, о чем вспоминает так:

> Знак минус произвел на меня огромное впечатление. Я сразу понял, что в этой формуле есть что-то новое. Причина столь сильного эффекта, может быть, крылась в том, что в школе меня очень интересовала связь пространства и времени. Немало поразмышляв над этим, я понял, что время очень похоже на любое другое измерение, и тогда мне пришло в голову, что между пространством и временем может существовать какая-то связь и что эти объекты следует рассматривать в общем четырехмерном виде.
>
> Однако единственной известной мне тогда геометрией была геометрия Евклида, и если между пространством и временем и существовало какое-нибудь соотношение, то обе эти величины должны были входить в него со знаком плюс. Нетрудно понять, что такой подход неправилен.
>
> …
>
> Теперь, приобретя новый взгляд на мир, возникший из формулы, которую написал на доске Броуд, я вскоре смог сам выводить основные уравнения специальной теории относительности [129].

Минус единица — число, более всех, конечно, «похожее» на единицу, но все же не единица — еще раз напоминает нам, что, несмотря на определенную демократию в пространстве-времени, между временным направлением и пространственными направлениями имеются неустранимые различия. Этот минус, в частности, — точная математическая причина отличия гиперболических поворотов в пространстве-времени от обычных поворотов в пространстве. Гиперболические повороты тихо преследуют нас начиная с главы 5. Причина, по которой они вообще возникают, связана именно с правилами для исчисления расстояний. При обычных поворотах сохраняются все расстояния, как мы уже упоминали, используя памятник Пушкину в качестве примера (в главе «прогулка 5»). Это *обычные* расстояния — те, которые вычисляются по самому обычному Пифагору, где одни только плюс единицы. Гиперболические же повороты сохраняют «расстояния» в пространстве-времени, которые вычисляются по «Пифагору с одним минусом». Тот факт, что, согласно рецепту с одним минусом, получается величина, не зависящая от относительного движения наблюдателей, — следствие двух основных постулатов: абсолютности скорости света и принципа относительности. И почему только я не сказал об этом на прогулке 5?

*****

**Почти произвольные правила.** В плоском пространстве-времени Агент находится в скучнейшем состоянии $\begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -1 \end{pmatrix}$ и «ничего не делает» — изображает из себя, можно сказать, «спящего агента». Но вот в неплоском (искривленном) ему есть чем заняться. Его первейшая задача — сообщать, каким окажется «расстояние» между событиями в пространстве-времени, если известны длины отрезков вдоль всех координат и времени. Двумерным примером может служить карта типа изображенной на рис. 6.5: расстояния, измеряемые на ней вдоль параллелей, надо умножать на поправочный коэффициент, чтобы получить истинное расстояние вдоль параллели на глобусе, причем этот коэффициент меняется при перемещении по карте. Близкий к этому пример показывает, что и теорему Пифагора тоже надо подправлять:

в треугольнике на рис. 6.4 все стороны равны, поэтому квадрат одной уж точно не равен сумме квадратов двух других. *Гравитация*, наличие которой есть то же самое, что отличие пространства-времени от плоского, прячется в предписаниях по вычислению «расстояний» в пространстве-времени.

### *Агент заведует расстояниями*

Вблизи планеты Земля пространство-время не плоское — из-за чего здесь так удачно удерживаются атмосфера, Луна и многое другое, включая нас самих. Это значит, что «расстояния» вычисляются несколько иначе, чем в плоском пространстве-времени, и *абвгдежзик*-таблица не может иметь в точности «плоский» вид из нулей, трех единиц и одной минус единицы. Она и не имеет. Спящий Агент начинает просыпаться: он сообщает, что квадрат длины вдоль радиуса войдет в ответ с коэффициентом не совсем единица, а 1,0000000139; а квадрат промежутка времени — с коэффициентом не совсем минус единица, а –0,99999-999861. Отличия от единицы и минус единицы исчисляются миллиардными долями. Вся гравитация планеты, требующая для своего преодоления ракету высотой в сотню метров, доверху залитую топливом, «умещается» в них [130]. Эти числа — не сантиметры, не килограммы и не секунды; это даже не доли от скорости света. Это «*голые» числа*, такие же, как пять, минус корень из двух или пи пополам, — не обремененные никакими единицами измерения физических величин. (Заодно это способ сообщить инопланетянам, насколько сильная гравитация у нас на планете; ускорение свободного падения 9,8 м/с$^2$ для этой цели не годится из-за полной неясности по поводу метра и секунды.)

В окрестности черной дыры Агент позволяет себе намного больше. Он использует все буквы из таблицы, чтобы диктовать, как исчислять «расстояния» в пространстве-времени, если известны промежутки по каждой из выбранных координат; например, промежуток времени (пр. вр.) вносит в это «расстояние» вклад *г* · (пр. вр.)$^2$, где буква *г* совсем уже не равна минус единице (а, например, имеет значение –2/3 на радиусе БУКО и –1/2 на половине этого радиуса — там, где проходит неустойчивая круговая орбита света). А когда под горизонтом черной дыры «меняются местами пространство и время», это только то и означает, что минус перебрался оттуда, где время, туда, где радиус, — Агент практически взбесился. А ведь он еще и не ограничивается расстановкой коэффициентов перед квадратами. Например, буква *к* располагается в его «кодовой таблице» в первой строке и четвертом столбце:

$$\begin{pmatrix} а & д & з & к \\ д & б & е & и \\ з & е & в & ж \\ к & и & ж & г \end{pmatrix}.$$

Четвертый столбец отвечает времени, а первая строка — выбранному «первому» направлению в пространстве. Берем промежуток времени между событиями, умножаем его на отрезок вдоль первого направления (условно — «ширину») и добавляем результат ко всему остальному с нужным коэффициентом: 2*к* · (ширина) · (пр. вр.); двойка здесь появляется потому, что буква *к*, как видно, присутствует в таблице два раза. Из-за буквы *к*, таким образом, «смешиваются» длина и промежуток времени. Аналогично и с другими буквами; к сильному удивлению Пифагора, квадрат «расстояния» в пространстве-времени включает смешанные произведения временного отрезка на пространственные. Финальный же шок для Пифагора — что из-за букв *д*, *е*, *з* смешивание возникает и *в пространстве*. Скажем, буква *д* смешивает первое и второе направления в пространстве: «ширину» надо умножить на «глубину», а потом умножить еще на 2*д* и прибавить ко всему остальному. Так в дело идут все буквы, какие есть у Агента.

Агента, который такое себе позволяет, вполне могли называть не-пифагоровым, но по историческим причинам называют не-эвклидовым, для простоты написания — неевклидовым [131].

### *Агент гравитации — метрика пространства-времени*

Десять букв *абвгдежзик* (*десять чисел, заданных в каждой точке пространства-времени*) собирательно называются метрикой, для особой торжественности — *метрикой пространства-времени*. А чтобы не путать «расстояние» между событиями в пространстве-времени с обычным расстоянием (между точками в пространстве), ему дали отдельное имя: *интервал*. Метрика (эти самые *абвгдежзик*) задает правило, по которому вычисляется интервал в пространстве-времени. Агент, таким образом, показал свое настоящее лицо: это метрика пространства-времени. Гравитационное поле, другими словами, — это метрика пространства-времени. В плоском пространстве-времени метрика имеет предельно скучный вид из трех единиц, одной минус единицы и нулей (и называется плоской), из-за чего интервал и определяется «по Пифагору с одним минусом» (и никакой гравитации в действительности нет). В искривленном же пространстве-времени все десять букв *абвгдежзик* из метрики могут меняться от точки к точке в пространстве и от одного момента времени к другому, поэтому рецепт для вычисления интервала при заданной метрике пригоден не для любых двух событий в пространстве-времени, а для *очень близких*. Настолько близких, что при путешествии между ними не успевает сколько-нибудь серьезно измениться значение ни одной из букв *абвгдежзик* (этому «не успевает» можно придать строгий математический смысл).

На предыдущей прогулке, однако, мы обращались с искривленным пространством-временем, широко пользуясь параллельным переносом. Агент, желающий распоряжаться всем самостоятельно, должен уметь строить этот параллельный перенос. Тут-то и оказывается, что определить параллельный перенос ничего не стоит тому, кто знает все расстояния (к которым мы сейчас отнесем и интервал, чтобы каждый раз не добавлять «и интервал») [132]. Дело в том, что если известны все расстояния, то известны и все углы, просто потому, что из знания всех сторон в треугольнике следует знание всех его углов. (Это работает, с минимальными поправками, и в том случае, когда вместо расстояния в пространстве фигурирует интервал в пространстве-времени.) Поэтому указания Агента по поводу параллельного переноса звучат обманчиво просто: переносите вдоль каждой кривой в пространстве-времени так, чтобы сохранялись все длины и все углы. Этим полностью определяются правила параллельного переноса вдоль любой кривой.

Но в требовании «чтобы сохранялись» есть скрытое лукавство: сами буквы *абвгдежзик*, которые используются при вычислении длин и углов, меняются от точки к точке! Стрелке, которую переносят туда, где, скажем, поменялось значение буквы *ж*, приходится как-то это «учитывать», чтобы все длины и углы остались теми же. *Очень* неформально говоря, при параллельном переносе стрелок вдоль кривой нечто должно происходить с самими стрелками — нечто такое, что в точности компенсирует изменение букв *абвгдежзик*. (В плоском пространстве или пространстве-времени ни одна из *абвгдежзик* не меняется, и стрелкам не нужно никак стараться, они остаются при параллельном переносе «такими же».)

Агент, представляющий собой метрику, оттеснил на второй план услужливых локальных наблюдателей, всегда готовых строить лестницы Шильда. Он обходится без посторонней помощи. Его инструмент — это правило для вычисления интервала в каждой точке пространства-времени, но это правило позволяет определить и параллельный перенос, и поэтому от него зависит, какой получится геометрия пространства-времени. Но это если метрика задана. А что же определяет саму метрику? Что, другими словами, создает гравитационное поле? *Материя*.

*****

**Десять голосов материи.** Материю узнают по ее свойствам. Самое неотъемлемое из них — энергия; существовать — значит обладать энергией. Движение привносит разнообразие в свойства материи, добавляя к ним количество движения. В трехмерном пространстве количество движения — это *три* числа, потому что иначе не определить направление движения, а оно существенно для всего, что с движущейся материей может произойти. Энергия и количество движения тоже хотят собраться в таблицу; а я хочу обойтись на этот раз без русских букв (оставим их для геометрии). Энергия $E$ и три компоненты количества движения $P$, $Q$, $R$ желают вступить в союз и проживать совместно в такой табличной конфигурации:

$$\begin{pmatrix} & & & P \\ & & & Q \\ & & & R \\ P & Q & R & E \end{pmatrix}.$$

Из-за места, где располагается энергия, угадываются ее специальные отношения с временем, но нам сейчас не до этого: в схеме имеются незаселенные позиции. Минуту, и все исправим.

*«Толкаться»* не обязательно означает «в результате начать двигаться». В элементе «скрам» в регби (рис. 7.2) давления больше, чем движения. Поскольку давление можно прикладывать в любом направлении, у него тоже три компоненты, хотя само по себе давление и не есть движение. Для трех компонент давления $p$, $q$, $r$ в выбранных трех направлениях естественным образом нашлись места в таблице:

$$\begin{pmatrix} p & & & P \\ & q & & Q \\ & & r & R \\ P & Q & R & E \end{pmatrix}.$$

**Рис. 7.2.** Давление

И наконец, кроме как давить, можно еще и «тянуть в стороны»: при контакте шершавых поверхностей тянуть за одну из них *вдоль* — не то же самое, что давить, прижимая одну к другой. В зависимости от ориентации здесь шесть базовых возможностей (тянуть вдоль направления север — юг в конфигурации, когда прижимать надо было бы вниз —

вверх; и т.д.). Шесть чисел, которые такое описывают, называются касательными натяжениями; в действительности они попарно совпадают, и мы дозаселяем таблицу тремя базисными касательными натяжениями *s*, *t*, *u*:

$$\begin{pmatrix} p & s & u & P \\ s & q & t & Q \\ u & t & r & R \\ P & Q & R & E \end{pmatrix}.$$

Получилась таблица с именем, которое отвечает на вопрос «таблица чего?»: таблица энергии-движения-сил [133]. Энергии — потому что энергия *E* присутствует здесь самым непосредственным образом; движения — потому что сюда входит количество движения (*P*, *Q*, *R*); а сил — потому что давления и касательные натяжения представляют собой силы, только отнесенные к единице площади. Кстати, материю мы мыслим как-то распределенной в пространстве, поэтому энергию и количество движения надо тоже отнести к единице объема — другими словами, под буквами *P*, *Q*, *R* и *E* надо понимать *плотности* количества движения и энергии (и еще один технический момент состоит в том, что плотность количества движения надо дополнительно умножить на скорость света *c*, чтобы можно было оперировать ею наравне с энергией).

Таблица энергии-движения-сил имеет формат 4 × 4, как и метрика пространства-времени (не случайно, но на соблазн обсудить еще и это я не поддамся). И действующих лиц там тоже десять. Они — энергия, количество движения и силы — и создают кривизну. Уилеру, который все эти подробности опустил, а сказал просто «материя», вполне можно извинить эту художественную вольность; фраза с подробностями едва ли прозвучала бы так же эффектно.

Закон природы, к которому мы приближаемся и который хотим сформулировать наконец без слова «говорит», имеет структуру

$$\begin{pmatrix} \text{представитель геометрии} \\ \text{пространства-времени} \end{pmatrix} = (\text{представитель материи}),$$

надо только разобраться с тем, каких представителей отправят сюда обе стороны. Когда разберемся, окажется, что мы записали уравнения Эйнштейна. Они выражают важный факт: материя и геометрия пространства-времени взаимозависимы. Вообще-то мы представляем себе материю как нечто отдельное от пространства, нечто такое, что *находится* в нем и может там двигаться. Но закон природы, к которому мы приближаемся, говорит, что материя существует и движется не на неизменном «фоне», а сама влияет на пространство и время, в котором живет. Пространство-время, другими словами, — *не* статичная арена, на которой происходят различные представления. Нет, труппа перестраивает под себя не только декорации, но и саму архитектурную основу, которая в результате становится частью шоу.

*Материя формирует пространство-время, в котором существует*

Чтобы договариваться с пространством-временем, материя делегирует лучшее, что у нее есть, — таблицу энергии-движения-сил, и в уравнении появляется вполне конкретная правая часть:

$$\begin{pmatrix}\text{представитель геометрии}\\ \text{пространства-времени}\end{pmatrix} = \frac{8\pi G}{c^4}\begin{pmatrix} p & s & u & P \\ s & q & t & Q \\ u & t & r & R \\ P & Q & R & E \end{pmatrix},$$

и это уже не лозунг, а заготовка для фундаментального закона природы. Слегка забегая вперед, я сразу записал в правой части именно такой коэффициент, который требуется в окончательной формулировке; буква $G$ здесь — это в точности $G$ из закона тяготения Ньютона (1.1), и называется она гравитационной постоянной, или ньютоновой постоянной, или ньютоновой гравитационной постоянной. Про представителя материи больше добавить нечего. Но как быть пространству-времени? Если материя в правой части равенства ведет разговор на языке таблиц $4 \times 4$, то и в левой части должна быть таблица такого же формата, только сделанная из «геометрии». Кандидат есть: *абвгдежзик*-таблица, она же метрика, как раз $4 \times 4$.

Но этот кандидат решительно не подходит.

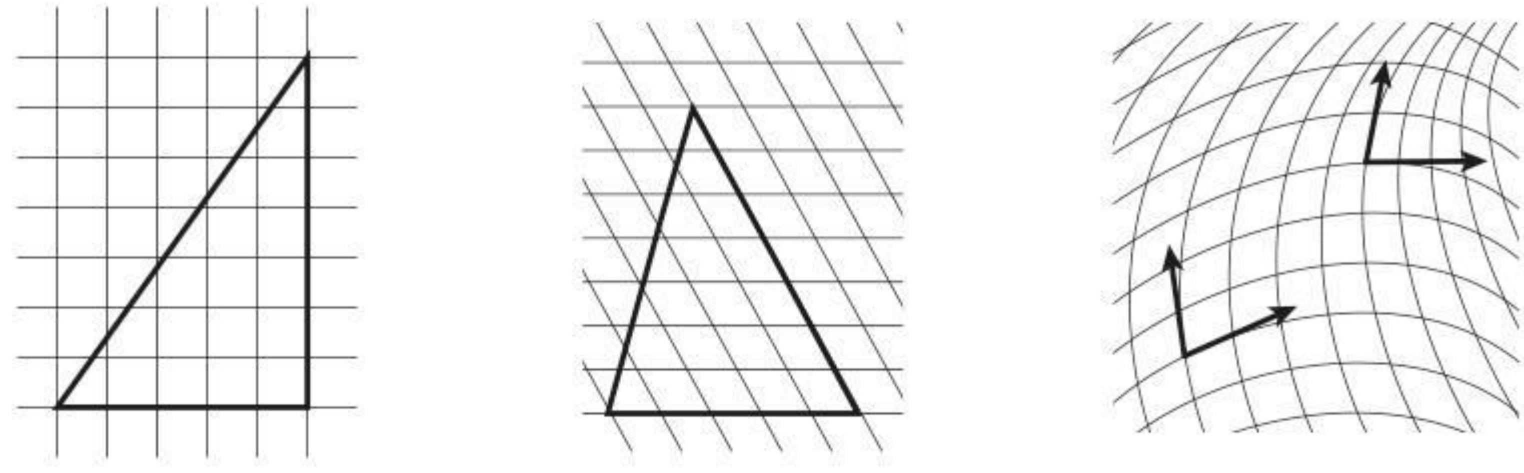


**Рис. 7.3.** *Слева:* квадрат расстояния на плоскости равен $a^2 + b^2$, если сетка равномерная и прямоугольная. Расстояние $c$ можно тогда узнать, считая длины $a$ и $b$ по клеткам, в данном случае $\sqrt{5^2+7^2}$ *В центре*: из-за того, что сетка скошена, квадрат расстояния равен $a^2 + b^2 - 0{,}96ab$. *Справа:* в криволинейной сетке само определение треугольников и параллелограммов требует уточнения

*****

**Двадцать оттенков кривизны.** Может так случиться — и случается, — что Агент лишь имитирует непифагоровость/неевклидовость за счет путаного определения «направлений» в пространстве или пространстве-времени. Даже плоскость можно разграфить не в прямоугольную клетку, а косо, как на рис. 7.3 в центре, где квадрат расстояния вычисляется исходя из длин двух отрезков вдоль координатных осей не по Пифагору, а как $c^2 = a^2 + b^2 - 0{,}96ab$ (т.е. число *д* из *абвгдежзик*-таблицы в данном случае равно –0,48). А если буквы *абвгдежзик* меняются от точки к точке, то картина выглядит не просто скошенно, а буквально криво, как на рис. 7.3 справа, и рецепт вычисления расстояний становится особенно сложным. Спрашивается, в каких случаях все-таки можно выпрямить сетку координатных линий, чтобы вернуть расстоянию его пифагоров вид? Это получится не для всех поверхностей, изображенных на рис. 7.4; а вообще можно ли, разглядывая *абвгдежзик*-таблицы, узнать, к какой из этих поверхностей они относятся? На рис. 7.4 по необходимости изображены двумерные поверхности, а в четырехмерии возможностей «скривиться» неизмеримо больше, и разобраться в них наивными средствами совсем не просто. Пытаться в лоб найти простое описание вместо сложного — не всегда хороший план: что, спрашивается, мы должны будем заключить, если после двух недель поисков мы так ничего и не найдем? Желаемое выпрямление существует, но сложно устроено или его вовсе нет? По счастью, имеется метод прямой обработки данных из *абвгдежзик*-таблиц, позволяющий сразу увидеть, есть ли неустранимая причина, по которой квадраты расстояний вычисляются не по Пифагору, или же все усложнения только кажущиеся из-за искусственного выбора скособоченной сетки. Этот метод состоит просто-напросто в *построении кривизны*. Отлично работает и в пространстве, и в пространстве-времени.

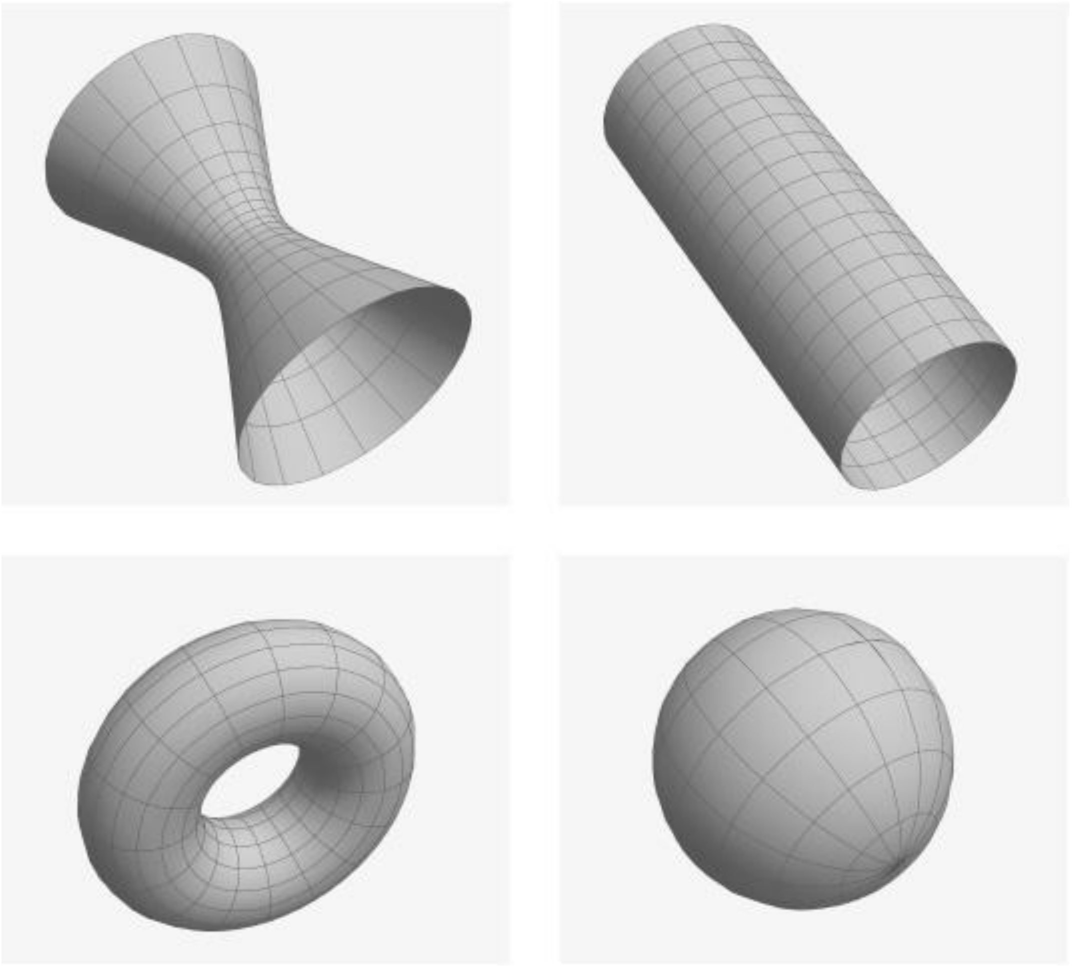


**Рис. 7.4.** Искривленные и неискривленные поверхности (слева направо и сверху вниз): гиперболоид, цилиндр, тор, сфера. Цилиндр не имеет кривизны; тор выглядит искривленным при изображении в трехмерном пространстве, но математически, «сам по себе», он также имеет нулевую кривизну. Сфера и гиперболоид — искривленные поверхности. Цилиндр и гиперболоид — «открытые» (незамкнутые) поверхности, а сфера и тор — замкнутые

Кривизна дает критерий, чтобы решить, плоское пространство-время или нет. Если кривизна не равна нулю, то, значит, нельзя выбрать «прямую» координатную сетку и буквы *абвгдежзик* везде сделать нулями и (минус) единицами, как в плоском пространстве-времени. А если равна нулю, то можно, как бы Агент ни пытался нас запутать. Вычисление кривизны — вполне «машинная» обработка *абвгдежзик*-таблиц, которую и в самом деле можно поручить компьютеру, обученному символьным вычислениям. Сначала по имеющейся метрике строятся правила параллельного переноса, а из них, как мы видели на прогулке 6, определяется кривизна. В итоге получается математическое выражение для кривизны в зависимости от букв *абвгдежзик*, но не просто от их значений в данной точке пространства-времени, а еще и от того, как быстро эти значения меняются при переходе к соседним точкам [134], и от того, как быстро меняются сами эти темпы изменения. Это слегка пугающее изобилие, и оно организуется в таблицу формата 4 × 4 × 4 × 4, с которой мы уже встречались в главе «прогулка 6». Однако независимых данных в ней существенно меньше, чем 4 · 4 · 4 · 4 = 256, потому что таблица кривизны, построенная из метрики, — это еще и «калейдоскоп».

$$
\begin{pmatrix}
\begin{matrix} 0&0&0&0\\ 0&0&0&0\\ 0&0&0&0\\ 0&0&0&0 \end{matrix} &
\begin{matrix} 0&А&Б&В\\ -А&0&Г&Д\\ -Б&-Г&0&Е\\ -В&-Д&-Е&0 \end{matrix} &
\begin{matrix} 0&Б&Ж&З\\ -Б&0&И&К\\ -Ж&-И&0&Л\\ -З&-К&-Л&0 \end{matrix} &
\begin{matrix} 0&В&З&М\\ -В&0&К-Е&Н\\ -З&Е-К&0&П\\ -М&-Н&-П&0 \end{matrix} \\[2ex]
\begin{matrix} 0&-А&-Б&-В\\ А&0&-Г&-Д\\ Б&Г&0&-Е\\ В&Д&Е&0 \end{matrix} &
\begin{matrix} 0&0&0&0\\ 0&0&0&0\\ 0&0&0&0\\ 0&0&0&0 \end{matrix} &
\begin{matrix} 0&Г&И&К-Е\\ -Г&0&Р&С\\ -И&-Р&0&Т\\ Е-К&-С&-Т&0 \end{matrix} &
\begin{matrix} 0&Д&К&Н\\ -Д&0&С&У\\ -К&-С&0&Ф\\ -Н&-У&-Ф&0 \end{matrix} \\[2ex]
\begin{matrix} 0&-Б&-Ж&-З\\ Б&0&-И&-К\\ Ж&И&0&-Л\\ З&К&Л&0 \end{matrix} &
\begin{matrix} 0&-Г&-И&Е-К\\ Г&0&-Р&-С\\ И&Р&0&-Т\\ К-Е&С&Т&0 \end{matrix} &
\begin{matrix} 0&0&0&0\\ 0&0&0&0\\ 0&0&0&0\\ 0&0&0&0 \end{matrix} &
\begin{matrix} 0&Е&Л&П\\ -Е&0&Т&Ф\\ -Л&-Т&0&Х\\ -П&-Ф&-Х&0 \end{matrix} \\[2ex]
\begin{matrix} 0&-В&-З&-М\\ В&0&Е-К&-Н\\ З&К-Е&0&-П\\ М&Н&П&0 \end{matrix} &
\begin{matrix} 0&-Д&-К&-Н\\ Д&0&-С&-У\\ К&С&0&-Ф\\ Н&У&Ф&0 \end{matrix} &
\begin{matrix} 0&-Е&-Л&-П\\ Е&0&-Т&-Ф\\ Л&Т&0&-Х\\ П&Ф&Х&0 \end{matrix} &
\begin{matrix} 0&0&0&0\\ 0&0&0&0\\ 0&0&0&0\\ 0&0&0&0 \end{matrix}
\end{pmatrix}
$$

**Рис. 7.5.** Кривизна — таблица 4 × 4, составленная из таблиц 4 × 4. Двадцать компонент кривизны обозначены заглавными буквами русского алфавита; они распределяются по 144 ячейкам, не содержащим заведомых нулей. Каждая из этих букв — сложное выражение из букв *абвгдежзик*

Вообще, калейдоскоп — это устройство для создания узоров путем кратного отражения сравнительно небольшого числа элементов. Отражения уже появились в структуре *абвгдежзик*-таблицы; в кривизне же отражения поинтереснее, потому что 256 имеющихся ячеек содержат лишь 20 различных элементов, которые вынуждены повторяться, иногда с небольшими вариациями. Работает это так: 112 ячеек всегда заняты нулями (ну и тем лучше!), а по оставшимся 144 ячейкам эти 20 элементов распределены или буквально в виде повторов, или в виде повторов со знаком минус, или в виде разности двух элементов. Это и проиллюстрировано на рис. 7.5. Таблица 4 × 4 × 4 × 4 записана там приемлемым для печати способом в формате «большая таблица 4 × 4, состоящая из таблиц 4 × 4». Следуя порочной практике этой прогулки, я обозначил 20 независимых компонент кривизны заглавными буквами из начала — и по необходимости середины — русского алфавита, пропустив только «*О*», чтобы она не путалась с нулем. Правила, по которым одни и те же элементы повторяются или сами по себе, или со знаком минус, были бы более наглядными, если всю таблицу разглядывать не как таблицу таблиц, а как четырехмерный куб, но это, увы, не в наших силах. Каждая буква *А*, *Б*, *В*, … — это замысловатое выражение, составленное из букв *а*, *б*, *в*, …, из темпов их изменения по разным направлениям и из темпов изменения темпов изменения. Вникать в это мы не собираемся, цель рисунка — проиллюстрировать, что в четырехмерном пространстве-времени у кривизны 20 независимых компонент: 20 независимых способов организовать сжатия, растяжения и скручивания, которые в принципе могут выпасть на долю каких-либо планет, космических кораблей или муравьев.

А кроме того, кривизна — это еще и мостик, помогающий сопоставить различные картины мира, измеряя их сложность более объективно, чем это получается непосредственно из вида метрики. Когда мы говорим о том, как замедляется время вблизи черной дыры, или замечаем, что под горизонтом пространство и время поменялись местами, — мы смотрим на то, как устроены метрики (*абвгдежзик*-таблицы). Но разные наблюдатели могут записать их многими разными способами для одной и той же черной дыры: согласно таблицам, которыми оперируют болельщики, бросившие путешественника в черную дыру, он навсегда зависает над горизонтом, однако его собственная картина мира выражена в таких 4 × 4-таблицах, согласно которым время жизни получается не очень долгим. Если бы мы внезапно стали обладателями двух этих картин мира, представленных соответствующими *абвгдежзик*-таблицами, то догадаться о том, что они описывают одно и то же с двух сильно различных точек зрения, было бы крайне непросто (из-за этого, кстати, понимание сущности происходящего на горизонте черной дыры сформировалось далеко не сразу). Здесь-то и выручает кривизна: «остановка времени» на горизонте, с точки зрения болельщика, — это просто результат плохого поведения буквы *г* в его *абвгдежзик*-таблице; но построенная из всех этих букв кривизна ведет себя на горизонте хорошо, а это означает, что можно найти такие координаты — такую «точку зрения», — в терминах которых прохождение через горизонт происходит с «ровным» течением времени (это и ощущает свободно падающий путешественник).

И конечно, кривизна позволяет контролировать Агента, что бывает очень нелишним: если даже буквы *а*, *б*, *в*, … выглядят устрашающе, но машина по производству кривизны говорит, что все буквы *А*, *Б*, *В*, … равны нулю, то, значит, кто-то плохо выбрал координаты в пространстве-времени, и только из-за этого и возникли какие-то нестандартные *абвгдежзик*. На самом же деле пространство-время плоское, нет никаких препятствий, чтобы выбрать координаты, в которых все *абвгдежзик* имеют «плоский» вид из нулей, единиц и минус единицы, а путаное выражение для интервала — просто глупость Агента. Но если *хоть одна* из букв *А*, *Б*, *В*, … *не*нулевая, то препятствия ко всему этому есть; и есть гравитация.

После всего хорошего, сказанного про кривизну, мы можем вернуться к вопросу о том, к кому же обращается материя, когда говорит пространству-времени, как ему искривляться: она обращается к кривизне.

Закон природы, который мы вот-вот сможем сформулировать, максимально близок к высказыванию, что в каждой точке пространства и в каждый момент времени таблица кривизны должна быть равна имеющейся там таблице энергии-движения-сил (умноженной на коэффициент, который я уже выписал выше, слегка опережая события). К сожалению, буквально такого быть не может, потому что таблица кривизны имеет формат 4 × 4 × 4 × 4 («таблица таблиц»), а таблица энергии-движения-сил — формат 4 × 4 («просто таблица»). Но из таблицы таблиц *и метрики* можно сделать просто-таблицу, примерно как «более грубый калейдоскоп» из «менее грубого» — соединяя по несколько кусков орнамента в один по определенным правилам [135]. Двадцать компонент кривизны *А*, *Б*, *В*, … после этого размещаются, в разных комбинациях, в таблице нужного нам формата 4 × 4. В результате получаются уравнения, связывающие материю и геометрию, — уравнения Эйнштейна.

*****

**Уравнения Эйнштейна.** Путь Эйнштейна к уравнениям, связывающим материю и гравитацию, был долгим, сложным и извилистым, если не сказать путаным. В течение нескольких лет Эйнштейн блуждал вокруг окончательного ответа, несколькими способами (итерационно, как сказали бы сейчас) пытаясь воплотить физическую интуицию в математике искривленного пространства-времени — с ее изобилием возможностей, среди которых непросто найти дорогу к «правильному», пока само это «правильное» неизвестно. Изящество возникших в конце концов уравнений таково, что напрашивается сравнение с известным руководством по созданию гениальной скульптуры: отсечь от глыбы мрамора все лишнее. «Скульптура» стала приобретать почти окончательные очертания осенью 1915 г.

В октябре Эйнштейн думал, что закон природы, обобщающий закон всеобщего тяготения, состоит в том, что 4 × 4-таблица кривизны, полученная «огрублением» исходной 4 × 4 × 4 × 4-таблицы, должна равняться таблице энергии-движения-сил, взятой с подходящим коэффициентом. Записав это равенство и относясь к нему как к уравнениям для метрики, Эйнштейн проверил, как они работают, найдя их приближенное решение для задачи Кеплера — для одной планеты, обращающейся вокруг центра притяжения, в данном случае не слишком близко и по не слишком сильно вытянутому эллипсу. Эллипс получился медленно поворачивающимся, а подстановка в ответ для скорости поворота численных данных для Меркурия дала в точности те самые, никак иначе не объяснимые, 43 угловые секунды в столетие. «Несколько дней вне себя от восторга» не помешали, однако, Эйнштейну вскоре заметить явление, которое не сказывалось на использованном приближенном решении, но составляло проблему в общем случае: уравнения «мешали» законам сохранения. Законы сохранения (скажем, энергии и количества движения) имеют свое выражение в виде математических условий, которым должна подчиняться таблица энергии-движения-сил, но эти условия входили в конфликт с требованием, чтобы она же была пропорциональна 4 × 4-таблице кривизны. Это, впрочем, были последние трудности на пути построения теории гравитации, и их удалось быстро (к 25 ноября) преодолеть за счет небольшого улучшения левой части уравнений — практически косметической дорасфасовки компонент кривизны в таблице 4 × 4. В результате получается несколько другая — «Специальная» — упаковка всех двадцати компонент кривизны в таблицу 4 × 4. Никаких конфликтов больше не возникает, если потребовать, чтобы она, эта Специальная упаковка кривизны, совпадала с таблицей энергии-движения-сил с точностью до коэффициента:

$$\begin{pmatrix}\text{Специальная упаковка кривизны}\\ 4\times4\end{pmatrix} = \frac{8\pi G}{c^4}\begin{pmatrix}\text{энергия-движение-силы}\\ 4\times4\end{pmatrix}.$$

Правая часть здесь в точности та же, что и ранее, просто таблица энергии-движения-сил не выписана полностью. Уравнение такого вида означает, что каждый элемент таблицы в левой части должен совпадать с тем элементом из правой части, который стоит в той же строке и том же столбце; поэтому уравнений не одно, а несколько — десять. Они и называются уравнениями Эйнштейна [136]. Обе части, конечно, зависят от точки в пространстве-времени; как мы говорили на прогулке 1, уравнения в таком случае оказываются уравнениями на функции — на возможную зависимость входящих сюда букв (в первую очередь *абвгдежзик*) *от точки в пространстве и от момента времени.*

Если — для краткости и буквально на секунду — разрешить себе называть все, что располагается в правой части уравнений Эйнштейна, просто энергией, а все, что в левой части, — все-таки гравитацией (не отказываясь, разумеется, от того, что это кривизна, т.е. геометрия пространства-времени), то можно сказать, что гравитация — это отклик пространства-времени на содержащуюся в нем энергию. А как это связано с тем, что было известно про гравитацию Ньютону? Подробнее об этом говорится в добавлениях к этой прогулке, а в кратчайшем изложении связь такова. Самый незамысловатый способ присутствия энергии — масса (рискуя быть надоедливым: умноженная на $c^2$). Поэтому, согласно уравнениям Эйнштейна, геометрия пространства-времени откликается на присутствие массы. Пока получающаяся кривизна невелика, а все изменения достаточно медленные, геодезические оказываются такими, что тела в пространстве ведут себя так, как если бы в них вцепилась ньютонова гравитация в полном соответствии с (1.1). По мере увеличения кривизны и скоростей это описание делается все более неточным, даже если таблица энергии-движения-сил представлена только массой; в точное описание, кроме того, вносят вклад и остальные обитатели этой таблицы.

Связь материи и геометрии, выражаемая уравнениями Эйнштейна, открывает огромное поле возможностей для управления мирами. Можно взять какое-то распределение материи и посмотреть, какое пространство-время оно для себя создаст. Делают это буквально так: выбирают таблицу энергии-движения-сил, руководствуясь соображениями о той или иной системе (например, Вселенной) — о том, как в ней распределены энергия, количество движения, давления и натяжения. После этого предлагается решить уравнения Эйнштейна — т.е. найти такие *абвгдежзик*, что построенная из них кривизна, уложенная в Специальную упаковку, обеспечит выполнение всех десяти уравнений. Это не очень просто, потому что кривизна сложно выражается через *абвгдежзик*. Часто, руководствуясь соображениями о «примерно возможной» реальности, мы придумываем некоторый общий вид распределения материи с определенными свойствами, оставляя какие-то подробности этого распределения нефиксированными, чтобы их доопределить из уравнений. Хорошие уравнения при этом подталкивают в сторону правильного нового знания, и с уравнениями Эйнштейна именно так и случилось. Они открыли нам расширяющуюся Вселенную, черные дыры и гравитационные волны.

*****

**Конструктор вселенных.** Пыль, распределенная в пространстве с некоторой плотностью, имеет вполне конкретную таблицу энергии-движения-сил. Оказалось особенно интересно узнать, какой может быть геометрия пространства-времени, если в нем содержится только пыль.

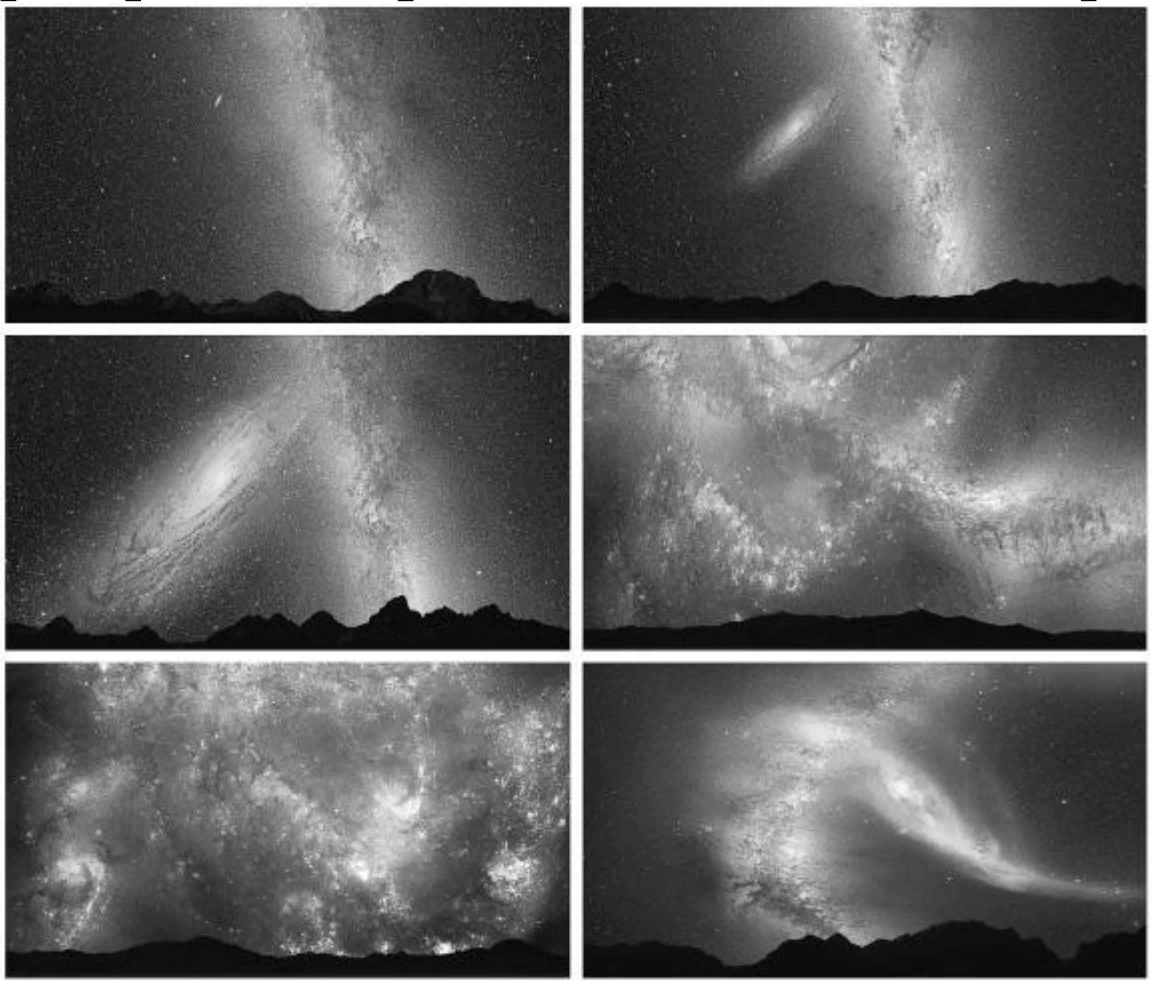


**Рис. 7.6.** Этапы столкновения и смешивания Млечного Пути и Андромеды: ожидаемый вид ночного неба с Земли

*Пыль*?

Обыденные слова, сделавшиеся научными терминами, начинают в новом качестве выражать нечто вполне определенное, но часто далекое от первоначального житейского смысла. Пыль в данном случае включает в себя межзвездный газ, собственно межзвездную *пыль*, а также (!) звезды и галактики заодно с темной материей. Слово «пыль» используется просто потому, что все это вещество крайне слабо сопротивляется своему сжатию на «самых космических» масштабах: сближающимся галактикам не становится тесно настолько, чтобы они начали расталкиваться; наоборот, они порой «смешиваются» (рис. 7.6). Технически пыль — это распределение материи, не создающее давления (кстати, если бы бытовая пыль сопротивлялась уже небольшому сжатию, конструкция пылесосов определенно была бы иной); всю «пыль» во Вселенной называют еще холодной материей, что включает и холодную темную материю [137].

В уравнения Эйнштейна надо внедрить информацию о том, *как* вся эта пыль наполняет Вселенную — какая у нее таблица энергии-движения-сил во всех точках пространства. Главный предмет нашего интереса тогда — что происходит с пространством и не чужой нам пылью с течением времени. Глядя в телескоп, мы вообще-то видим, что вещество в космосе собрано в комки. За пределами нашей планеты — относительная пустота; в Солнечной системе много пустоты, но есть и разные другие комки (начиная с самого Солнца); по пути к ближайшим звездам — еще больше пустоты; преодолевая ее и добираясь до все более далеких звезд, мы обнаруживаем скопление вещества размером около 100 000 световых лет в поперечнике — галактику Млечный Путь, вокруг которой — еще больше пустоты (вещества между галактиками в общей сложности много, но это потому, что расстояния большие; плотность же его крайне мала). Еще дальше обнаруживается Местная группа галактик с характерным размером 3 000 000 световых лет, и скопление Девы (30 000 000 световых лет), и еще скопления размерами до 300 000 000 световых лет, и еще пустоты. *Но это все сейчас неважно*, потому что на еще больших масштабах, где галактики выглядят как мельчайшие частицы этой пыли, Вселенная заполнена веществом примерно равномерно, а кроме того, одинакова по всем направлениям [138]. В результате в таблице энергии-движения-сил остается только одно число — *средняя* плотность вещества ρ, она же, с точностью до умножения на $c^2$, — энергия на единицу объема $\begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \rho \end{pmatrix}$. На месте давления и касательных натяжений стоят нули именно потому, что «пыль»; на месте количества движения тоже нули, потому что в наблюдаемой Вселенной нет сколько-нибудь больших частей, движущихся относительно других ее частей со скоростями, сравнимыми со скоростью света.

Правая часть уравнений Эйнштейна, представляющая материю, получилась совсем простая: там одно число на все, что есть во Вселенной. Теперь уравнения должны сказать, в какой геометрии (в каком пространстве-времени) эта материя способна жить. Уравнения Эйнштейна оказываются средством необычайной силы, потому что, пользуясь ими, мы всерьез намерены узнать про что-то вроде «формы Вселенной», а также про то, что со Вселенной было раньше и что будет в будущем. Проблема с тем, что при этом получится, *есть*, потому что пыль сама себя притягивает. Возникает очень насущный вопрос: почему же она не обрушивается сама на себя? Почему под действием собственного притяжения она не собирается в *один* комок?

Предполагаемая «одинаковость» пыли по всей Вселенной требует, чтобы и пространство было одинаковым во всех точках и по всем направлениям. Для выражения этого нужно специальным образом настроить Агента: из всех букв *абвгдежзик* «живой» остается только одна, и метрика пространства-времени для Вселенной в целом принимает вид $\begin{pmatrix} a & 0 & 0 & 0 \\ 0 & a & 0 & 0 \\ 0 & 0 & a & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -1 \end{pmatrix}$. За все происходящее с пространством-временем здесь отвечает одна-единственная буква *а*, про которую требуется выяснить, как она зависит от времени [139].

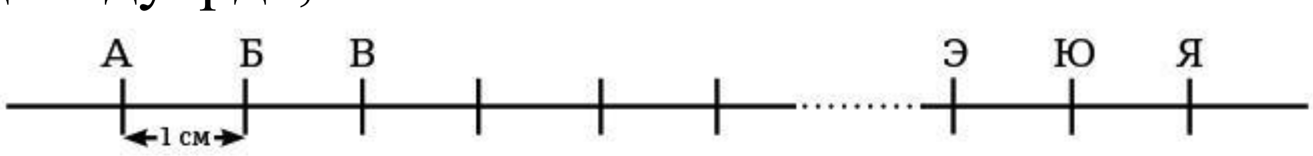
Эйнштейн задался проблемой «построения Вселенной» вскоре после создания своих уравнений — после того, как объяснил с их помощью поворот орбиты Меркурия, но до того, как «проснулся знаменитым» после измерения угла отклонения света Солнцем. Научные представления о Вселенной в тот момент включали в себя идею, что на большом масштабе она не только одинакова в пространстве, но и неизменна во времени. Однако только что придуманные им уравнения не хотели возвращать такого решения, тем самым вроде бы противореча реальности, и их автор оказался перед сложным выбором. Желая получить из своих уравнений неизменную Вселенную, Эйнштейн (вот уж действительно на правах автора) воспользовался тем, что его уравнения допускают одну модификацию: в левую, геометрическую часть *можно* добавить еще одно слагаемое, причем не сложно устроенное, как те, что там уже есть, а просто метрику, умноженную на произвольное число Λ (лямбда; в русском алфавите эта же буква стала называться «эль», но, глядя на лямбду, об этом никогда не вспоминают). Слово «можно» здесь — это практически научный термин: оно означает, что добавление слагаемого с лямбдой не нарушает главные принципы, на основе которых гравитация описывается как геометрия; это дополнительное слагаемое ничем не запрещено, но его «вес» в уравнениях — значение буквы Λ — ничем не фиксируется.

Другие уравнения — другие решения. В начале 1917 г. Эйнштейн нашел желаемое решение модифицированных уравнений, говорящее, что «пылевая» Вселенная неизменна во времени. Успех? А как с поворотом орбиты Меркурия — не нарушится ли тут блестящее согласие теории и эксперимента? Оказалось, что если Λ достаточно мала, то влияние ее на Меркурий практически незаметно — а для поддержания неизменности Вселенной и такой будет достаточно. Придется тогда признать, что в списке констант, который прилагается к нашей Вселенной, значится и еще одна, Λ (кстати, имеющая смысл энергии на единицу объема). Что есть, то есть, родную вселенную не выбирают. (Возникнув в таких рассуждениях, эта константа получила название космологической постоянной.)

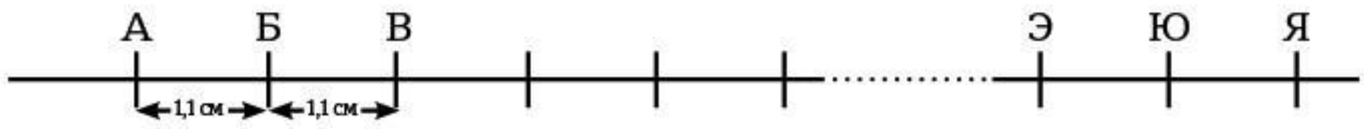
Стремление Эйнштейна убедиться, что его уравнения согласуются с имеющейся на данный момент научной картиной мира, более чем законно: не это ли называется проверкой теории наблюдениями? Но в действительности статические (не меняющиеся со временем) решения искать было незачем; и модифицировать уравнения тоже было не обязательно. Уравнения «знали больше, чем их создатель»: они были готовы описывать Вселенную, которая *меняется* со временем, и она такой и оказалась. Теоретически возможность существования нестатичных «пылевых» вселенных из уравнений Эйнштейна извлек Фридман в 1922 г. Экспериментальный факт, что Вселенная не статична, вошел в науку в связи с наблюдениями и выводами из них, которые в 1929 г. сделал Хаббл: галактики удаляются от нас с тем большими скоростями, чем дальше они находятся (несколько ранее, в 1927-м, к сходным заключениям пришел Леметр: он вывел заново решения Фридмана, видимо, ему неизвестные, причем с целью именно объяснить скорости удаления галактик). А в 1930 г. Эддингтон установил, что статическое решение, полученное Эйнштейном с применением буквы лямбда, неустойчиво: материя там или схлопнется в точку, или разлетится неопределенно далеко в результате малейшего возмущения в ее распределении. Уравнения, одним словом, *совсем* не хотели неизменную во времени Вселенную.

Фридман исходил из тех же предположений, что Вселенная одинакова везде и по всем направлениям, но, в отличие от Эйнштейна, не был связан желанием получить решение определенного типа. В 1922 г. он нашел решение, которое Эйнштейн пропустил (не заметил!) — вероятно, из-за своей нацеленности на получение неизменной Вселенной. Согласно решению Фридмана, в заполненном пылью пространстве «все движется», но не совсем привычным образом: с течением времени все удаляется от всего *или* все приближается ко всему просто из-за того, что во времени изменяется метрика — та самая буква $a$, которая только и осталась от всей *абвгдежзик*-таблицы. Роль ее (этой $a$) в том, что все пространственные расстояния на нее умножаются; когда она растет со временем, все расстояния увеличиваются с течением времени, а когда убывает — уменьшаются. Возрастает же она или убывает и в каком темпе, как раз и определяется уравнениями, которые получил Фридман.

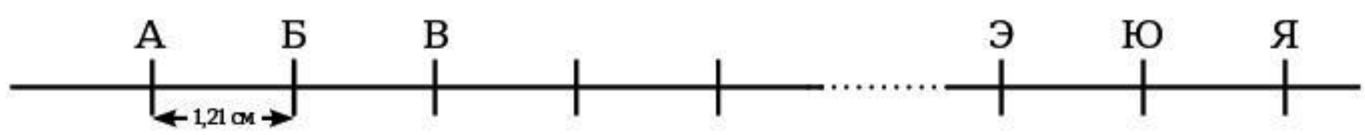
Уравнения Фридмана — следствия из уравнений Эйнштейна для вселенных, устроенных описанным простейшим образом, т.е. одинаковых в разных своих частях и по разным направлениям. И эти уравнения — «передаточный механизм» между тем, сколь плотно заполнена та или иная вселенная, и, если она расширяется, судьбой ее расширения. Конструирование вселенных в действии: судьба миров определяется плотностью вместившейся в них пыли. Сейчас мы знаем из наблюдений, что живем в расширяющейся Вселенной: это значит, что из возможных решений уравнений Фридмана реализуется то, где *a* возрастает с течением времени. Однако на вопрос: «С какой скоростью расширяется наша Вселенная?» — ответить нельзя, потому что у такого вида «движения», как расширение Вселенной, нет скорости типа «километров в секунду», а есть только темп. Я больше не буду брать это движение в кавычки, потому что видим мы его как самое настоящее движение: для каждой конкретной галактики можно даже измерить скорость ее удаления от нас. Тем не менее наблюдаемая картина не лишена и некоторого элемента иллюзии: каждому наблюдателю кажется, что все удаляется именно от него, как будто он находится в центре, хотя никакого центра нет. Неплохой способ представить себе, как это получается, — посмотреть на лист бумаги в клетку; лучше всего подойдет крупная, сантиметровая клетка. Выберем какой-то узел сетки и поставим в нем точку А. Сейчас принято, чтобы там жила Алиса, но пусть живет Аня. В другом узле, на сантиметр в сторону, поселился Боря, а еще через сантиметр в ту же сторону — Вера. Наша вселенная на листе бумаги — в отличие от настоящей Вселенной — густо населена: далее вдоль того же направления живут, понятно, Гриша, Даша, Егор и другие персонажи; пожалуй, нам будет достаточно перечислить их до Эдуарда, Юлии и Якова:



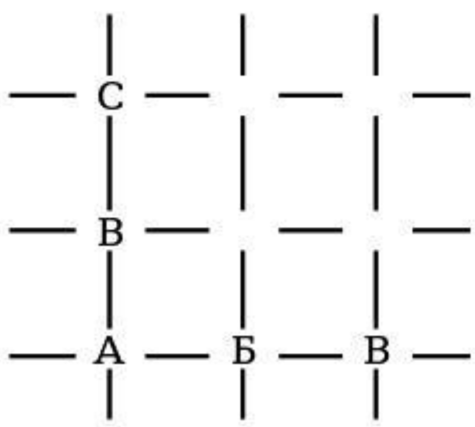

Мы хотим, чтобы у них было все как у нас, только оживленнее и нагляднее. Пусть буква *a* в их метрике меняется со временем так, что за год каждое расстояние в 1 см увеличивается на 1 мм. Ключевое слово — «каждое». Это значит, что через год Боря окажется от Ани на расстоянии 1,1 см, но то же самое верно для расстояния от Бори до Веры: оно тоже станет равным 1,1 см:




Это, конечно, означает, что от Ани до Веры теперь 2,2 см. А от Ани до Гриши — 3,3 см. Как мы видим, никакой единой скорости нет: Боря в среднем в течение года удалялся от Ани со скоростью 0,1 см/год, но Вера удалялась от Ани со скоростью 0,2 см/год. А Эдик, Юля и Яша уже буквально бежали от Ани со скоростями около 3 см/год. Темп расширения тем не менее для всех один: 1 мм в год на сантиметр, т.е. $1\,\frac{\text{мм}}{\text{год}}/\text{см} = 0{,}1\,\frac{\text{см}}{\text{год}\cdot\text{см}}$, где можно, конечно, сократить сантиметры, получив $0{,}1\,\frac{1}{\text{год}}$. Еще через год, если темп расширения останется примерно тем же, расстояния между соседями станут равными 1,21 см:




Не без доли высокомерия я позволяю себе смотреть на эту игрушечную вселенную со стороны — просто потому, что я ее нарисовал. Но моя настоящая Вселенная ни на чем не «нарисована» и не имеет никакой «стороны», откуда на нее можно было бы смотреть. Единственный возможный взгляд — это взгляд наблюдателя изнутри. А что видят наши персонажи? Каждый видит одно и то же: все убегают от него. Например, по наблюдениям Пети, в одну сторону от него удаляется Оля, а в противоположную — Рита. И те, кто расположен подальше от Пети, отдаляются от него быстрее. Точно таким же образом Коля наблюдает, что все разбегаются именно от него: Ира в одну сторону, а Люда в другую, а если смотреть мимо Люды, то будет виден Миша, который удаляется в два раза быстрее, и т.д. И, конечно, увеличение расстояний происходит не только вдоль выбранной линии, на которой поселились наши персонажи. Bill и Caren удаляются от Ани точно в том же темпе,




и вообще *все* расстояния вдоль всех направлений увеличиваются в одинаковом темпе, так что если мы начали с листа тетради в клетку, то форма клеток в этой двумерной клеточной вселенной не изменяется, только их размер увеличивается. При этом — вот ведь фокус! — вся клеточная вселенная остается «внутри себя»: ей не нужно никакого места вовне, чтобы растянуться. Точно так же, взяв *все* (для простоты — целые) числа (…, —3, —2, —1, 0, 1, 2, 3, …), мы можем умножать их все по своему желанию на два, на три, на десять или на сто, и полученные числа все равно останутся среди тех же исходно взятых целых чисел. Таким же образом наша реальная физическая Вселенная расширяется, «не высовываясь сама из себя», вообще без всякого «снаружи», а каждый наблюдатель в ней видит, что все убегают от него, причем все более далекие объекты убегают все быстрее.

*Вселенная расширяется, оставаясь внутри себя*

*Большой взрыв — это момент времени*

Темп расширения — те самые $0{,}1\,\frac{1}{\text{год}}$ для наших персонажей — называется постоянной Хаббла. В реальной Вселенной постоянная Хаббла имеет величину около 70 (км/с)/Мпк. Это читается как «70 километров в секунду на мегапарсек» и означает, что объекты, разделенные расстоянием в один мегапарсек, удаляются друг от друга со скоростью 70 км/с. Мегапарсек — это расстояние, которое любят астрономы; если избавиться от него, то постоянную Хаббла можно выразить как $7{,}15\times10^{-11}\,\frac{1}{\text{год}}$.[140] *Обратная* величина — единица-деленная-на-постоянную-Хаббла — измеряется в годах и дает примерную оценку возраста Вселенной. Если бы темп расширения не менялся с самого начала, то это «начало» должно было случиться именно столько времени назад:

около 10 лет назад для нашей тетради в клетку и без малого 14 млрд лет назад для нашей Вселенной. (В действительности уравнения Фридмана сообщают, что сам темп расширения несколько изменяется с течением времени, и оценку возраста Вселенной надо поэтому уточнить.) В момент этого «начала» (определенный, конечно, лишь с известной точностью) *вся наблюдаемая ныне* Вселенная умещалась в объеме величиной примерно с яблоко, была заполнена горячим плотным веществом и уже находилась в состоянии разбегания всех от всех (буква *a* увеличивалась). Этот момент не очень удачно назвали Большим взрывом, хотя это не взрыв где-то в пространстве, а момент или короткая стадия определенного состояния пространства и материи [141]. Про него неинтересно спрашивать «где?» (потому что ответ — «везде»), но интересно спрашивать «когда?». Потренируемся еще раз на наших клеточных персонажах, сконцентрировавшись на Пете. По одну сторону от него Оля, а много дальше Аня; по другую — Рита, и где-то вдали Яков. Большой взрыв — это момент времени, когда все «насечки» А|Б|…|П|…|Ю|Я| умещались на длине меньше микрона [142]. Эта «микронная» область и расширилась до современной вселенной от А до Я, которую наблюдает сейчас Петя. Здесь, правда, хочется спросить, а что же слева от Ани и справа от Якова? Это у меня буквы кончились, а на самом-то деле?

### *С момента Большого взрыва происходит расширение во всех точках*

Здесь два обстоятельства. Во-первых, этот «микрон», который был очень плотно забит веществом (так, что его потом хватило на наблюдаемую вселенную от А до Я), соседствовал с другими такими же «микронами», столь же плотно забитыми веществом; вселенная была однородной и одинаково плотной, по крайней мере в пределах некоторого масштаба, заметно превосходящего эти «микроны». *Все они* стали расширяться в равной мере. Но, во-вторых, скорость, с которой разбегаются друг от друга два достаточно удаленных персонажа в нашей клеточной расширяющейся вселенной — скажем, Петя и Яков, — может превысить (тамошнюю, «клеточную») скорость света. Ведь чем дальше друг от друга две точки, тем больше скорость, с которой растет расстояние между ними. В нашей реальной расширяющейся Вселенной такое тоже происходит, только мы никогда не узнаем, зовут ли кого-нибудь из «них» Яковом, потому что из-за быстрого удаления разрываются причинные связи между достаточно далекими областями пространства: обмен сигналами между ними оказывается невозможным. Может показаться, что я оперирую двойными стандартами: периодически вспоминаю, что максимальная скорость распространения любого сигнала — скорость света, но при этом спокойно заявляю, что П и Я разлетаются друг от друга быстрее, чем со скоростью света. Но в действительности никакие принципы не нарушаются: удаление друг от друга любых двух областей во Вселенной со сверхсветовой скоростью не является сигналом, и запретов на это нет. А вот из-за запрета на сверхсветовые сигналы наблюдаемая вселенная оказывается конечной. Петя не знает и принципиально не может знать, что находится «там далеко». Я назначил им неизменный темп расширения и подобрал такую скорость света, что все, в принципе доступное ему для наблюдений, — это вселенная от А до Я. Убедившись в расширении своей вселенной, Петя решил уравнения Фридмана и сделал вывод, что определенное время назад вся его вселенная от А до Я имела размер «микрона»; следуя не очень удачному совету, он стал называть этот момент Большим взрывом. И у нас Большой взрыв — момент времени, когда весь *наблюдаемый сейчас* мир был величиной с «яблоко» [143]. Что было и что стало с «чужими яблоками» — соседними областями размером с яблоко, которые тоже были плотными и горячими в момент Большого взрыва и тоже принялись расширяться, — мы не знаем, и шансов выяснить это из наблюдений нет, именно потому, что мы не можем получить никакой информации из-за пределов нашей наблюдаемой Вселенной.

### *Материя во Вселенной не собирается вместе, потому что продолжает разлетаться*

Вооруженные знанием о расширении Вселенной и о законе этого расширения, мы теперь не удивляемся, почему вещество во Вселенной не стягивается в один комок: потому что с момента Большого взрыва оно находится в состоянии разбегания всех от всех. Правда, с важным уточнением: удаляется ли Солнце от центра Галактики? Земля от Солнца? Увеличивается ли радиус Земли? Увеличивается ли в объеме человек или камень? Нет, нет, нет и нет. В галактиках собраны звезды и газ, совместное притяжение которых *уже* одержало верх над разбеганием. Это же верно для скоплений галактик; галактике Андромеда ничто не запрещает лететь в сторону галактики Млечный Путь и со временем с ней столкнуться; тем более ничто не мешает системам, связанным химически, оставаться связанными. *Разбегаются* друг от друга части, не связанные гравитационно (а таких в наблюдаемой Вселенной имеется в избытке).

Правомерен и другой вопрос: к чему «в конце концов» приведет это разбегание? Сама возможность всерьез задаваться таким вопросом про *Вселенную* — впечатляющий показатель прогресса в понимании мира и законов движения в нем. За два столетия до уравнений Эйнштейна не меньше должны были впечатлять ответы на вопросы про поведение тел в Солнечной системе, начиная с триумфального предсказания Галлея о возвращении кометы. От кометы до Вселенной за двести лет развития картины мира! [144] В каждом случае основное средство — это уравнения, которым подчиняется *поведение*, и «начальные условия», т.е. данные о состоянии в какой-либо момент времени, например «сейчас». Притягивающее вещество с неизбежностью *замедляет* расширение; вопрос в том, какая тенденция победит: случившееся разлетание или «съедающее» его замедление. Стянется ли все в один комок? Останется ли мир расширяющимся и поэтому практически пустым?

Уравнения Фридмана определяют темп расширения исходя из имеющихся энергии-движения-сил, распределенных по пространству: благодаря этим уравнениям характер и судьба расширения Вселенной связаны со средней плотностью энергии в ней. Если средняя плотность энергии больше некоторой определенной, то расширение со временем сменится сжатием. Итог — все-таки «один комок» (который получится безумно горячим). Такие модели мира называют замкнутыми; описываемый ими мир пространственно искривлен и интуитивно является «выпуклым»: сумма углов больших треугольников превышает 180°, как, например, это имеет место на глобусе. Если, наоборот, плотность энергии мала, то расширение никогда не прекратится; такие модели называют открытыми; сумма углов треугольника меньше 180°. В случае открытых моделей, правда, нельзя с уверенностью сказать, какую «форму» имеет «все» трехмерное пространство и бесконечно ли оно: это «всё» должно по необходимости распространяться за пределы наблюдаемой Вселенной, и поэтому утверждения о его глобальной структуре невозможно сопоставить с наблюдениями. Темп расширения такой вселенной в будущем будет убывать, приближаясь к некоторому постоянному значению. Промежуточная возможность — тоже «открытая» Вселенная, но при этом с плоским — т.е. неискривленным — пространством (но с искривленным пространством-временем!), где сумма углов каждого треугольника есть точно 180°, а ее дальнейшее расширение, хоть и никогда не остановится, будет происходить в темпе, постепенно приближающемся к нулю. Напрашивается грубая, но не полностью бессмысленная аналогия с одним из первых упражнений по исследованию движения тел в условиях гравитации — задачей Кеплера: при не слишком большой энергии движения в сравнении с энергией притяжения тело движется по замкнутым эллипсам, а при больших значениях энергии движения — по незамкнутым гиперболам, когда тело уходит прочь, постепенно замедляясь до некоторой ненулевой скорости; в граничном случае параболы движение все-таки незамкнутое, но «замирает» по мере удаления от притягивающего центра.

Решение, описывающее открытую вселенную, Фридман нашел в 1924 г., примерно за год до своей смерти (от тифа из-за немытой груши, купленной на железнодорожной станции при возвращении в Петроград из свадебного путешествия по Крыму). Уравнения Фридмана остаются в точности теми же, какими они были получены почти сто лет назад, а вот наблюдательные возможности с тех пор расширились необычайно. Решения уравнений Фридмана для расширяющейся вселенной определенно говорят, что имеющаяся в ней энергия/материя, уж сколько есть, замедляет расширение своим притяжением. А с использованием нескольких остроумных идей (включающих наше понимание механизма сверхновых типа Ia) для этого факта была придумана наблюдательная проверка: ставилась задача узнать, насколько велико замедление. Результат, полученный двумя группами астрономов в самом конце XX в., не попал ни в один из обсуждавшихся трех сценариев расширения. Темп расширения Вселенной, по-видимому, *увеличивается* последние несколько миллиардов лет. Аналог этой ситуации в задаче про тело в поле притяжения — ускорение по мере удаления, т.е. *отталкивание*. Что же во Вселенной мы *проглядели*, что способно к расталкиванию далеких друг от друга космических объектов? Какая вообще материя способна расталкивать видимые нами объекты? Вроде бы никакая, потому что всякая масса/энергия порождает кривизну так, что участники движения ощущают притяжение.

Однако мы недаром упражнялись на этой прогулке в записи таблиц. Материя может *говорить с пространством-временем десятью разными голосами*: таблица энергии-движения-сил, появившаяся ранее, $\begin{pmatrix} p & s & u & P \\ s & q & t & Q \\ u & t & r & R \\ P & Q & R & E \end{pmatrix}$, содержит не только энергию $E$ и не только три компоненты количества движения $P$, $Q$, $R$, но еще и давления $p$, $q$, $r$; и, для полноты, еще касательные натяжения. И мы просто не успели остановиться и, выдохнув и вдохнув, еще раз сказать себе: кривизну создают *все десять* явлений. Уравнения Эйнштейна

— это действительно штука с глубоким внутренним устройством; кроме энергии и количества движения, в них участвуют еще шесть величин, и сейчас самое время о них вспомнить. Касательные натяжения нам едва ли подходят, потому что мы продолжаем описывать мир, одинаковый по всем направлениям, а вот с давлением перспективы есть.

*Энергия искривляет пространство-время. Количество движения искривляет пространство-время. Давление и натяжение искривляют пространство-время*

Когда мы выбрали пыль в качестве наполнителя вселенных, мы тем самым нарочно забыли о давлении, т.е. положили его равным нулю перед тем, как решать уравнения Эйнштейна (в том конкретном виде для рассматриваемых вселенных, который называется уравнениями Фридмана). Попробуем теперь то же самое, но с давлением. Вселенная по-прежнему «вся одинаковая», поэтому все три буквы для давления $p$, $q$, $r$ равны одна другой. А всего параметров у вселенной получается два: плотность и давление, причем давление участвует в производстве кривизны независимо от плотности. Если оно положительно, то эффект добавляется к тому притяжению, которое создает плотность энергии. Но *если давление отрицательно*, то его вклад создает расталкивание. Баланс между плотностью и давлением среды *может* оказаться таким, что на больших расстояниях побеждает расталкивание. Похоже, что у нас нет выбора, кроме как признать, что в космосе имеется *нечто*, производящее отрицательное давление.

Среда с отрицательным давлением сопротивляется не ее сжатию за счет каких-то внешних усилий (как обычные газы с положительным давлением: накачайте-ка велосипедные шины ручным насосом!), а ее расширению за счет внешних усилий. Необычно? Возможно, но не запрещено никакими известными законами и, более того, не приводит к серии парадоксов. Такая среда с отрицательным давлением, распределенная по космосу, называется (снова не очень удачно) *темной энергией*. Это, в общем, и все, что про нее известно. Строго говоря, неизвестно даже, существует ли она как «среда», т.е. как некоторое физическое поле, или же это свойство, без которого пространство-время в нашей Вселенной «не продается», — неотъемлемое свойство самого вакуума. В одном из вариантов «штука с отрицательным давлением» в уравнениях Эйнштейна становится неотличимой от того самого космологического слагаемого (метрика) · $\Lambda$, которое в 1917 г. добавил в уравнения Эйнштейн, руководствуясь совсем другими (и не особенно верными) идеями.

История не лишена иронии: Эйнштейн изменил свои первоначальные уравнения, добавив в них космологическую постоянную, в ходе малоудачной попытки организовать вселенную, неизменную во времени; затем он постепенно отказался от идеи статической (неизменной) вселенной, но в период концентрации на ней пропустил решение, описывающее расширяющуюся вселенную и найденное затем Фридманом. Расширение нашей Вселенной было открыто экспериментально Хabблом, и про космологическую постоянную забыли, пока на рубеже XXI в. она не потребовалась снова для математической поддержки нового наблюдательного результата — что Вселенная не просто расширяется, но темп этого расширения растет [145].
Мы *совсем* не знаем, чем в действительности является темная энергия, как в точности связаны ее (отрицательное) давление и (положительная) плотность энергии, но в обозначениях почти стандартно фигурирует буква $\Lambda$ как напоминание об эффектах того рода, на возможность которых впервые обратил внимание Эйнштейн, использовав именно эту букву.

*****

**Совсем не наши вселенные.** Наполненность вселенной пылью не обязательно означает расширяющийся (или, быть может, сжимающийся) мир типа нашего. Гёдель — человек, внесший фундаментальный вклад в математическую логику и основания математики [146], — в 1949 г. на симпозиуме, посвященном дню рождения Эйнштейна, представил «вращающееся» решение уравнений Эйнштейна. Справедливости ради стоит оговориться, что это решение уравнений с космологической постоянной и в некотором роде даже статическое решение. Не очень естественным это решение делает не само по себе наличие космологической постоянной, а тот факт, что ее значение точно совпадает со средней плотностью энергии, распределенной в пыли. Тем не менее Гёдель считал, что его решение сообщает нечто новое о времени; сейчас оно поучительно в педагогически-тренировочных целях (и сообщает кое-что новое о времени).

Пыль распределена во вселенной Гёделя равномерно по всему пространству, а сама вселенная устроена одинаково в каждой своей точке, как и наша, но, в отличие от нашей, не одинакова по всем направлениям: вселенная Гёделя имеет одно выделенное направление. Его удобно называть вертикальным, хотя это чистая условность. Геометрия вдоль вертикального направления ничем не примечательна, а вот *поперек* этого направления — в «горизонтальной» плоскости — мир необычен. Каждый наблюдатель видит мир вокруг себя не разлетающимся прочь, как у нас, а вращающимся или, лучше сказать, скручивающимся: траектории любых двух частиц, которые свободно летят рядом вдоль вертикального направления, обвиваются одна вокруг другой. При этом с точки зрения *каждого* наблюдателя именно он находится на оси вращения мира, хотя никакой единой оси в действительности нет (подобно тому, как во вселенной Фридмана каждый наблюдатель видит себя в центре расширения, хотя никакого центра нет). Сама материя — пыль — «ничего для этого не делает». Просто таковы свойства метрики, найденной как решение уравнений Эйнштейна. Из-за этого «закручивания» свет, посланный наблюдателем в горизонтальной плоскости, не собирается уходить слишком далеко; по мере удаления от источника свет все более заворачивает в сторону, определяемую закручиванием, потом разворачивается и возвращается. На расстоянии, называемом гёделевским радиусом, свет поворачивает обратно к источнику. Таковы световые геодезические. На расстоянии, называемом гёделевским радиусом, свет поворачивает обратно, как показано на рис. 7.7. Свет же, который испущен не строго в горизонтальной плоскости, а под некоторым углом к ней, поворачивает еще раньше; а поскольку он одновременно распространяется без всяких приключений вдоль вертикального направления, в результате получается спираль. Спираль эта тем у́же, чем выше мы направим прожектор.

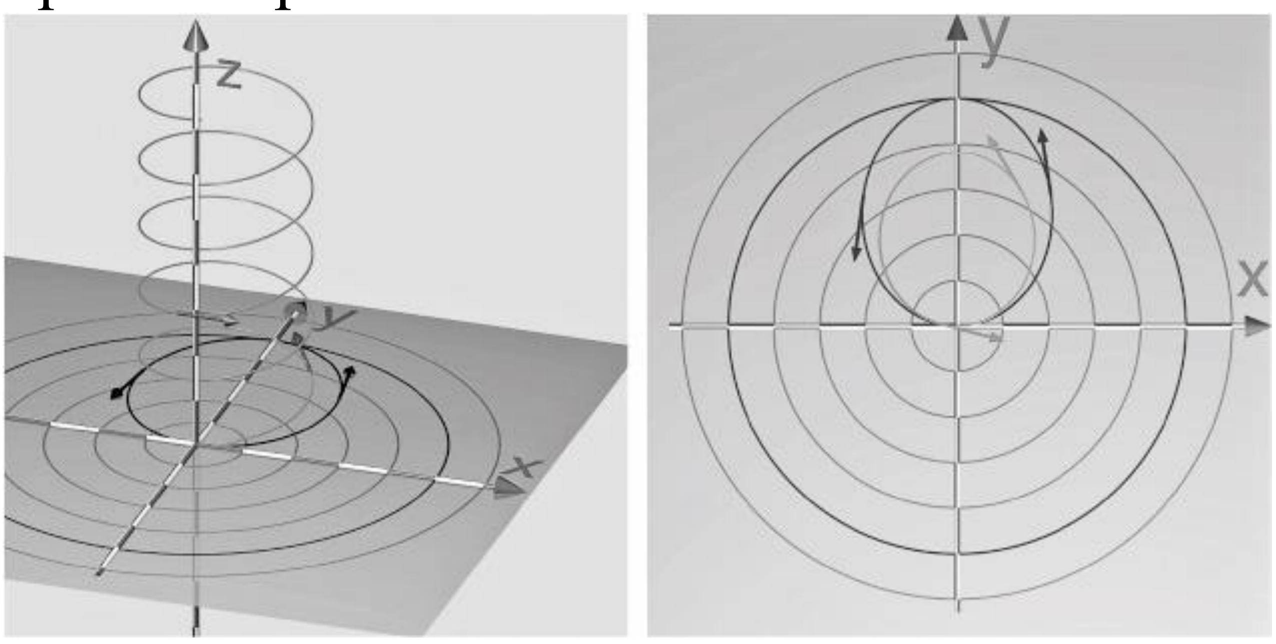



**Рис. 7.7.** Распространение света во вселенной Гёделя. Темной линией, выходящей из начала координат, показана траектория света, распространяю- щегося в горизонтальной плоскости, серая линия – траектория света, направленного под углом к этой плоскости. Показан также радиус Гёделя (более темная окружность).

***Слева:*** картина в пространстве. ***Справа:*** вид сверху

Из-за такого поведения света каждый наблюдатель окружен оптическим горизонтом на расстоянии гёделевского радиуса от себя. Свет не может выйти за его пределы, а также не может прийти к наблюдателю извне, откуда-то снаружи этого радиуса. *Зато* каждый объект в пределах радиуса Гёделя виден с двух сторон: именно потому, что лучи света заворачивают, приблизившись к этому радиусу, он играет роль зеркала (довольно кривого в этом мире кривых лучей). Свет, излучаемый или отражаемый от разных сторон объекта, приходит к наблюдателю как «сразу», по относительно прямым траекториям, так и по сильно изогнутым траекториям, уходящим сначала в сторону оптического горизонта, а потом поворачивающим снова к наблюдателю. В результате с разной степенью искажения одновременно видны и обращенная к наблюдателю сторона объекта, и дальняя (рис. 7.8). По мере приближения объекта к гёделевскому радиусу два изображения все сильнее искажаются и затем сливаются. А если объект сдвинут вверх или вниз из горизонтальной плоскости, то, кроме «основного» изображения, появляются и те, которые произведены лучами, распространявшимися по спиралям, как показано на рис. 7.9.

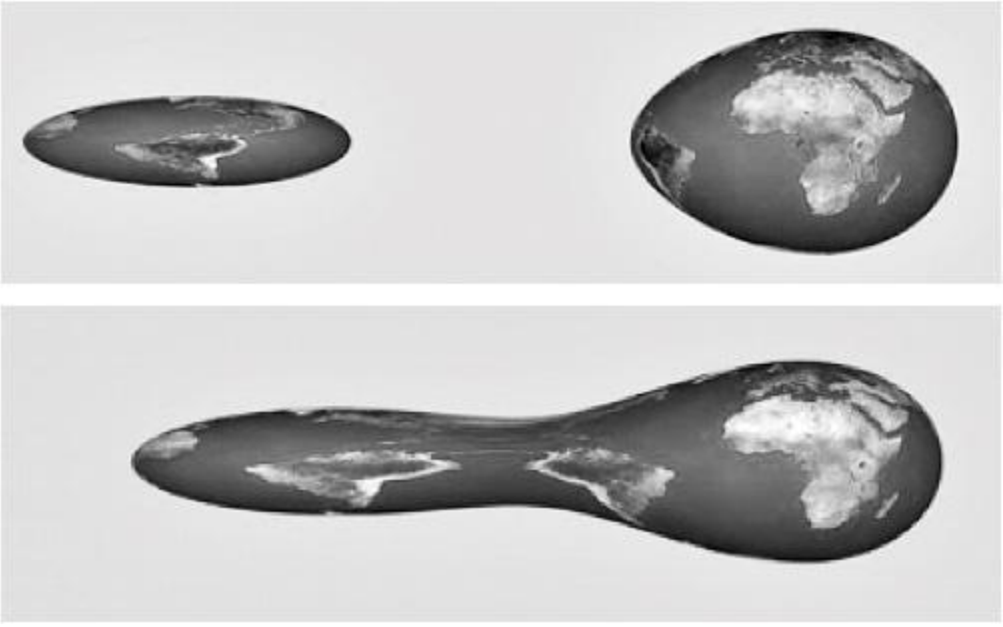


**Рис. 7.8.** Два изображения одного и того же объекта, видимого с разных сторон. Для узнаваемости в качестве объекта выбран глобус, обращенный к наблюдателю Европой и Африкой. Он располагается в горизонтальной плоскости на расстоянии 0,8 (сверху) и 0,9 (снизу) гёделевского радиуса; сам глобус довольно большой: 0,1 гёделевского радиуса

**Рис. 7.9.** Ситуация как на рис. 7.8, но глобус удален от наблюдателя на 0,74 гёделевского радиуса и приподнят на чуть большее расстояние (0,8 гёделевского радиуса) над горизонтальной плоскостью. «Главное» изображение представляет собой искаженные и слившиеся изображения двух сторон глобуса, а повторные изображения возникают благодаря свету, прошедшему 1, 2, 3 и т.д. витка спирали. Они искажены сильнее, и их передний и задний виды не соединены

Дальше — только хуже (видимо, к восторгу Гёделя). За пределами радиуса Гёделя происходит путаница посерьезнее, чем под горизонтом черной дыры. Если там зажечь лампу, то часть света, излучаемого ею во все стороны, распространяется не вперед, а назад по времени: в прошлое по часам наблюдателя, от местоположения которого отмеряется расстояние в один радиус Гёделя. Но и это не все. Вот настоящий предмет зависти многих фантастов: ракета в гёделевской вселенной является машиной времени. Вылетев на ракете в горизонтальной плоскости за радиус Гёделя, сделав разворот в сторону, противоположную той, в которую заворачивают траектории света, и вернувшись в исходную точку, путешественник окажется в собственном прошлом. (Все это достаточно делать, не выходя из горизонтальной плоскости.) Гёделя занимала эта идея; по словам Уилера, он разглядывал фотографии галактик, интересуясь тем, не в одну ли сторону все они вращаются — в таком случае оставался бы шанс, что мы живем внутри гёделевой вселенной. Но мы живем внутри фридмановой (фридмановой-с-лямбдой, судя по современным данным).

*****

**Наконец-то обмануть систему?** Уравнения Эйнштейна все чаще используют «в обратную сторону» — способом, противоположным собственно эйнштейновскому и фридмановскому. Работает это так. Если вам нравится какое-то «готовое» пространство-время, спросите себя, не найдется ли материи, которая именно его и порождает. Полюбившееся вам пространство-время описывается, конечно, метрикой *абвгдежзик* определенного вида, исходя из которой вы вычисляете кривизну, переупаковываете ее в Специальную упаковку 4 × 4 и получаете таким образом левую (геометрическую) часть уравнений Эйнштейна. Правая часть должна быть точно такой же с точностью до множителя, но ее надо *собрать из материи* — что означает подобрать материю и характер ее распределения по пространству таким образом, чтобы получилась требуемая таблица энергии-движения-сил. С некоторой оглядкой это можно назвать обратным проектированием — восстановлением чертежей по образцу. Оригинальный термин *reverse engineering* имеет оттенок «кражи технологий», что в данном случае даже на руку, потому что не прекращаются попытки «украсть» таким способом у Вселенной нечто желанное и более никак не доступное — сверхсветовое перемещение. Далекие галактики ведь удаляются от нас со скоростью, превышающей скорость света, и при этом ничего не нарушают и никак специально для этого не стараются. Можно ли организовать нечто подобное для одного отдельно взятого космического корабля?

Сначала кажется, что законы и принципы, на которые мы здесь опираемся, этого не позволяют. Ведь для каждого локального наблюдателя (все-таки понадобились!) скорость пролетающего *рядом* с ним света всегда одна и та же, и, разумеется, действует запрет на ее преодоление. Другое дело, когда наблюдатель выглядывает за пределы своей небольшой лаборатории: вблизи черной дыры, например, измерение скорости распространения света на удалении от наблюдателя дает самые разнообразные значения, и даже скорость в одной и той же точке может зависеть от направления (скорости вдоль радиуса и перпендикулярно к нему могут различаться в полтора раза). Точку, где пролетает свет, в этих случаях отделяет от наблюдателя некоторая область с кривизной. *Кривизна* вызывает необходимость перевода между разными картинами мира. Идея сверхсветового транспортного средства как раз и основана на использовании «несоответствий в законодательстве», возникающих при таком переводе. Мы посадим путешественника внутрь «пузыря», на границах которого резко меняется кривизна; сами на всякий случай останемся на космодроме. Вокруг нас пространство-время практически плоское, и в большей части пузыря — тоже, но на стенках кривизна резко меняется от нулевой к ненулевой и снова к нулевой (мы помним, что кривизна — это 20 независимых компонент, поэтому вариантов изменения немало). Как всегда, это кривизна какой-то метрики; оказалось не очень сложным записать такие *абвгдежзик*, чтобы в одном направлении от пузыря пространство сжималось, а в противоположном, наоборот, раздувалось. (Можно только гадать, в какой мере идея была мотивирована происходящим в керлинге; рис. 7.10.)

**Рис. 7.10.** Керлинг: свойства «пространства» перед движущимся предметом меняются, что влияет на его движение

Наблюдатель в центре пузыря остается на геодезической в куске плоского пространства вокруг себя, но со стороны видно, что весь пузырь перемещается за счет того, что пространство перед ним стягивается, а позади расширяется. При этом нет никаких ограничений на скорость такого перемещения: сидя внутри, путешественник мог бы курсировать по Вселенной со сверхсветовой скоростью. Необычно, что даже никакого замедления времени здесь не случается: время путешественника течет так же, как время на космодроме, откуда он вылетает. И вообще, находясь на геодезической, путешественник не ощущает и никакого ускорения — он просто свободно падает.

Но все это — если (бы) нам принесли готовое изделие. А сейчас у нас на очереди обратное проектирование — требуется подобрать материю «по образцу». Тут-то и выясняется, что важную часть технологии «недоукрали»: забыли поинтересоваться источником нужной материи. Из уравнений Эйнштейна следует, что — независимо от деталей устройства — стенки пузыря должны нести отрицательную плотность энергии. Стенки, *оказывается*, должны быть сделаны из *экзотической материи*. Так в целом называют материю с никогда не наблюдавшимися свойствами — от довольно необычных до очень странных, но, однако же, не запрещенных напрямую известными законами природы. На рис. 7.11 слева условно показано, где эта экзотическая материя должна располагаться, чтобы аппарат работал: «канава», если смотреть сверху, или «сталактиты», если смотреть снизу, — это не изображение какой-то геометрии, а выражение количества отрицательной энергии, разложенной в горизонтальной плоскости вокруг корабля (а раскладывать — скорее даже развешивать — ее надо вдоль кольца, ось которого совпадает с направлением движения). Столь же условно на рис. 7.11 справа показано, какая степень сжатия пространства (профиль вниз) и степень растяжения (профиль вверх) в передней и задней частях пузыря получается из такого распределения экзотической материи.

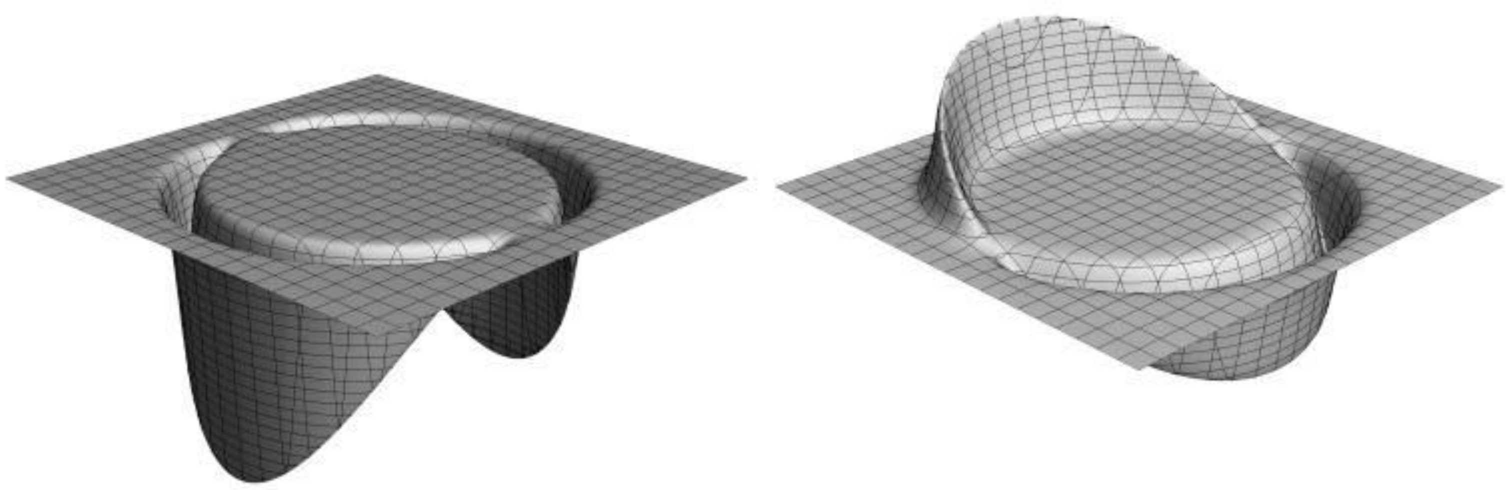


**Рис. 7.11.** *Слева:* плотность отрицательной энергии в одной плоскости вокруг корабля, который должен располагаться на горизонтальной плоскости в центре. Изогнутая поверхность — это профиль энергии, измеряемой в одной плоскости вокруг корабля. *Справа:* сжатие и растяжение пространства вокруг корабля. Поверхность показывает степень сжатия (условно вниз) или степень растяжения (условно вверх), измеряемую в одной плоскости вокруг корабля

Нам неизвестно, существует ли такая материя. Речь идет совсем не об антиматерии, которая отличается от «нашей» материи всем, *кроме* массы/энергии, но эти-то у нее как раз точно такие же; и даже не о темной энергии, *плотность энергии* которой положительна, а отрицательно только давление. Экзотическая материя нарушает некоторые свойства положительности типа положительности массы/энергии. Несколько таких свойств разной степени «строгости» выполнены для всех известных нам видов материи, но не вполне ясно, могут ли они (и какие именно из них) претендовать на роль незыблемых принципов. Современная ситуация, пожалуй, такова: примеры экзотической материи существуют на бумаге — возникают в теоретических моделях наряду с обычными видами материи, не нарушая при этом известных фундаментальных принципов.

Как бы то ни было, можно оценить количество отрицательной энергии, содержащейся в стенках пузыря: оно зависит от полезного объема пузыря и очень критически — от толщины стенок. До какой степени можно распоряжаться толщиной стенок, понятно не вполне; если они «квантовые» — т.е. если экзотическая материя существует только на очень малых масштабах, а потому стенки чрезвычайно тонкие, — то требуемое количество энергии превышает всю массу наблюдаемой Вселенной, причем на порядки. Такая оценка содержалась уже в оригинальной работе Алькубьерре — изобретателя метрики, на которой должен быть основан этот способ сверхсветового передвижения; в ней же было дано название «ворп-драйв» (*warp drive*), с явным указанием на сериал «Звездный путь» как на источник (не метрики, которая появилась именно в работе Алькубьерре, а названия). Предпринимались попытки уменьшить требуемое количество отрицательной энергии: обосновать возможность более толстых стенок и несколько изменить метрику, описывающую пузырь. Оптимистичные оценки — несколько масс Солнца. Но только не будем забывать, что речь идет об энергии, которая получается умножением массы Солнца на квадрат скорости света, а это *много*; и требуется, чтобы вся она была со знаком минус. Масштаб этой энергии, но со знаком плюс, виден на примере «менее продвинутого» транспортного средства — доброй старой фотонно-аннигиляционной ракеты (прогулка 5). В предположении, что набрать *одно Солнце* антивещества все-таки проще, чем эквивалентное количество экзотической материи [147], мы могли бы не дожидаться завершения работ по созданию ворп-драйва, а отправиться в путь на фотонной ракете, взяв с собой в дорогу анти-Солнце из «просто антиматерии» и еще одно просто-Солнце в виде примерно Солнца в качестве топлива для фотонно-аннигиляционного двигателя. Тогда мы *шутя* летали бы почти куда угодно: из таблицы 5.3

можно заключить, что даже с двигателем, коэффициент полезного действия которого составляет 1% (что выглядит как намного более реалистичная оценка, чем 100%), мы привезли бы в галактику Андромеды (!) пару триллионов тонн полезного груза (которые наверняка были бы крайне необходимы для обустройства там). И это — всего за двадцать лет в дороге и без экзотических форм материи, а только с использованием антивещества. Правда, из-за количества лет, прошедших на Земле, возвращаться большого смысла не имеет, даже если где-то в районе Андромеды найдется готовая новая ракета для обратного пути; чем несомненно хорош ворп-драйв, так это отсутствием замедления времени. Оправдывает ли это расходы на добывание экзотических форм материи, я оставляю на усмотрение читателей.

Да, и даже при бесперебойном обеспечении экзотической материей остается небольшая проблема управления ворп-драйвом: экипажу в какой-то момент захочется остановиться, а для этого понадобится как-то перераспределить ту самую экзотическую материю. Потребуется послать к ней какой-то сигнал; но экипаж обнаружит, что до передней части стенки пузыря сигналы не доходят. Даже свет, который они туда направят, «застрянет», остановившись где-то внутри стенки, но определенно не выйдя наружу: экипаж увидит там *горизонт*. Управление путешествием заметно усложняется: или им придется использовать *маленькие* алькубьерровские пузырьки для передачи сигналов внутри своего большого пузыря, или, скорее, всю экзотическую материю потребуется заранее распределить вдоль пути требуемым образом. Для чего сначала надо там побывать, а затем обеспечить надзор за состоянием и сохранностью этого недешевого ресурса.

*****

**Пустая кривизна.** Эйнштейн представил окончательный, логически безупречный вид своих уравнений (без лямбды, разумеется) 25 ноября 1915 г., а меньше месяца спустя у него в руках уже было их *точное* решение — пришедшее письмом с Восточного фронта и описывающее, как устроена метрика вокруг притягивающего центра. Без сомнения, радовала возможность точно (а не приближенно, как делал сам Эйнштейн, вычисляя перед тем поворот орбиты Меркурия) решить сложные уравнения. Основная трудность с ними в том, что «кривизна не складывается»: если два тела создают кривизну, то нельзя найти сначала кривизну, создаваемую одним телом, потом другим, а потом их сложить. В теории Ньютона было не так: отдельно посчитанные силы притяжения со стороны Солнца и со стороны Луны просто складывались. У Ньютона, как мы помним, проблемы с точным решением, описывающим движение тел под действием взаимного притяжения, начинались с трех тел; точное решение можно записать только для задачи двух тел. В случае уравнений Эйнштейна точно решается только задача *одного* тела. Мы просто не знаем, как формулами описать метрику пространства-времени, например, при наличии двух близких друг к другу черных дыр. А вот черная дыра в полном одиночестве — точное решение задачи одного тела — и появилась впервые в письме, полученном Эйнштейном 22 декабря 1915 г. от Карла Шварцшильда.

Незадолго перед тем, в ноябре, во время своего отпуска с фронта Шварцшильд присутствовал на лекции Эйнштейна и затем за пару недель «создал» черную дыру [148]. Впрочем, звучное название «черная дыра» придумал Уилер только полстолетия спустя, а в конце 1910-х и в последующие годы решение Шварцшильда привлекало к себе сдержанное внимание, и не все его свойства были поняты сразу. Прежде всего бросались в глаза особенности приближения к горизонту, как они виделись со стороны далекого внешнего наблюдателя («болельщиков»); понимание, что падающий наблюдатель не обнаружит на горизонте ничего специального — собственно говоря, вообще ничего — и бодро пролетит через него, пришло сильно не сразу. Эйнштейну вообще определенно не нравилась идея черных дыр в качестве астрофизических объектов. Закон природы, выраженный в уравнениях Эйнштейна, и найденное математически проявление этого закона — решение Шварцшильда — опережали наблюдения. Тем не менее неочевидные в исходной формулировке свойства этого решения постепенно прояснялись, включая и тот факт, что у черной дыры есть внутренность, откуда нельзя выбраться, но нет ничего похожего на твердую границу или «стенку». Все, что мы говорили про невращающуюся черную дыру на предыдущей прогулке, относилось к черной дыре Шварцшильда. Вращающуюся черную дыру как другое (и заметно более сложное) точное решение уравнений Эйнштейна много позже, в 1963 г., нашел Керр.

### *Черная дыра — не тело. Это область в пространстве*

Несколько парадоксально при этом, что черные дыры как решения уравнений Эйнштейна — это решения *без материи*: таблица энергии-движения-сил в правой части состоит из одних нулей: пустота, *нет ничего*. Мы помним, что кривизна — это 20 компонент, которые в уравнениях Эйнштейна собраны по нескольку вместе в Специальной упаковке 4 × 4; там, значит, различные компоненты должны сокращать друг друга, чтобы в левой части уравнений Эйнштейна получились одни нули, как того требует правая часть. Из-за чего же возникают ненулевые компоненты кривизны? Почему пространство-время оказывается неплоским, хотя материи как будто бы нет? Фокус в том, что решение Шварцшильда — это точное решение уравнений Эйнштейна везде, кроме центра черной дыры, где оно теряет применимость. Эту потерю применимости мы выражаем словом «сингулярность». Математически решение не определено в одной-единственной точке, и соблазнительно думать, что вся масса там и прячется, но строгого смысла этому высказыванию придать нельзя; никакое количество массы не может поместиться *в точке*. Фактически же мы думаем, что в *очень* малой окрестности центра сверхбольшая плотность материи и сверхвысокая кривизна стирают грань между материей и пространством-временем: они перестают существовать по отдельности, а превращаются в неизвестную нам форму трудно-даже-сказать-чего [149].

### *Черная дыра не состоит из атомов или элементарных частиц*

Но как вообще определяется масса черной дыры? Ее ведь нельзя взвесить; правда, равным образом нельзя взвесить Юпитер или Солнце: вывод о массе Солнца мы делаем, изучая движение вокруг него, т.е. решая задачу, обратную задаче «зная силы, найти движение». Наблюдая за движением по кеплеровым эллипсам вокруг Солнца, мы определяем силу, необходимую для его поддержания, а далее из закона тяготения Ньютона находим массу центрального тела. Для Солнца или Юпитера, правда, есть в принципе и альтернативный способ: можно задаться вопросом, сколько же в них каких атомов или элементарных частиц и какова поэтому их полная масса. Но наши представления о черных дырах говорят, что там, где элементарные частицы в принципе еще могли бы существовать, пусто. Для массы черной дыры остается только определение через движение пробных тел. Их можно даже запускать вдали от самой черной дыры, где у руля снова сэр Исаак Ньютон: чем дальше от центра, тем решение Шварцшильда лучше описывается ньютоновым законом тяготения. Запуская гайку, мы узнаем, какая же масса должна быть сосредоточена в центре, чтобы гайка двигалась именно так. Эту массу мы и называем массой черной дыры. В случае вращающейся черной дыры похожим образом определяются ее масса и количество вращения — с учетом эффекта вовлечения.

Масса и количество вращения, определенные по движению пробных тел для черной дыры, которая есть не тело, а пустота, расширяют, пожалуй, наши представления об этих атрибутах материи. Впрочем, их косвенные определения оказываются согласованными с нашей картиной мира: если в черную дыру некоторой массы падает кирпич, то масса черной дыры увеличивается на массу этого кирпича, и аналогично с количеством вращения. Характерная разница между тем, как черная дыра распоряжается массой, а как — количеством движения, состоит в том, что (не привлекая квантовых эффектов) у одной невращающейся черной дыры нельзя отобрать ни грамма массы. С количеством вращения иначе: его можно отобрать и передать каким-то удаленным от черной дыры объектам, пригодным, например, для полезного использования. Отобрать количество вращения у раскрученного маховика можно через приводной ремень или как-то иначе организованное трение, но черную дыру не за что «потянуть», а «вращающейся вещи» внутри нее нет. Тем не менее возможен своеобразный (пожалуй, и правда экстремальный) вариант гравитационного маневра для извлечения энергии вращения «без приводного ремня». Для этого нужно смело нырнуть внутрь эргосферы (см. рис. 6.29): там, как мы говорили, нельзя не вращаться, но оттуда *можно* вернуться, потому что эргосфера проходит на некотором расстоянии от внешнего горизонта (подлетать лучше всего в экваториальной плоскости, там зазор между эргосферой и горизонтом максимальный). Фокусы со временем внутри эргосферы приводят к тому, что энергия находящихся там тел может принимать отрицательные значения (не обязана, но может — в зависимости от скорости движения, причем главное — направление скорости) [150]. Эту особенность и можно эксплуатировать. Для этого прыгнувший в эргосферу должен использовать там наипростейший вариант реактивного двигателя. Требуется не создавать равномерную струю газа или света, а единовременно выбросить достаточно большой кусок вещества — скажем, всю ступень ракеты с двигателем (двигатель, использование которого сводится к акту его выбрасывания, — по-настоящему одноразовый). Успех трюка критически зависит от прицеливания: эту ступень следует направить так, чтобы именно ее энергия стала отрицательной (это возможно!). Однако энергия выброшенной ступени в сумме с энергией оставшегося командного отсека сохраняется, как и полагается энергии; и если энергия ступени стала отрицательной, то появляется компенсирующая положительная прибавка к энергии движения командного отсека. (Энергия, взятая из каких-то запасов на борту для отбрасывания нижней ступени, может быть при этом очень мала, и ее можно вообще не учитывать.)

В результате командный отсек успешно (по геодезической! никаких двигателей ведь не осталось) вылетает из эргосферы, сохраняя часть полученной прибавки к своей энергии. Черная дыра оставила себе отрицательный вклад в энергию, который она списывает на уменьшение количества вращения и массы. Если корабли целого флота космических тунеядцев прыгают внутрь эргосферы один за одним, то притормозить вращение черной дыры они смогут до полной ее остановки, что означает превращение ее в невращающуюся (как мы теперь можем говорить — шварцшильдову) черную дыру [151].

Едва ли Шварцшильд мог предвидеть, сколь уверенно в космосе «пропишутся» необычные объекты из открытого им класса. В 2020 г. половина Нобелевской премии по физике была присуждена «за открытие сверхмассивного компактного объекта в центре нашей Галактики». Нобелевский комитет проявил осторожность в формулировке и не употребил словосочетание «черная дыра», видимо, потому, что, строго говоря, не доказано, каким именно решением уравнений Эйнштейна описывается этот объект, но, по всеобщему убеждению, это сверхмассивная черная дыра. Она носит красивое имя Стрелец $A^*$ (а-со-звездочкой) и имеет массу в четыре с лишним миллиона масс Солнца. Для невращающейся черной дыры это означало бы радиус горизонта около 12 700 000 км (менее одной десятой расстояния от Земли до Солнца), что не так уж много в мире сверхмассивных черных дыр, живущих в центрах галактик: для $M87^*$ — центральной черной дыры в галактике M87 (см. рис. 3.13) — это 19 000 000 000 км (более *ста* расстояний от Земли до Солнца) [152]. Знания о «нашей» черной дыре почерпнуты в первую очередь из движения — разумеется, не самой невидимой черной дыры, а звезд вокруг нее. За несколько десятилетий наблюдений удалось проследить за звездами, которые обращаются «вокруг пустоты» (см. рис. 7.12). Из анализа их орбит и найдена масса центрального объекта. С момента предсказания существования Нептуна по движению Урана прошло полтора с лишним столетия, и методы как наблюдений, так и предсказаний на основе наблюдений не стояли на месте; но, в противоположность случаю Нептуна, оценкам на этот раз подлежат свойства *центрального объекта!* Из измерения расстояний и скоростей звезд получается надежная оценка для его массы. Одна из звезд, получившая название S0-2, в точке своего максимального приближения к центру находится от него на расстоянии всего в 17 световых часов. Это сравнимо с расстоянием (12 с лишним световых часов), на которое в Солнечной системе успел улететь «Вояджер-1»; это в четыре раза дальше, чем находится от Солнца Нептун, который совершает оборот вокруг Солнца за 185 лет, но звезда S0-2 оборачивается вокруг черной дыры за 15 с половиной лет (а S0-102 — за 11 с половиной). Поэтому ее орбиту уже удалось проследить целиком: она совершила полный оборот на наших глазах, под неустанным наблюдением — и у нее уже заметен «эффект Меркурия», т.е. прецессия орбиты. S0-2 движется с орбитальной скоростью около 5000 км/с; высокие скорости, собственно говоря, и делают возможным эту удивительную ситуацию, где звезды в некотором роде играют роль планет, а смену их расположения из-за орбитального движения можно за не такое уж длительное время увидеть в телескоп [153]. И вся картина, не будем забывать, трехмерна, что яснее видно на рис. 7.13.

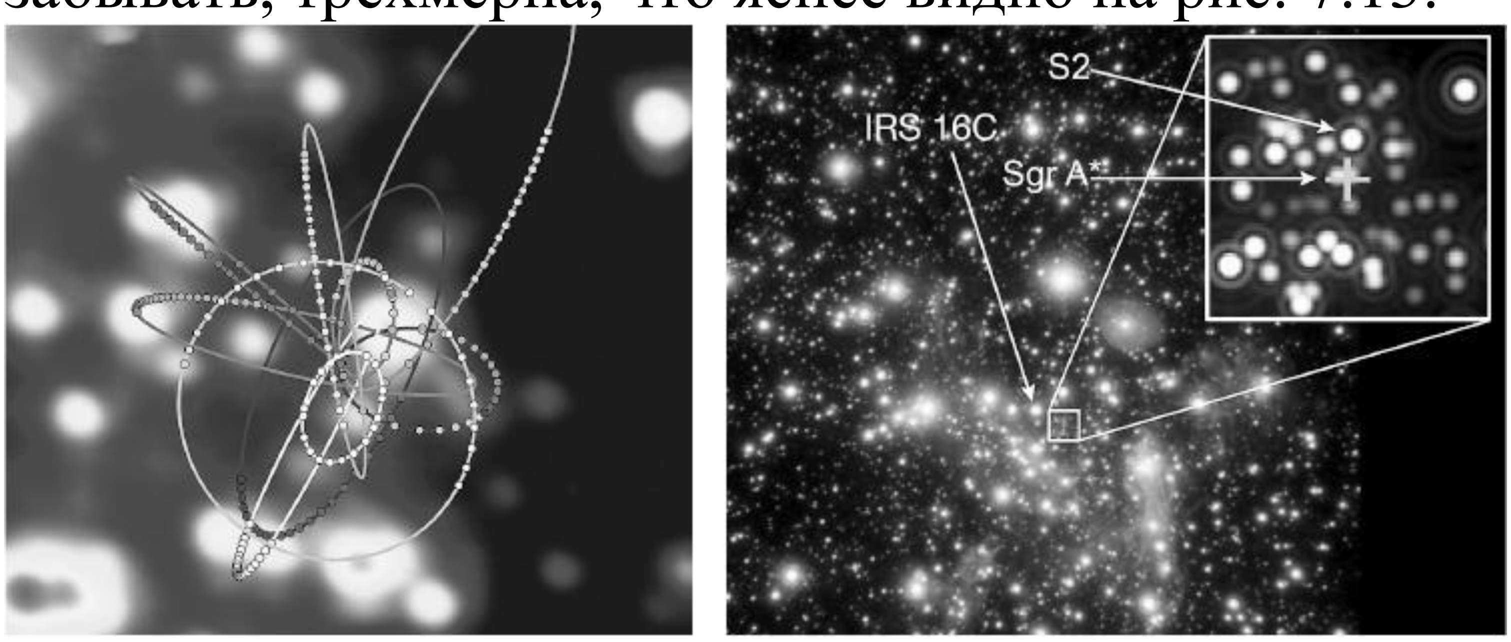



**Рис. 7.12.** *Слева:* участок неба размером одна угловая секунда на одну угловую секунду в направлении на центр Галактики. Точки — положения звезд, зафиксированные в период с 1995 по 2016 г. Линиями для наглядности показаны вычисленные по наблюдениям орбиты. *Справа:* та же область в центре Галактики, видимая в телескоп. Указаны положение черной дыры Стрелец A$^*$ (Sgr A$^*$) и наблюдаемое положение звезды S0-2 (она же S2)

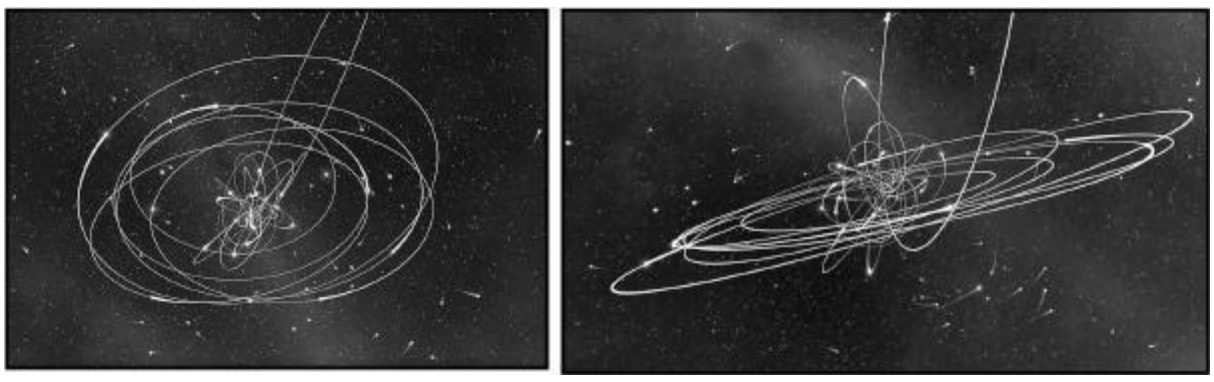


**Рис. 7.13.** Движение звезд вокруг сверхмассивной черной дыры в центре Галактики: взгляд «сверху» (*слева*) и «с ребра» (*справа*)

## *Сильная гравитация выдает себя высокими скоростями*

## *Черные дыры превращают в излучение падающую на них материю*

Наличие сверхмассивных черных дыр в центрах галактик — типичное явление. Наша черная дыра Стрелец А$^*$ находится в спокойном состоянии (иначе, вероятно, факт ее наличия там некому было бы оценить); но гигантские черные дыры в центрах многих других галактик служат «мотором» для самых мощных долговременно действующих разбрасывателей энергии в космосе. В качестве «топлива» они получают просто вещество, какое найдется в галактике (межзвездный газ), а излучают в виде света заметную долю от *массы* этого вещества, т.е. заметную долю энергии $mc^2$: по самым консервативным оценкам, не меньше одной десятой, что уже много, а возможно, и до четверти. (Солнце, например, за *миллиард* лет отправит в пространство, главным образом в виде света и в небольшой степени в виде нейтрино, всего лишь несколько сотых долей процента своей массы — притом что оно раскидает в космос около процента своего вещества в виде *вещества*, т.е. солнечного ветра.) Вещество, которое оказывается в области притяжения черной дыры, собирается в диск. Оно попадает в диск «издалека», а вот слишком близко к центру оно находиться не может, потому что ближе радиуса БУКО нет устойчивых орбит и все, что окажется в этой опасной близости от центра, не задерживаясь, падает на него. По пути от внешней границы диска к внутренней вещество трется само о себя, из-за чего разогревается и излучает энергию — производя эффекты, которые могут быть видны в телескоп на расстояниях в несколько миллиардов световых лет. Падающее вещество находится в сильно разогретом состоянии, поэтому светится, в том числе в высокоэнергетической части спектра — в рентгеновском излучении [154]. Часть энергии выделяется в виде концентрированных струй ионизированного вещества, разогнанного до скоростей, близких к скорости света. Струи выбрасываются вдоль оси вращения черной дыры в обе стороны и, как показывают наблюдения, могут иметь поистине космические размеры — до сотен тысяч и даже миллионов *световых лет*. Черную дыру в галактике M87 (см. рис. 3.13) выбрали для «фотографирования» в том числе и потому, что она проявляла себя, выбрасывая струи, хоть и всего на 5000 световых лет; они видны и в радио-, и в видимом, и в рентгеновском диапазонах (рис. 7.14) [155]. Не все детали происходящего в этих мощнейших преобразователях энергии понятны, но «в центре событий» там — черные дыры. Работающая здесь причинно-следственная цепочка неплохо иллюстрирует тезис Уилера, приведенный в главе «прогулка 6»: материя, прекратившая свое существование в известных нам формах, уже «все сказала» пространству-времени и проявляет себя только через гравитацию — т.е. кривизну; эта кривизна говорит другой материи, как двигаться, и сопутствующие этому движению *яркие* явления несложно наблюдать в космосе.

**Рис. 7.14.** Струя, порождаемая гигантской черной дырой в центре галактики M87, наблюдаемая в радио- (*слева*), видимом (*в центре*) и рентгеновском (*справа*) диапазонах

Было бы *очень* интересно обзавестись черной дырой поближе к дому. Относительно недавно обсуждалась (не до конца понятно, с какой степенью серьезности) идея, что Планета 9 (см. главу «прогулка 3») — это забредшая в наши окрестности черная дыра. При массе около пяти масс Земли она очень невелика не только по космическим, но даже и по бытовым масштабам (рис. 7.15). Близкое соседство с ней, впрочем, окажется совсем не бытовым: тот, кому удастся оставаться неподвижным на расстоянии *километра* от нее, будет испытывать «перегрузку» величиной около двухсот миллионов ($2 \times 10^8$) ускорений свободного падения на Земле: именно с таким ускорением выпущенные «из рук» предметы будут отправляться к центру. Впрочем, с «предметами» дело обстоит не очень хорошо: на таком расстоянии от центра притяжения и гайки, и муравьи, отправленные в свободное падение, будут пролетать уже в трудно узнаваемом виде. Любые два кусочка вещества, один из которых на 1 мм ближе к центру, чем другой, разрываются с силой, примерно в 400 раз превышающей их вес на Земле. Но на расстояниях, измеряемых десятками тысяч километров и более, такая черная дыра гравитационно проявляет себя как любое тело той же массы. *Если* Планета 9 — это и правда черная дыра, то единственный способ ее обнаружить — движение; придется и в самом деле разбрасывать гайки. Нужно только придумать, как эти гайки разогнать, чтобы они пролетели расстояние порядка 500 а.е. за время, делающее все приключение хоть сколько-нибудь зрелищным. Разбрасывать нужно сотни, если не тысячи гаек и получать от каждой сигналы о траектории ее движения; некоторые испытают неожиданные ускорения, свидетельствующие о присутствии «Планеты 9/Черной Дыры 0». В нашу пользу то обстоятельство, что достаточно разбрасывать почти буквально «гайки»: большие аппараты здесь совершенно ни к чему. А гайки, снабженные световым парусом, можно было бы разгонять, светя в них мощным лазером. Разгон флотилии «высокотехнологичных гаек» уже до одной сотой скорости света доставил бы их к предполагаемому месту действия меньше чем за год [156].

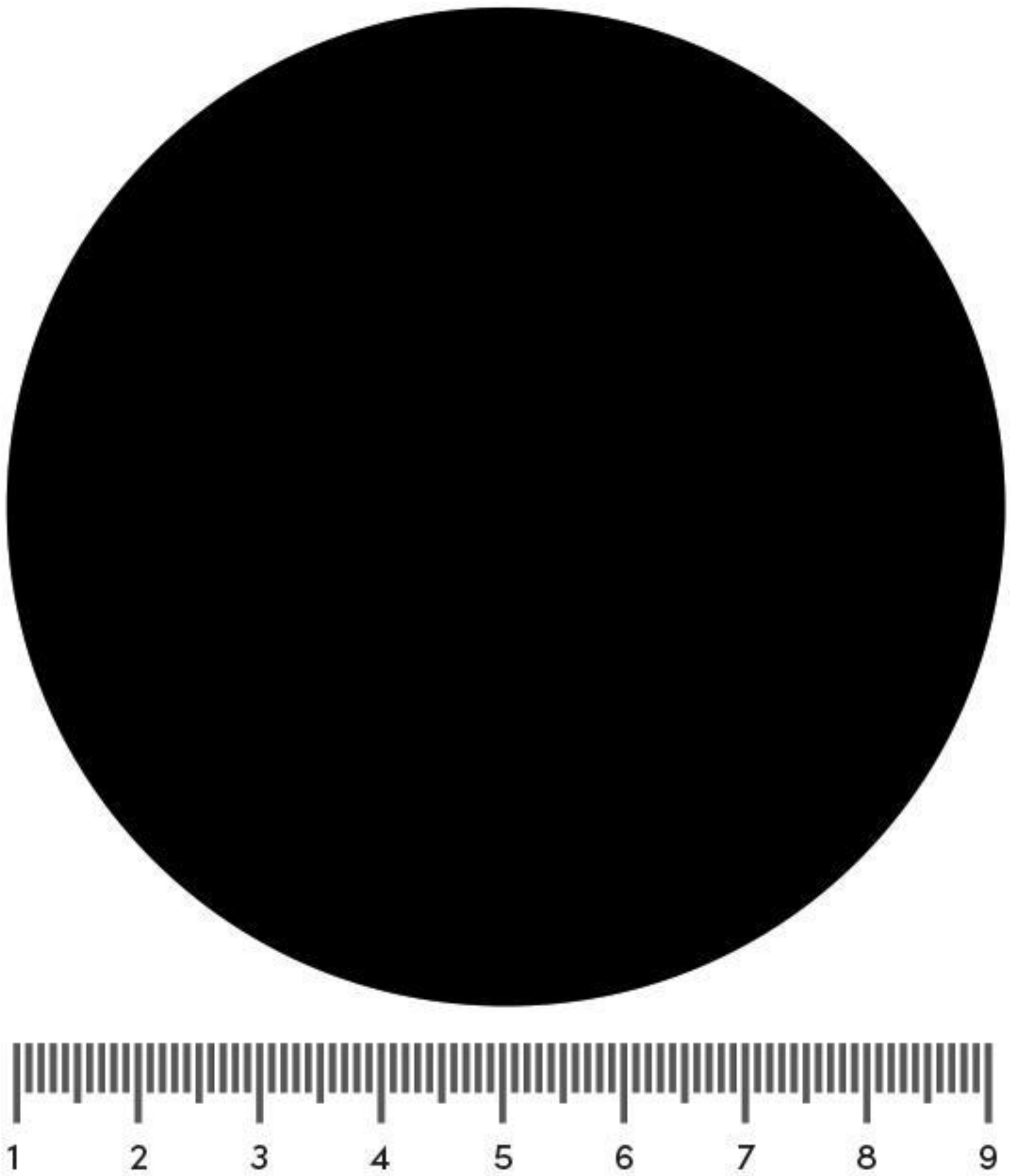



**Рис. 7.15.** Невращающаяся черная дыра массой 5 масс Земли в масштабе 1 : 1 (размер горизонта)

*****

**Два тела, поле и волны.** Задача двух тел, «образцово-показательная» в мире Ньютона, актуальна в эйнштейновской гравитации ничуть не менее, а скорее более: это задача про столкновения и близкие к ним выяснения отношений между любыми двумя объектами с сильной гравитацией. Такие объекты, если они не сверхмассивные, по необходимости компактны, и из известных нам это белые карлики, нейтронные звезды и черные дыры. Много нового случается, когда два таких объекта оказываются соседями (а это случается не безнадежно редко, потому что около половины всех звезд — двойные, а эволюция, которую претерпевают компоненты двойных звездных систем, *может* превратить их в компактные объекты). Сценарий «материя говорит… пространство-время говорит…» превращается здесь в оживленный диалог, в котором обе стороны высказываются одновременно, а вообще-то даже кричат. Запускаемая вблизи черной дыры гайка не сильно меняет кривизну, существующую из-за черной дыры, но черная дыра вблизи черной дыры — совсем другая история, там все происходит сразу: пространство-время и движение двух массивных тел подстраиваются друг под друга, а картина непрерывно меняется. Можно сказать, что полноценная задача двух тел в эйнштейновской гравитации, в отличие от ньютоновской, не решается на языке замкнутых формул по той причине, что субъектов там на самом деле не два, а три. Третий — Агент, гравитационное поле. Здесь он, кстати, обретает полностью самостоятельное существование: забирает «расплескавшуюся» энергию двух объектов, сходящихся по спирали во взаимные объятия, и уносит часть ее прочь — неопределенно далеко, в виде, который естественно назвать гравитационными волнами. Название, конечно, перекликается с электромагнитными волнами, но характер явления совсем иной.

Вдали от своего источника (скажем, двух черных дыр, неистово сближающихся по спирали) гравитационные волны бегут по пространству в виде «ряби» — колыханий метрики, которые тоже являются решением уравнений Эйнштейна (с учетом того, что *изменения* всех букв *абвгдежзик* небольшие). Согласно этим уравнениям, они распространяются со скоростью света. Если волна пролетает там, где пространство-время примерно плоское, то скучные значения *абвгдежзик*, отвечающие «Пифагору с одним минусом», т.е. $\begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -1 \end{pmatrix}$, становятся *чуть-чуть* веселее. Вместо некоторых нулей в этой таблице на короткое время «вспыхивают» какие-то числа, а единицы и минус единица оказываются не точно единицами и минус единицей. Чтобы лучше разглядеть происходящее, выберем три направления (условно — первое, второе и третье) так, чтобы волна путешествовала вдоль третьего направления. Тогда при прохождении гравитационной волны *абвгдежзик*-таблица приобретает чуть менее скучный вид

$$\begin{pmatrix} 1+A & B & 0 & 0 \\ B & 1-A & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -1 \end{pmatrix}$$

с очень малыми числами $A$ и $B$, которые еще и меняются с течением времени от положительных к отрицательным и обратно. Эти два числа независимы, и в разных гравитационных волнах они разные: уж какая пришла волна, такая и пришла. Волна несет энергию с объемной плотностью Е, пропорциональной $A^2 + B^2$; и даже не только энергию, а таблицу энергии-движения-сил

$$\begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \mathcal{E} & -\mathcal{E}/c \\ 0 & 0 & -\mathcal{E}/c & \mathcal{E} \end{pmatrix},$$

где, кроме слота энергии, заполнены еще слоты количества движения вдоль третьего направления и давления вдоль третьего направления.

Проходящая волна буквально меняет правила, по которым надо исчислять расстояния (и интервалы в пространстве-времени). Чтобы вообще можно было измерять расстояния, нужны как минимум два тела. Эффект гравитационной волны состоит в том, как изменяется расстояние между ними, — это явление типа приливных сил, что означает, что ответственна за него кривизна. Для гравитационной волны кривизна устроена заметно проще, чем в общем случае, показанном на рис. 7.5: в большой таблице уже 192 нуля и независимых компонент не 20, а только две, и они связаны с буквами $A$ и $B$ (кривизна чувствительна не только к тому, какие значения имеют *абвгдежзик*, но и главным образом к тому, как они меняются в пространстве и с течением времени).

### *Гравитационная волна — это путешествующие искажения в теореме Пифагора*

По своему влиянию на окружающий мир гравитационные волны не похожи на другие известные виды волн. Кривизна — это расхождение геодезических, и эффект гравитационной волны проще всего выразить, показав, что происходит с кольцом из гаек, «сидящих» каждая на своей геодезической (рис. 7.16). Буква $A$ из приведенной чуть выше *абвгдежзик*-таблицы отвечает за то, что кольцо сжимается в эллипс по одному направлению и растягивается по перпендикулярному к нему; затем сжатие и растяжение меняются местами. Буква *B* тоже отвечает за перемежающиеся сжатия и растяжения в двух направлениях, но под углом 45° к первым. Все это — в плоскости, перпендикулярной направлению распространения волны, а в самом направлении распространения никаких деформаций не происходит. В этом смысле гравитационные волны являются поперечными, они «стягивают и растягивают» только в стороны (причем так, что оставляют неизменным объем!). Космические установки для детектирования гравитационных волн телами, буквально «сидящими» на геодезических — свободно падающими, — только проектируются (предполагаются пробные массы в углах равностороннего треугольника с длиной стороны около 5 млн километров), а наземные установки фиксируют изменение расстояний между зеркалами в двух взаимно перпендикулярных направлениях. Эти изменения расстояния имеют порядок $10^{-19}$ м, что делает задачу их детектирования вызывающе непростой [157]. Эффект столь мал не только из-за малости энергии, которую несет гравитационная волна, но и из-за слабости ее влияния на материю (за что отвечает значение ньютоновой постоянной *G*, уже встречавшейся нам несколько раз). Эта слабость взаимодействия с материей прекрасна тем, что позволяет гравитационной волне путешествовать, практически не растрачивая себя на взаимодействие с материей по дороге и тем самым неся информацию о своем происхождении на очень значительные расстояния, но эта же слабость бросает вызов самым современным технологиям при попытке считывания этой информации. Разнообразных подробностей и остроумных решений, реализованных в детекторах гравитационных волн, очень много; перед их первым прямым обнаружением на установке LIGO в 2015 г. (столетие спустя после появления уравнений Эйнштейна; Нобелевская премия по физике за 2017 г.) сомнения оставались не столько в том, что они существуют, сколько в том, что ничтожно малые смещения удастся надежным образом обнаружить.

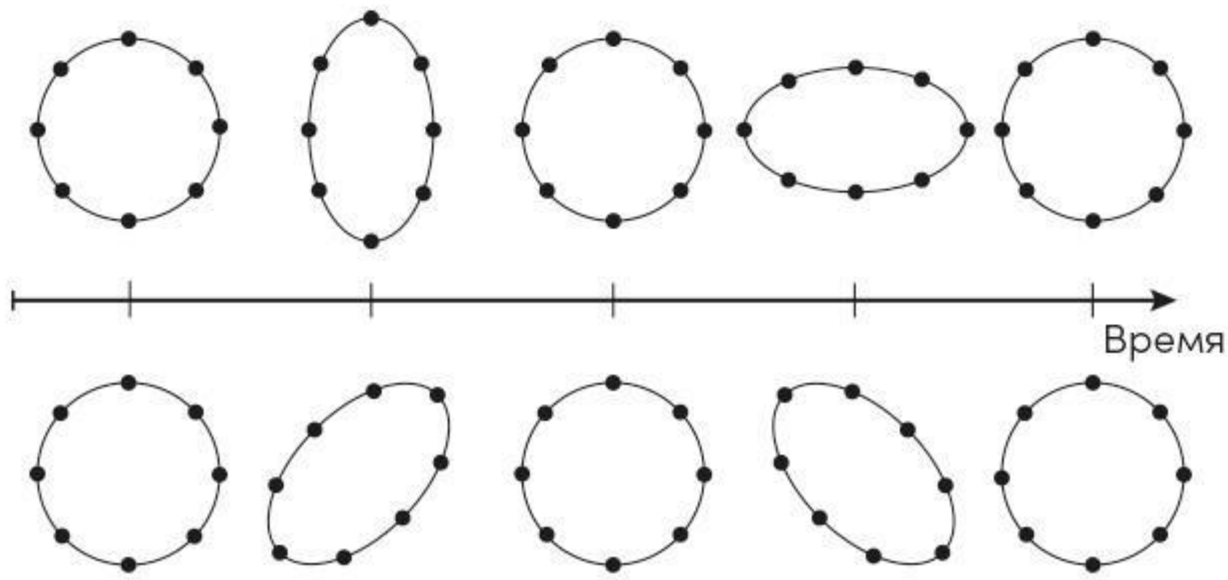



**Рис. 7.16.** Гравитационная волна говорит материи, как ей двигаться. Находящиеся на геодезических (свободно падающие) частицы расположены по окружности (связей между частицами нет, линии показаны только с целью подчеркнуть форму). Волна проходит перпендикулярно плоскости рисунка. Картинки слева направо — это кадры фильма, сделанные в начале, через четверть периода волны, через полпериода, через три четверти периода и через полный период. Наличие буквы $A$ в метрике вызывает деформации, показанные сверху, а наличие буквы $B$ — показанные снизу. В реальной гравитационной волне деформации двух типов накладываются друг на друга с различными относительными амплитудами

## *Движение свидетельствовало о гравитационных волнах*

Слишком больших сомнений в существовании гравитационных волн не было с тех пор, как излучение энергии в гравитационные волны косвенно измерили за счет движения тел. Открытый в 1974 г. пульсар PSR B1913+16, более известный как пульсар Халса — Тейлора (по именам открывателей и будущих нобелевских лауреатов), вращается вокруг своей оси 17 раз в секунду, и с такой периодичностью на Земле можно детектировать приходящее от него электромагнитное излучение. Пульсары — это вращающиеся нейтронные звезды, которые из-за своего вращения и сильнейшего собственного магнитного поля выглядят для далеких наблюдателей как космические маяки со строго периодическим сигналом. Но для пульсара PSR B1913+16 периодичность 17 раз в секунду искажалась сменяющими друг друга опережением и отставанием: цикл более раннего и более позднего прихода сигнала повторялся каждые 7 $^3/_4$ часа. Причиной этого должно было быть наличие второго тела и их совместное обращение вокруг общего центра масс; сдвиг сигнала по времени говорил, что орбита пульсара имела характерный размер менее диаметра Солнца, а значит, вторым телом не могла быть обычная звезда; случившееся везение, таким образом, состояло в обнаружении двойной системы из нейтронных звезд (вторая нейтронная звезда не проявляла себя как пульсар, по крайней мере ее излучение не было направлено к Земле). Массы всех нейтронных звезд должны лежать в некотором достаточно узком интервале, и, используя это знание вместе с анализом сигналов, удалось сделать заключения об орбите пульсара. Во-первых, поворот орбиты (памятные 43 угловые секунды в столетие для Меркурия) здесь составлял 4 *градуса в год*. А во-вторых, и это сейчас главное, имея представление об орбите и массе двух тел, из уравнений Эйнштейна можно оценить, сколько энергии уходит из такой системы в виде гравитационных волн. Отток энергии из двойной системы приводит к изменению орбит, а эти изменения отражаются в получаемом сигнале. Появляется возможность из (электромагнитных!) измерений узнать, действительно ли энергия уходит из системы гравитационно и уходит ли так, как предсказывают уравнения Эйнштейна. Ответ: да и да. Вся эта история производит на меня впечатление эффективным одновременным применением различных видов знания (и, конечно, методов наблюдений), позволяющих делать выводы о *движении*.

«Всплески» метрики могут не производить на материю большого впечатления после того, как они в виде гравитационных волн проделали путь в пару миллиардов световых лет; но в момент своего возникновения, скажем, при слиянии компактных объектов, они — полноправный участник событий. Максимального накала драма достигает при слиянии черных дыр: происходит перестройка геометрии, завершающаяся объединением горизонтов. Два куска искривленной пустоты, отрезанные от остального мира полупроницаемыми барьерами, становятся одним куском искривленной пустоты, отрезанным от остального мира полупроницаемым барьером: две черные дыры одновременно проглатывают друг друга. Часть энергии, которая расплескивается в виде гравитационных волн, совсем не мала даже по космическим стандартам: она может составлять несколько масс Солнца (как всегда в таких случаях, умноженных на $c^2$); как мы обсуждали выше, открылось бы немало возможностей, если бы эту энергию можно было как-то собрать вместе, сохранить и пустить на хорошее дело. А при подчеркнуто неравных массах сливающихся черных дыр *излучение* гравитационных волн производит эффект типа отдачи/пинка на черную дыру, получившуюся в результате слияния, отчего она может приобрести скорость до ста или более километров в секунду, а при особо удачной ориентации осей вращения — до нескольких тысяч километров в секунду. Сама интенсивность испускания гравитационных волн зависит от ориентации осей вращения по отношению к орбите сближающихся по спирали навстречу друг другу черных дыр; все это тоже можно в принципе извлечь из формы регистрируемого сигнала.

Гравитационные волны вызваны *движением* в космосе в условиях сильной гравитации (большой кривизны), и их детектирование — это новая возможность узнавать про то, как устроена Вселенная, через движение ее частей. Информацию несет в себе путешествующий на большие расстояния Агент, степень материальности которого Ньютон оставил на Усмотрение своих читателей. Среди них нашлись те, которые усмотрели.

## Добавления к прогулке 7

**Ньютон из замедления времени.** Общая теория относительности — эйнштейновская теория гравитации — радикально изменила взгляды на гравитацию, пространство и время, а заодно обогатила наши представления о движении. Но в «тепличных» условиях — если скорости относительно малы, а гравитация достаточно слаба — формулы эйнштейновской гравитации плавно переходят в законы Ньютона: уравнение геодезических — во второй закон Ньютона в присутствии силы притяжения, а уравнения Эйнштейна — в существенно более простое уравнение, из которого для точечных масс получается закон тяготения

(1.1). «Плавно переходят» означает здесь, что часть слагаемых в формулах становятся очень малыми и ими тогда можно смело пренебречь, а то, что после этого остается, и оказывается соотношениями ньютоновой теории. Упрощения получаются колоссальными, потому что «часть слагаемых» — это в действительности *почти все*. Как мы видели в начале этой прогулки, кривизна пространства-времени строится из *абвгдежзик*-таблицы, представляющей гравитационное поле. Слабая гравитация означает почти плоское пространство-время; если бы оно было строго плоским, т.е. гравитация отсутствовала бы вовсе, то, как мы видели, таблица приняла бы вид с тремя единицами, одной минус единицей и остальными нулями. А за «слабо неплоское» плоское пространство-время отвечает единственный элемент из всех *абвгдежзик*: это буква *г*, значение которой близко к «плоскому» значению –1, но все же несколько отличается от него; это записывают как *г* = –1 + $h$, и буква $h$ тогда отвечает за всю ньютоновскую теорию гравитации! Закон всеобщего тяготения Ньютона, собственно говоря, и получается из гравитации Эйнштейна во всех случаях, когда при малых значениях буквы $h$ (и с точностью до еще более малых величин) метрика имеет вид

$$\begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -1+h \end{pmatrix}$$

(вблизи поверхности Земли эта $h$ измеряется миллиардными долями). По такой таблице вычисляется кривизна; она чувствительна к тому, как $h$ изменяется в пространстве и во времени, но сейчас существенно только изменение в пространстве, потому что в теории гравитации Ньютона никакой зависимости от времени нет. В результате почти все компоненты кривизны оказываются равными нулю, и в Специальной упаковке кривизны остается одно-единственное слагаемое, выражающееся через эту $h$. Из всех уравнений Эйнштейна остается *одно*. Его левая часть выражается через $h$, а в его правой части, в том же «тепличном» приближении, из всей таблицы энергии-движения-сил остается только «самая неотъемлемая» форма энергии —

масса (на единицу объема, т.е. плотность). Полученное уравнение в результате говорит, что $h$, с точностью до множителя, — это так называемый гравитационный потенциал, причем в точности тот, который отвечает закону гравитации Ньютона [158].

### *Гравитация Ньютона — эффект искривления не пространства, а времени*

Это и означает, что ньютонов закон гравитации представляет собой серьезное упрощение эйнштейновского описания гравитации, получаемое, по существу, игнорированием большей части ее проявлений (разумеется, в рамках последовательной процедуры, из-за чего закон Ньютона и оказывается действенным инструментом в достаточно широких рамках). И с точки зрения геометрии пространства-времени, как мы видим из происхождения буквы $h$, вся ньютонова гравитация «вырастает» не из кривизны пространства и не из перемешивания пространства и времени, а только лишь из изменения хода времени.

**От инерции до «голографии».** Дополнительный контекст, определявший направление мысли Эйнштейна в период создания им его уравнений, был связан с фундаментальным свойством движения — инерцией. (Мы уже встречались с ней на прогулке 1; тема восходит к Галилею.) Эйнштейн надеялся, что открытые им уравнения заодно дадут *объяснение* инерции как свойства, определяемого распределением масс во Вселенной. Эта идея стала чуть позже известна как принцип Маха. Она и в самом деле восходит к Маху и сводится примерно к следующему: тела *потому* неохотно изменяют характер своего движения, что «где-то там» имеется запас материи («неподвижные звезды»), и именно ее присутствие и порождает свойство инерции. А если бы в пространстве было одно-единственное тело, то мы не могли бы говорить о его ускорении по отношению к чему бы то ни было (идея, далеко не враждебная принципу относительности) и, вероятно, у него не было бы и инерции.

Эти идеи влияли на ход рассуждений Эйнштейна; одно время он воспринимал свои уравнения как правила, по которым материя определяет метрику, и видел их обобщением принципа Маха (взаимодействие определяет инерцию). К концу 1916 г., менее чем через год после того, как Эйнштейн пришел к «канонической» (без лямбды) форме своих уравнений, интенсифицировались его дебаты по переписке с де Ситтером из Лейдена. Это было продолжение их личных бесед во время осеннего визита Эйнштейна в Нидерланды [159]. Начальной точкой послужила идея Эйнштейна о «бесконечно удаленных массах» и о том, как могла бы (как вскоре выяснилось — не могла) вести себя метрика при удалении в сторону этих «где-то-там» тел, предположительно ответственных за инерцию всех тел во Вселенной. Де Ситтер раскритиковал предложение Эйнштейна, тот согласился с критикой; отчасти отвечая на нее, в начале 1917 г. Эйнштейн и добавил $\Lambda$-слагаемое в свои уравнения. Найденное после этого решение для вселенной, неизменной во времени, Эйнштейн отправил де Ситтеру. Тот, исследуя это решение, обнаружил другое решение тех же уравнений (с добавленной лямбдой!), в котором, однако, не было вовсе никакой материи, а инерция на фоне разыгрывавшейся там геометрии никуда не девалась. Это вызывающее противоречие с принципом Маха породило несколько раундов дебатов, в ходе которых Эйнштейн искал аргументы, чтобы отвергнуть аргументы де Ситтера — показать, что его вселенная или не статична, или содержит материю в некоторой скрытой форме. Дебаты оказались крайне полезны, вовлекли нескольких других ведущих ученых и закончились тем, что Эйнштейн в общем признал «правомочность» решения де Ситтера. Принцип Маха получил «пробоину» — и не последнюю. Эта идея способствовала разнообразным дискуссиям, но как физический «принцип» ушла в прошлое.

Эйнштейн со временем отказался от принципа Маха в весьма явной форме. Что же касается «попутно» возникшей и привлекшей к себе внимание вселенной де Ситтера, то ее вариант, получивший несколько варварское название «антидеситтеровская», приобрел немалую популярность в последние десятилетия в связи с «голографическим принципом» — современным развитием теории, объединяющим идеи горизонта и квантового описания реальности.

**Расширяющаяся Вселенная — расширяющееся пространство?** В связи с расширением Вселенной не стихают дискуссии о том, можно ли говорить, что *пространство* расширяется. А вблизи черной дыры — искривляется, растягивается, закручивается и т.д. (вблизи вращающейся черной дыры — *вовлекается*). А что же еще, казалось бы, оно там делает? Но среди переменных в уравнениях Эйнштейна и уравнениях геодезических нет «пространства» — там есть только метрика *абвгдежзик*, т.е. указание на рецепт для исчисления расстояний. Аргумент строгих противников «расширяющегося пространства» строится на том, что расстояния между «точками в пространстве» — понятие бессмысленное, потому что эти точки надо как-то отметить: положить «туда» какую-то вещь, но тогда окажется, что мы измеряем расстояния не между «точками», а между вещами. Возразить на это особенно нечего, кроме того, что бывает страшно удобно говорить (и, главное, думать), что пространство искривляется, растягивается, закручивается и т.п., — настолько удобно, что мне интересно, как часто *они сами* так думают. Но это снисходительное умонастроение доводит и до рассуждений о «ткани пространства», иногда — о «текстуре пространства» (*the fabric of space*). Звучит, без сомнения, красиво; но, встречая такое, я примерно через раз все-таки вспоминаю, что никакая «ткань», кроме метрики, науке на данный момент не известна.

**Кто главный в уравнениях Эйнштейна?** Уравнения Эйнштейна выражают связь двух составляющих реальности: геометрии пространства-времени и материи. Чья забота обеспечить, чтобы равенство выполнялось, — геометрии или материи? Согласие есть продукт непротивления сторон; когда мы говорили об уравнениях движения на прогулке 1, сначала это звучало так, будто требования предъявляются к движению: уравнения определяют, как двигаться телам при наличии данных сил. Но как только сами силы — скажем, силы притяжения — начинают зависеть от взаимного расположения объектов (а потому и от их движения), отношения делаются взаимными: движение должно быть таким, что его изменение определяется силами, которые возникают в текущей конфигурации участников этого движения.

«Согласие» между свойствами материи и геометрией, управляемое уравнениями Эйнштейна, тоже есть результат «совместной настройки», но акцент, пожалуй, зависит от контекста. Фраза Уилера про уравнения Эйнштейна — «материя говорит пространству-времени, как ему искривляться» — звучит так, будто материя всецело командует тем, в каком пространстве-времени она готова жить. Так первоначально был склонен полагать и Эйнштейн (хотя потом до некоторой степени передумал). Примерно так дело и обстоит, например, когда «излишне» много материи не может оставаться материей и превращается в черную дыру, создавая горизонт. Ситуация похожа и в том случае, когда нас интересует пространство-время Вселенной в целом: в правую часть уравнений мы загружаем то, что нам известно про материю, а потом из уравнений определяем геометрию и обнаруживаем, что Вселенная расширяется или сжимается. Но вообще-то распределение материи нельзя задавать совершенно произвольно: как следствие математической структуры уравнений Эйнштейна их правая, «материальная», часть — энергия-движение-силы — должна удовлетворять некоторым условиям, которые уже включают в себя метрику (*абвгдежзик*-таблицы). Наличие этих условий нельзя не приветствовать, потому что они выражают локальные законы сохранения, но присутствие в этих законах сохранения метрики, которую следует определить из самих уравнений Эйштейна, означает, что материя и геометрия *взаимно* «настраиваются друг на друга». Высказывание Уилера, звучащее так, что материя распоряжается никого не спрашивая, требует, строго говоря, корректировки; но я полагаю, что Уилер (понимавший происходящее заведомо лучше меня) едва ли был готов сформулировать свой лозунг как «материя, тензор энергии-импульса которой имеет нулевую ковариантную дивергенцию, говорит пространству-времени, как ему искривляться, обеспечивая при этом сохранение нулевой дивергенции».

Конструкторы ворп-драйвов в нескольких вариантах (как и конструкторы червоточин/«кротовых нор», о которых здесь совсем нет места говорить) смотрят на отношения геометрии и материи с другой стороны, позволяя вовсю командовать геометрии: они задают геометрию пространства-времени, которая реализует их чудо технологий, а потом интересуются, какие свойства материи могли бы обеспечить эту геометрию (другое дело, что материя неизменно получается экзотическая). Промежуточный, пожалуй, случай взаимоотношения правой и левой частей уравнений Эйнштейна — это ускоренное расширение нашей Вселенной: известная нам материя «говорит» геометрии расширяться по Фридману, но не в состоянии породить ускоренное расширение; обнаружив же это ускорение из наблюдений, мы ищем ту материю, которую надо *добавить* к известной нам, чтобы в соответствии с уравнениями она «напоминала» геометрии об этом ускорении.

**Тупики движения и конец времени.** Падение в черную дыру (для простоты — черную дыру Шварцшильда) *прекращается* при достижении ее центра. После этого с тем, что туда падало, больше *ничего не происходит* — не в том смысле, что «ничего нового», а в том, что больше нет времени. Нет никакого способа продолжить время далее этого момента; его просто не существует.

*Время заканчивается с попаданием в центр черной дыры*

Формально там, в центре, кривизна пространства-времени делается неопределенно («бесконечно») большой, и один из способов заявить это — сказать, что в центре черной дыры решению уравнений Эйнштейна нельзя придать смысл; точка, где смысл теряется, называется сингулярностью, и в центре черной дыры, стало быть, имеется сингулярность. Здесь, однако, есть знаменательная тонкость, потому что в такой точке смысл теряет метрика пространства-времени (*абвгдежзик*-таблица), но ведь именно метрика определяет геометрию и в силу этого является образующим элементом пространства-времени; поэтому если в какой-либо точке не существует никакой метрики, то саму эту точку нельзя включить в пространство-время. *Наличие* сингулярности в некоторой точке поэтому скорее следует воспринимать как *отсутствие* самой этой точки, ее «изъятие» из пространства-времени..

В таких точках имеющаяся теория гравитации доходит до собственного отрицания. Но неизбежно ли их появление? Вопрос представляется сложным, в том числе и потому, что имеющаяся в нашем распоряжении теория оперирует с пространством-временем, и выводы ее должны быть сформулированы в терминах пространства-времени, а не точек, которые к нему *не относятся*. Замечательным образом, однако, внутри пространства-времени нашлись ресурсы, чувствительные к таким «изъятым» точкам. Это поведение геодезических: возможность или невозможность продолжения их в неопределенно далекое будущее. Будут ли запущенные по ним часы всегда тикать дольше любого наперед выбранного отрезка времени, или же некоторые геодезические куда-то «утыкаются» и время вдоль них кончается? [160] Оказалось возможным обсуждать сингулярности во внутренних терминах пространства-времени — как появление в нем семейств «утыкающихся» геодезических.

### *Сингулярности — тупики геодезических, конец движения и времени*

В черной дыре Шварцшильда все геодезические, зашедшие под горизонт, утыкаются в ее центр. Но такая черная дыра — очень специальный пример пространства-времени. А если взять *достаточно общее* распределение материи, то можно ли подчинить его каким-то условиям, чтобы в пространстве-времени не было утыкающихся геодезических?

Нельзя, если принять несколько достаточно общих предположений — из числа тех, которые мой коллега и соавтор, обсуждая математические высказывания, квалифицирует как «разумное, доброе, вечное». В данном случае они включают общую теорию относительности, несколько «технических» предположений о пространстве-времени, а также свойство типа положительности энергии (на основе всего, что мы знаем, это очень естественное предположение). Их можно принимать в нескольких различных вариантах, но каждый раз удается вывести из них утверждения о неизбежности непродолжаемых геодезических. Общий вывод состоит в том, что (если не покушаться всерьез на «разумное, доброе, вечное») с математической неизбежностью возникают такие геодезические, которые утыкаются в точку и там заканчиваются; никуда далее продолжить их невозможно. Эти математические теоремы, первые из которых были установлены в середине 1960-х, повлияли на «серьезность» отношения к черным дырам: их стали воспринимать не как экзотические конфигурации, а скорее как проявление общего правила о возникновении непродолжаемых геодезических.

Половина Нобелевской премии по физике за 2020 г. была присуждена Р. Пенроузу за доказательство неизбежности непродолжаемых геодезических. На них *кончается движение* падающего объекта, а заодно кончается его время и предоставленное ему пространство. При этом, конечно, стоит еще раз вспомнить, что общая теория относительности, входящая в качестве условия в доказанные теоремы, сама должна нарушаться квантовыми эффектами; из-за этого при приближении к «изъятым» точкам на расстояния, сравнимые с $10^{-33}$ см, само понятие *геометрии* пространства-времени становится бессмысленным. Видимо, материя и геометрия там уже не являются чем-то, что лишь *взаимодействует друг с другом*, а вместо этого материя и пространство-время существуют нераздельно в виде неизвестного нам явления (и лишь на больших масштабах эти две сущности ведут относительно независимое существование, поддерживая «воспоминание» о своем былом единстве через уравнения

Эйнштейна). Однако мы довольно далеки от понимания, что там происходит, и на современном уровне знания неизбежные «тупики» геодезических — это просто конец движения и времени для тех, кому случилось там оказаться.

## Признания и литературные комментарии

Таблица кривизны формата 4 × 4 × 4 × 4 называется тензором Римана, а формата 4 × 4 — тензором Риччи. «Специальная упаковка кривизны» — это модифицированный тензор Риччи, называемый тензором Эйнштейна по причине его присутствия в уравнениях Эйнштейна. В метрике десять компонент (которые я довольно нетрадиционно обозначаю *абвгдежзик*), но четыре из них произвольны из-за возможности произвольного переопределения четырех координат (включая время); вырастающую отсюда тему калибровочной инвариантности гравитации я обхожу полным молчанием, хотя она немало сбивала Эйнштейна с пути в период придумывания общей теории относительности. Цитату Дирака по поводу минус единицы, приведенную в его воспоминаниях, можно найти в сборнике [12], но собственно статья, давшая название всему сборнику, доступна также на сайте журнала «Успехи физических наук» https://ufn.ru/ru/articles/1987/9/c/. Определенно не лишено интереса и сопоставление алгебры и геометрии, которое Дирак обсуждает там сразу после минус единицы. В профессиональное описание связи метрики и кривизны в книге [18] включены и «общеразъяснительные» рассуждения — с иллюстрациями и даже с эмоциональными высказываниями («Кривизна! Наконец-то!»).

О Фридмане написано много; достаточно полное изложение имеется в книге [105] — полное в отношении не столько биографических подробностей, сколько позиционирования его работ по отношению к предыдущим результатам Эйнштейна и последующим Леметра, Робертсона и Уокера (и Хаббла). (Там же в немалых подробностях обсуждаются взаимоотношения общей теории относительности и принципа Маха.) Сжатое «формульное» изложение вселенных Фридмана имеется в лекциях Кэрролла по общей теории относительности [52]. В «бесформульном» виде основные положения, касающиеся расширения и вообще устройства и «наполнения» Вселенной, приведены в книге [20]. Рассказ об устройстве Вселенной, включая роль гравитации в ней, имеется и в книге [36]. Мои вселенские персонажи А[нна] и Я[ков] неявно присутствуют, как выяснилось после их появления на этих страницах, еще и в заглавии книги о Вселенной [27]. Особенности «внутреннего» взгляда на удаление «всего от всех» в ходе расширения Вселенной разобраны в [33]. Темп расширения Вселенной несколько менялся за время ее существования, из-за чего граница между наблюдаемыми и ненаблюдаемыми частями не определяется в точности тем, что скорость удаления источника от наблюдателя превышает скорость света в момент излучения, а задается более сложным образом. Ряд технических подробностей, однако, не меняет того факта, что из-за расширения и из-за конечности скорости света наблюдаемая Вселенная оказывается конечной. Тонкие моменты, связанные с тем, что мы можем видеть некоторые галактики, удаляющиеся от нас быстрее света (и, мало того, удалявшиеся быстрее света в момент, когда они испустили тот свет, который мы наблюдаем), рассматриваются в работе [61]; обсуждение ее можно найти в [21].

Я привел приближенное современное значение постоянной Хаббла. Оценка ее величины — результат сложных, системных наблюдений, и она может несколько меняться по мере появления новых данных. Некоторое расхождение в ее значениях, получаемых разными методами («напряжение Хаббла», если использовать кальку с английского), — двигатель прогресса в понимании устройства мира. Здесь стоит заодно оговориться, что масштаб, на котором Вселенную с очень хорошей точностью можно считать однородной и одинаковой по всем направлениям, может еще потребовать уточнения: тот факт, что на достаточно больших масштабах Вселенная «чуть менее одинакова», чем считалось ранее, может как раз вносить вклад в «напряжение Хаббла». И еще один момент, который не помешает упомянуть лишний раз: под Большим взрывом я понимаю именно (момент перехода Вселенной в) плотное горячее состояние, а не момент ее рождения из чего-то еще; между этими двумя ключевыми событиями, согласно современным представлениям, помещается короткий, но впечатляющий период космологической инфляции. Горячей и плотной (и расширяющейся) стала «вся-вся» Вселенная — не только «наше яблоко», которое с тех пор расширилось во все, что мы наблюдаем, но и все «соседние яблоки», наблюдать за судьбой которых мы не в состоянии и никогда не будем в состоянии; о них, мыслимых как нечто единое, говорят как о Мультиверсе (хотя это слово может пониматься и *еще* более расширительно, см. [31]). Единственная очевидная вещь, которая их объединяет, — общий Большой взрыв (который, напомним, указывает не на точку в пространстве, а на специальный момент времени); он случился *везде* — даже «более везде», чем во всей наблюдаемой Вселенной.

Впечатления Уилера о Гёделе доступны по ссылке https://youtu.be/Ml1MpjEd5js. Рисунки, изображающие, как выглядит Гёделева вселенная, взяты из работы [49] и представляют собой результат точных вычислений световых геодезических в метрике Гёделя. На странице https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1367–2630/15/1/013063, где лежит статья [49], в качестве дополнительных материалов доступны еще и анимации происходящего в такой вселенной.

В обзоре [88] рассматриваются варианты метрики, отвечающей ворп-двигателю. В относительно недавнем обзоре [101] обсуждается несколько способов путешествия быстрее света; оттуда взяты диаграммы на рис. 7.11. На сайте NASA доступна презентация о ворп-двигателе, название которой несколько вызывающим образом фокусирует внимание на слове «оптимизация»: https://ntrs.nasa.gov/archive/nasa/casi.ntrs.nasa.gov/20130011213.pdf. Более серьезно оптимизация ворп-двигателя, и не только она, рассмотрена в статье Introducing Physical Warp Drives [161], появившейся после того, как все вышесказанное уже было написано, поэтому прокомментировать ее придется здесь. В ней обращается внимание сразу на несколько важных моментов. Во-первых, «распространяющийся пузырь» с плоским пространством внутри может лететь и с досветовой скоростью (что тоже может оказаться неплохо), и для этого *не* требуется отрицательная энергия. Во-вторых, огромное количество отрицательной энергии, требуемое для ворп-драйва Алькубьерре, по крайней мере отчасти вызвано тем, что там довольно неестественным образом предполагается полностью плоское пространство всюду вовне пузыря; другими словами, там требуется, чтобы масса/энергия, заключенная в его стенках, не оказывала никакого внешнего гравитационного эффекта, что выглядит слишком жестким требованием. Ненужно жестким оказывается (это в-третьих) и требование, чтобы часы внутри шли в том же темпе, что и снаружи; это, вообще говоря, совершенно не обязательно, и в «более естественных» вариантах время путешественников течет медленнее с точки зрения внешних наблюдателей. И более того, соотношение того, что внутри пузыря, с тем, как он видится снаружи, может быть сложным: в одном из обсуждаемых вариантов внутренность находится во вращении, что в принципе могло бы использоваться уже не как транспортное средство, а скорее как маховик — накопитель энергии (извлекаемой способом, подобным бросанию предметов под эргосферу вращающейся черной дыры). И наконец, четвертое, но, пожалуй, главное: ошибочно утверждение, что алькубьерровский пузырь и близкие к нему ворп-устройства способны разгоняться и тормозить. Стоит только допустить *изменение* скорости устройства, как перестают выполняться законы сохранения энергии и количества движения. Это можно компенсировать или каким-то дополнительным полем (что меняет всю постановку задачи), или, возможно, изменением формы самого пузыря — но ни одного точного решения, которое описывало бы, как такое происходит, пока не найдено. Пузырь с плоским пространством внутри летит по Вселенной по инерции, с постоянной досветовой или сверхсветовой скоростью, и *использование* такой штуки, если она существует, оказывается делом крайне непростым.

Черная дыра вместо Планеты 9 и перспективы ее обнаружения обсуждались, в частности, в работах [100, 110]; ряд астрономов выразили недоумение по поводу этой идеи (Браун — немалое). Картина столкновения Млечного Пути и Андромеды взята из https://www.nasa.gov/mission_pages/hubble/science/milky-way-collide.html, где она приведена со ссылкой на NASA, ESA, Z. Levay and R. Van der Marel, STScI; T. Hallas, and A. Mellinger. Изображение на рис. 7.12 слева взято с сайта UCLA Galactic Center Group — W. M. Keck Observatory Laser Team; по ссылке http://www.astro.ucla.edu/~ghezgroup/gc/images_science.html можно найти аналогичные периодически обновляемые изображения. В UCLA (Калифорнийский университет в Лос-Анджелесе) работает, в частности, Андреа Гез, ставшая лауреатом Нобелевской премии по физике за 2020 г. «за открытие сверхмассивного компактного объекта в центре нашей Галактики». На том же сайте на странице http://www.astro.ucla.edu/~ghezgroup/gc/videos/ имеются ссылки на анимации, представляющие наблюдения за центром Галактики и реконструкцию происходящего там; оттуда же взяты изображения на рис. 7.13. Источник изображения на рис. 7.12 справа — ESO/MPE/S, Gillessen et al. (http://www.eso.org/public/images/eso1622b/).

Извлечение энергии вращения из черных дыр называется процессом Пенроуза. Автор идеи — также лауреат Нобелевской премии по физике за 2020 г., хотя и не в связи с *вращением* черных дыр, а, как было сказано, за «непродолжаемые» геодезические. Ему же принадлежит вывод о вероятном наличии предела для «степени раскручивания» черной дыры. Математически для черной дыры, которая вращается «слишком быстро», исчезает горизонт и более не прикрываемая им сингулярность предстает на всеобщее обозрение (*naked singularity*, что традиционно переводится как «голая сингулярность», но выразительнее, да и точнее — «обнаженная»). *Вероятно,* обнаженные сингулярности не могут появляться во Вселенной; Пенроуз выдвинул эту идею (известную как «принцип космической цензуры» — в смысле «космической благопристойности») и привел веские соображения в ее поддержку, но совсем строгого ее доказательства все-таки нет.

Как мы видели на двух последних прогулках, язык искривленной геометрии оказался очень продуктивным для описания гравитации; но вообще-то метрика (десятикомпонентный Агент) — не единственный и не самый общий способ описывать геометрии. Выбор в пользу метрики и только метрики сделал Эйнштейн, в результате чего и получилась общая теория относительности — теория гравитации, описываемой через метрику. С тех пор изучались и до некоторой степени продолжают изучаться другие варианты (неквантовых) теорий гравитации, иногда вовлекающие дополнительные сущности. От всех таких неэйнштейновских теорий требуется, конечно, объяснить все то, что объясняет эйнштейновская; *если,* кроме того, появятся экспериментальные факты, которые какая-то из альтернативных теорий сможет объяснить лучше, то выбор будет сделан в пользу этой новой теории, а за общей теорией относительности останется статус «промежуточной» теории, открывшей идею кривизны, но оказавшейся не вполне точной. Даже если такое произойдет, значение и роль эйнштейновской теории в понимании гравитации и движения едва ли станут менее значительными.

## Движение на прогулке 7

Материя создает геометрию пространства-времени, т.е. гравитацию, согласно уравнениям Эйнштейна, в которых материя представлена несколькими своими атрибутами, в том числе энергией и количеством движения. Однородное и одинаковое по всем направлениям заполнение пространства пылью порождает расширяющуюся (или, в других условиях, сжимающуюся) вселенную. Расширение Вселенной, в которой мы живем, проявляет себя как необычный вид движения, которое наблюдается для любой пары далеких объектов, но у которого нет единой скорости: объекты удаляются друг от друга тем быстрее, чем больше расстояние между ними. Возрастание скорости удаления до скорости света и выше приводит к ограничениям на размер наблюдаемой Вселенной. Экспериментально обнаруженное ускорение этого расширения заставляет предположить существование темной энергии. Во вселенных с другими геометриями материя может демонстрировать не расширение, а другие виды движения вроде закручивания, распространяющегося и на свет. Управление геометрией не исключает в принципе существования «пузыря», на стенках которого сконцентрирована высокая кривизна, из-за чего он передвигается быстрее скорости света.

Движение пробных тел служит для определения массы и количества вращения черных дыр. Звезды, обращающиеся вокруг черной дыры Стрелец $A^*$, послужили такими пробными телами в центре нашей Галактики. Теоретическое знание говорит, что внутри эргосферы вращающихся черных дыр все тела приходят в движение вокруг черной дыры, которому принципиально нельзя воспрепятствовать. Там же, в эргосфере, возможны траектории движения, позволяющие извлекать энергию вращения из черной дыры: после разделения движущегося тела одна его часть исчезает в черной дыре, а другая вылетает наружу, забрав часть энергии вращения черной дыры. Движение двух сближающихся черных дыр (или других компактных объектов) вызывает передачу энергии гравитационному полю, возмущение в котором распространяется со скоростью света в виде гравитационных волн; относительно недавнее их детектирование позволяет нам получать недоступные ранее сведения о функционировании и устройстве Вселенной.

# ЧАСТЬ 3

# ОКРЕСТНЫЕ ПРОГУЛКИ

## Отложенная прогулка 8

## Движение рядом

Рядом с нами — в мире соразмерного нам масштаба — движется многое, включая животных, населяющих леса, тундру, степи, саванны, полупустыни и пустыни, горы и полярные области; птиц, в том числе перелетных, а также водоплавающих и нелетающих; жуков; пчел, ос и шершней; бабочек, стрекоз, мух; комаров и другого гнуса; пауков; головастиков в лужах и тихих водоемах. Постоянно, эпизодически или при необходимости движутся поезда, грузовые и пассажирские, включая подземные; движутся самолеты, вертолеты и дроны разной степени технической оснащенности; планеры и дельтапланы; роторы вертолетов, рули высоты самолетов, закрылки, элероны, предкрылки и интерцепторы на крыльях; движутся эскалаторы в метро и скрытые под ними шестерни; ленты транспортеров; детали и механизмы станков на фабриках и заводах; лифты в многоквартирных домах, гостиницах и торговых центрах; двери на петлях и раздвижные двери; поворачивающиеся дверные ручки; ключи в замках и личинки замков; открывающиеся окна и форточки; ножи кухонных комбайнов и кофемолок; роторы в пылесосах и роботы-пылесосы, ползающие по полу; барабаны в стиральных машинах; вентиляторы в компьютерах и других системах охлаждения и климатического контроля; стрелки, маятники и шестеренки в механических часах; облака в воздухе и воздух в виде ветра различной силы, вплоть до ураганов, а также в туннелях метро впереди поездов; аттракционы в парках; фуникулеры и горнолыжные подъемники различных типов; велосипеды, скутеры, сегвеи, мопеды и мотоциклы; трамваи, троллейбусы и автобусы; грузовые и легковые автомобили, внутри каждого из которых находятся в постоянном движении или время от времени приходят в движение коленчатый вал, карданный вал, распределительные, балансирные и приводные валы; маховик, поршни, клапаны, шатуны, коромысла, компенсаторы, ШРУСы, дифференциалы; вакуумные насосы, насос охлаждающей жидкости, топливный и масляный насосы; вентиляторы охлаждения двигателя и кондиционера, заслонки и клапаны термостатов; диски сцепления, шестерни и подшипники коробки передач, полуоси колес; приводы управления, стояночного тормоза, блока АБС, стеклоподъемников, замков дверей, регулировки кресел; электродвигатель стеклоочистителей и сами стеклоочистители, электродвигатель омывателя; тормозные диски, цилиндры в суппортах; рычаги, пружины и амортизаторы подвески; рейка рулевого управления, электро- или гидроусилитель, шарниры рулевой тяги; стрелки на приборах. Движутся лодки, катера, яхты, паромы, баржи, круизные лайнеры, сухогрузы, танкеры, еще не упоминавшиеся морские животные, а также рыбы в реках, протоках, заводях, прудах, водохранилищах, озерах, морях и океанах; движется вода в водопроводах и мощных гидрантах, в фонтанах и трубах отопления, в водостоках и канализации; в родниках, ручьях и текущих в океан реках с их притоками; в трансокеанских течениях, в Гольфстриме к северу и югу от экватора; в цунами, тайфунах, артезианских колодцах, извержениях, дождях, водоворотах, паводках, разливах, донных волнах, водоразделах, водопусках, гейзерах, водопадах, омутах, мальстрёмах, наводнениях, потопах, ливнях; движутся приводимые в действие водой, ветром или паром турбины и генераторы на электростанциях, разделяющие заряды для передачи и хранения энергии в электрической форме.

Все перечисленное, как и еще большее число неупомянутых явлений, связанных с движением, заслуживает подробного знакомства, для которого совсем не остается места на этих прогулках; от движения во внешнем космосе мы переходим, минуя близкий нам «земной» масштаб, к движению *внутри* вещей, определяющему их свойства и даже само их существование.

# ЧАСТЬ 4

# ВНУТРЕННИЕ ПРОГУЛКИ

## Прогулка 9

## Измельчение в незнание

**Маршрут:** *Растворенное движение и атомы. — Пыльца, Сфинкс и случайные блуждания. — Градусы раздробленного движения. — Равенство возможностей. — Вероятности: организованное незнание. — Мера и цена незнания. — Беспокойная сестра энергии. — Свобода, равенство и братство: последствия. — Неубывать иль нет? — Широко образованный демон. — Следы преступления Уилера. — Расфасовка света. — Квант действия.*

**Главный герой:** *незнание*

---

**Растворенное движение и атомы.** Воздух вокруг нас состоит примерно на 78% по объему из азота и на 21% из кислорода. Элементарные «куски» и того и другого — молекулы, которые сами по себе не являются ни «воздухом», ни вообще газом, — быстро *движутся*. Это движение ничем не регулируется, но вы *не* ожидаете, что 78% объема с одной стороны вашей комнаты займет азот, а 21% объема с другой стороны — кислород (как при этом поведут себя другие компоненты воздуха, занимающие по объему менее одного процента, едва ли будет в фокусе вашего внимания на фоне уже произошедшего). В несуразном мире, где такое могло бы время от времени случаться, у всех обитателей, дышащих кислородом, наверняка развились бы интересные биологические приспособления. Сложнее было бы и с использованием любого вида огня: поддержание устойчивого пламени требовало бы специального перемешивания воздуха. Зато подобное «саморазделение» происходило бы не только по составу, но и в отношении других величин, нарушая привычный порядок вещей: средне нагретые области делились бы на горячие и холодные (или иногда на очень горячие и очень холодные), в том числе внутри жидких и твердых тел.

В нашей Вселенной то, что смешивается, смешивается навсегда, а движение тел, касающихся друг друга, дробится и «проваливается» вглубь материи. Движение бильярдных шаров в идеале (приближение к которому делает реквизит все более дорогостоящим) перераспределяется между ними без потерь в момент соударения, а далее сохраняется; в реальности же движение в конце концов «исчезает», шары останавливаются [162]. Движение соударяющихся «податливых» предметов исчезает почти сразу: автомобиль на испытательном полигоне, встречая препятствие типа стены, деформируется и перестает двигаться. Любое движение вокруг нас, если его специально не поддерживать, останавливается из-за трения, но при ближайшем рассмотрении оказывается, что *энергия* движения никуда не делась, а только изменилась в качестве: она «раздробилась» на множество крохотных порций, распределенных по ничтожно малым частям, из которых сложены не только автомобили и стены, но и все вещи вокруг нас, а кроме того, и мы сами. Достаточно с силой потереть ладони друг о друга, чтобы *ощутить* эту энергию. Энергия прячется во всех окружающих вещах — она присутствует там всегда, но извлечь ее «обратно», реорганизовав движение мельчайших деталей для совершения чего-то полезного, непросто.

Внутри окружающих нас тел движение находит «дно», проваливаться ниже которого — дробиться еще сильнее — некуда. В обычных условиях это «дно» составляют атомы и молекулы. Их так много, что самым первым, определяющим их свойством становится именно их массовое поведение, на фоне которого не так уж и важно, что собой представляет каждый из них. Принимая на себя или в себя движение, простые составляющие материи могут двигаться поступательно, обмениваясь энергией и количеством движения при столкновениях, *как если бы* они были бильярдными шарами; и/или вращаться, *как если бы* они были твердыми волчками; и/или испытывать колебания одних своих частей относительно других, *как если бы* эти части были соединены чем-то вроде пружин; и/или дергаться туда-сюда вблизи фиксированного положения, *как если бы* они были прикреплены к чему-то на резинке; и/или… Тот факт, что *при определенных условиях* они делают всё это, «как если бы» они были чем-то привычным, только сильно уменьшенным, не означает, что они этим и являются; но инерция мышления заставляет переносить на них картину типа «бильярдных шаров, только очень маленьких», поэтому каждое открытие свойств, никак в эту картину не укладывающихся, оказывается вызовом нашим когнитивным возможностям.

Еще в начале XX в. не так мало видных представителей научного и философского сообщества (Мах, Оствальд и, например, Менделеев в редакции своих «Основ химии» 1906 г.) относились к идеям атомизма с осторожностью, если не сказать скепсисом: притом что атомистическая гипотеза позволяла хорошо объяснить многие факты, ненаблюдаемость самих атомов — возможно, как тогда считалось, принципиальная ненаблюдаемость — вносила путаницу в статус этих концептуально удобных логико-математических конструктов. Вот эмоциональное описание происходившего:

> Кто бы мог подумать, что не когда-нибудь, а в 1900 г. люди будут сражаться, можно сказать, насмерть из-за вопроса, реальны ли атомы. Великий философ Эрнст Мах в Вене сказал «нет». Великий химик Вильгельм Оствальд сказал «нет». Но один человек на этом судьбоносном изломе столетий отстаивал реальность атомов, опираясь на прочный фундамент теории. Это был Людвиг Больцман… Возвышение человечества зависело в тот момент от зыбкого равновесия воззрений, потому что, если бы идеи антиатомизма в самом деле восторжествовали, наше движение вперед затормозилось бы на десятилетия, а возможно, и на сотню лет [163].

Вообще-то молекулы и атомы — не предел деления материи. Да, когда падающий молот ударяет в сваю, которую требуется забить в почву, вполне адекватный взгляд на «измельчение» движения состоит в том, что его предел — уровень атомов; но по-настоящему мощный удар вызвал бы внутри вещества такое движение, что заметная доля энергии ушла бы прочь в виде излучения — в некотором роде *изнутри* атомов. Если же в качестве *очень* продвинутого молота взять внешние оболочки звезды, падающие на ее (звезды) ядро, то энергия движения, которую они приобретают прямо перед ударом, дробится по носителям на масштабах, которые во многие десятки тысяч раз меньше, чем характерные атомы и молекулы, а итогом является уже не забивание сваи или нагрев, а появление сверхновой и производство элементов — создание новых атомных ядер. Тем не менее до поры до времени мы можем ограничиться атомами и молекулами в качестве самых мелких носителей раздробленного движения.

Движение (энергия движения, что я почти всегда буду подразумевать, хотя и не всегда буду говорить), «ушедшее» внутрь вещей, существует там в соответствии с некоторыми законами, сказать про которые, что они влияют на наш мир, было бы преуменьшением: дело не только в том, как много деталей машин *нагревается*, поглощая движение; среди прочего эти законы, возможно, определяют направление времени.

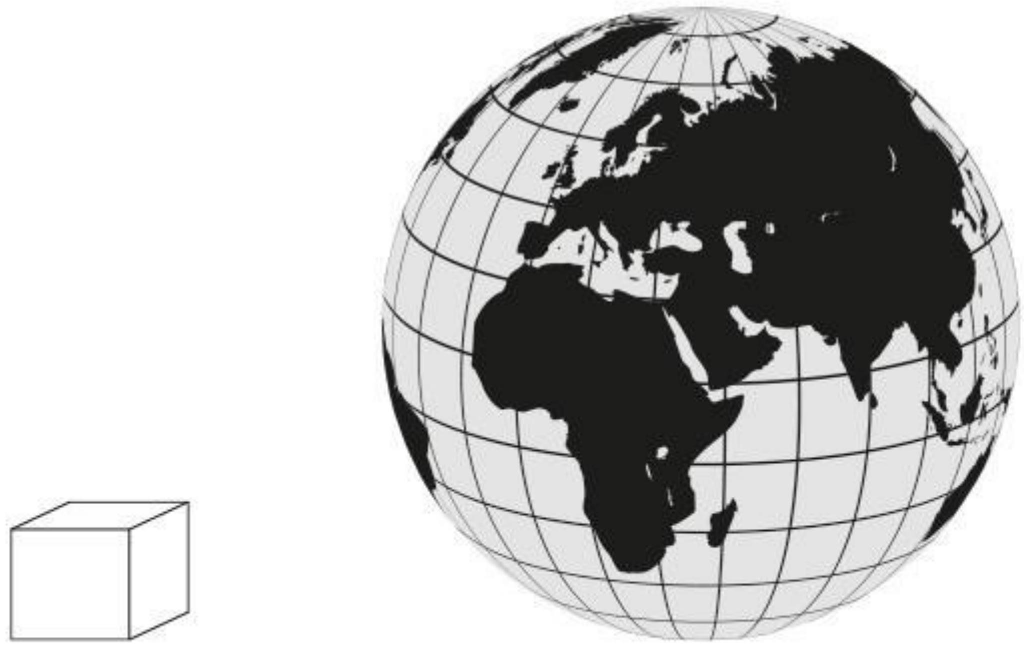


**Рис. 9.1.** Один кубический сантиметр воздуха (в масштабе) и Земля (не в масштабе)

Определяющая черта происходящего в том, что, раздробившись, движение принимает формы, не позволяющие за ним следить. Эта проблема *информационная*, но совершенно непреодолимая. Количество носителей движения в телах/объектах вокруг нас колоссально и характеризуется числом $6{,}022\ldots \times 10^{23}$: именно столько молекул имеется в определенном, относительно небольшом объеме (22,4 литра) воздуха при некоторых («нормальных») условиях. Нам сейчас важен только порядок величин, который можно выразить так. Если поверхность Земли расчертить на клетки 1 см × 1 см — т.е. превратить *всю* Землю, включая океаны, в уже встречавшуюся нам *клетчатую тетрадь* — и раскладывать молекулы по этим клеткам, то для заполнения всех клеток хватит молекул из *одного кубического сантиметра* воздуха (рис. 9.1), причем в каждой клетке окажется даже по *пять* молекул. Можно оценить масштаб информационной катастрофы, неизбежной при попытке просто записать, каковы, скажем, скорости всех молекул из 1 см$^3$ воздуха. Для записи скорости одной молекулы требуются три числа, скажем, десятизначных; чтобы закодировать одно из них, требуется 34 бита, итого три числа потребуют примерно 100 бит. Но в нашем кубическом сантиметре около 2,7 × 10$^{19}$ молекул. Запись их скоростей потребует примерно 300 000 000 *тера*байт. И переписывать всю эту информацию надо никак не реже 10$^{10}$ раз в секунду, потому что примерно с такой частотой каждая молекула сталкивается с другими; но поскольку одни молекулы не ждут других, обновлять картинку лучше 10$^{11}$ раз в секунду, а это означает, что частота перезаписи — 100 гигагерц. И все это только для записи скоростей; мы даже не обсуждали положение каждой молекулы в пространстве. Про задачу просто записать, что с ними происходит, можно довольно смело утверждать, что она не будет решена никогда. Задача *предсказать* движение молекул на компьютере, анализируя каждое их столкновение, тем более безнадежна; остается только восхититься тем, что в природе она непрерывно «решается» самими молекулами. Для описания же происходящего в мало-мальски серьезном объеме реального тела приходится придумывать какие-то другие средства, не требующие такого информационного безумия.

*****

**Пыльца, Сфинкс и случайные блуждания.** Постоянное оживление, в котором находятся не видимые ни глазом, ни под микроскопом молекулы, имеет, однако, *видимые* проявления. Это движение очень мелких, но все же различимых под микроскопом чужеродных частиц, попавших в жидкость. Его наблюдали многократно, но названо оно по имени ботаника Брауна, который занялся его исследованием в 1827 г., начав с частиц пыльцы в воде; эффект называется броуновским движением [164]. Браун повторял опыты с пыльцой не только от живых, но и от мертвых растений, а также с *разнообразными* другими агентами, вплоть до «крошечных осколков египетского

Сфинкса», очевидно, случившихся под рукой. Мелкие легкие частицы в воде испытывают более сильные толчки со стороны молекул воды то с одной, то с другой стороны и из-за этого «дергаются». Мир глазами броуновской частицы — это случайный выбор нового направления смещения «в каждый следующий момент времени», причем это мир с отсутствием памяти: каждый следующий пинок маленькая частица получает в направлении, никак не зависящем от направления предыдущего. В слегка упрощенном виде, но с сохранением всего главного происходящее неплохо моделируется, когда время и правда считается дискретным, а все пинки, получаемые частицей, — одинаковыми по силе. Из-за них в моменты времени, которые можно условно обозначить числами 0, 1, 2, 3, … (это никакие не секунды, конечно), частица совершает шаг в *какую-то сторону*. Если для начала представить себе одномерное движение, то возможностей для шагов только две: вправо или влево. На рис. 9.2 это вверх и вниз; там показаны приключения не одного, а трех блуждателей — просто для того, чтобы увидеть сразу несколько. Удаление блуждателей от места старта выражается в том, высоко или низко проходит соответствующая линия на рисунке. Вдоль горизонтальной оси отложено 5000 шагов. Для построения я использовал генератор (псевдо)случайных чисел, а в литературе к делу часто привлекается пьяница, который не может вспомнить, вправо или влево по улице ему надо двигаться, делает шаг наугад, падает, а когда поднимается, не помнит, в какую сторону он только что пытался идти, и снова делает шаг наугад. Для человека здесь труднее всего не падать и подниматься, а делать шаги по-настоящему случайно.

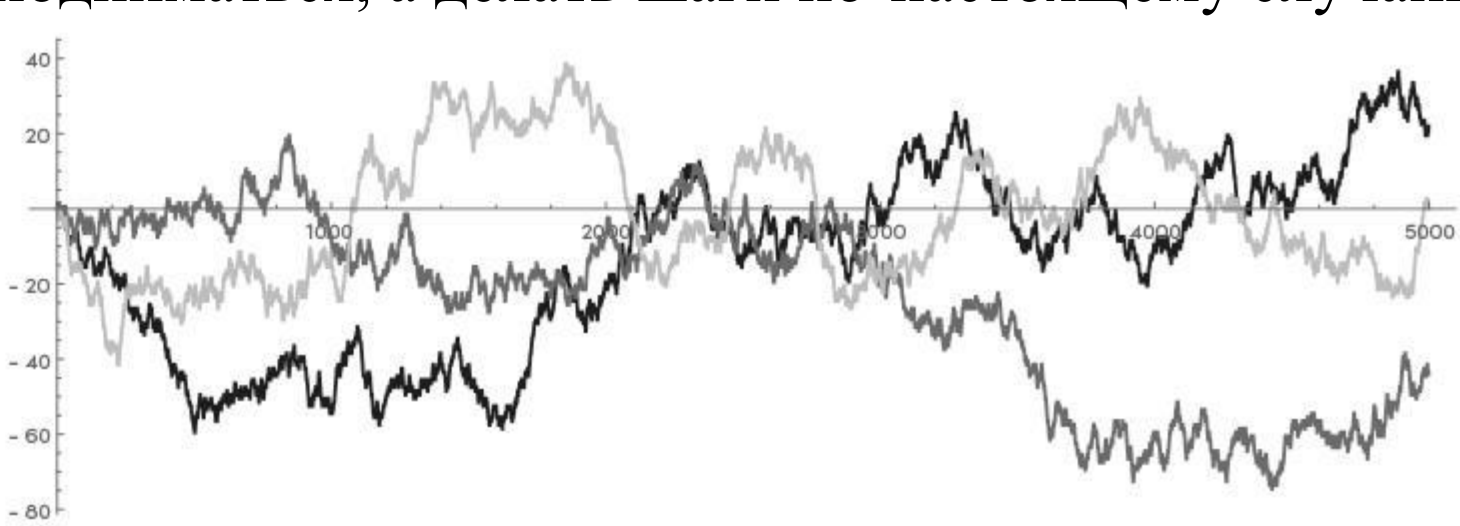


**Рис. 9.2.** Три реализации случайных блужданий «вверх-вниз» из 5000 шагов. На каждом шаге выполняется смещение на единицу вверх или на единицу вниз. Количество сделанных шагов («время») отложено по горизонтальной оси, а смещение от начальной точки — по вертикальной

Случайность блужданий без памяти имеет свои законы. Эти законы не могут ничего сказать про одного конкретного блуждателя: его приключения на то и случайны (хотя мы и *не* ожидаем всерьез, что он сделает миллион шагов подряд в одном и том же направлении). Но, представляя себе, что блуждателей много или даже что один и тот же энтузиаст проделывает подобное упражнение каждый вечер, вполне разумно интересоваться их судьбой *в среднем*. Если на расстоянии 30 шагов вправо по улице находится автобусная остановка и, единожды дойдя до нее, незадачливый персонаж останется там ждать автобуса, то как долго в среднем ему придется ходить туда-сюда, чтобы все-таки оказаться у остановки? Можно спросить и наоборот: на каком максимальном расстоянии от места старта побывает — скорее всего, побывает — блуждатель, если сделает 100 шагов? А если сделает 1000? При блужданиях в двух измерениях — по плоскости — аналогичный вопрос задается про время/число шагов, которое требуется, чтобы выйти из круглого парка. Примеры блужданий в двух измерениях показаны на рис. 9.3: это уже не графики отклонения в зависимости от числа шагов, а сами траектории случайных блуждателей на плоскости. На левом рисунке три блуждателя начинают из одной и той же точки; в каждый момент времени 0, 1, 2, 3, … каждый из них случайным образом выбирает направление и делает шаг длины 1. Общее свойство броуновских блужданий, вне зависимости от числа измерений, выражается в том, насколько далеко с течением времени уходят блуждатели. Ответ: максимальное достигнутое удаление от начала в среднем пропорционально квадратному корню из времени. Точнее, это квадратный корень, умноженный еще на некоторое число — оно важно для реального броуновского движения, но в нашей простой модели равно единице. Сделав 100 шагов, наш блуждатель удалится *в среднем* на 10 шагов от начала, а сделав 225 шагов

— на 15 шагов от начала. Уйти далеко оказывается не самой простой задачей: понадобится (в среднем) совершить 10 000 шагов, чтобы (в среднем!) достичь удаления в 100 шагов от начала. Конечно, чтобы общие закономерности восторжествовали, может понадобиться довольно долгое хождение. Для реализаций, приведенных на рис. 9.3 слева, например, оказалось, что один из блуждателей за 300 сделанных им шагов не ушел далеко от центра, а двое других проявили себя активнее (и по случайности все они разошлись в разных направлениях; вообще-то 300 шагов — это очень мало). Тем не менее при большом числе испытаний получается та самая картина квадратного корня из времени. Это совсем не похоже на движение тел, как мы его знаем: движение с постоянной скоростью означает, что расстояние растет так же, как и время: в три раза дольше означает в три раза дальше. В окружении же «раздробленного» движения, передающего блуждателю случайные пинки, требуется прождать в девять раз дольше, чтобы (в среднем!) получилось в три раза дальше [165].

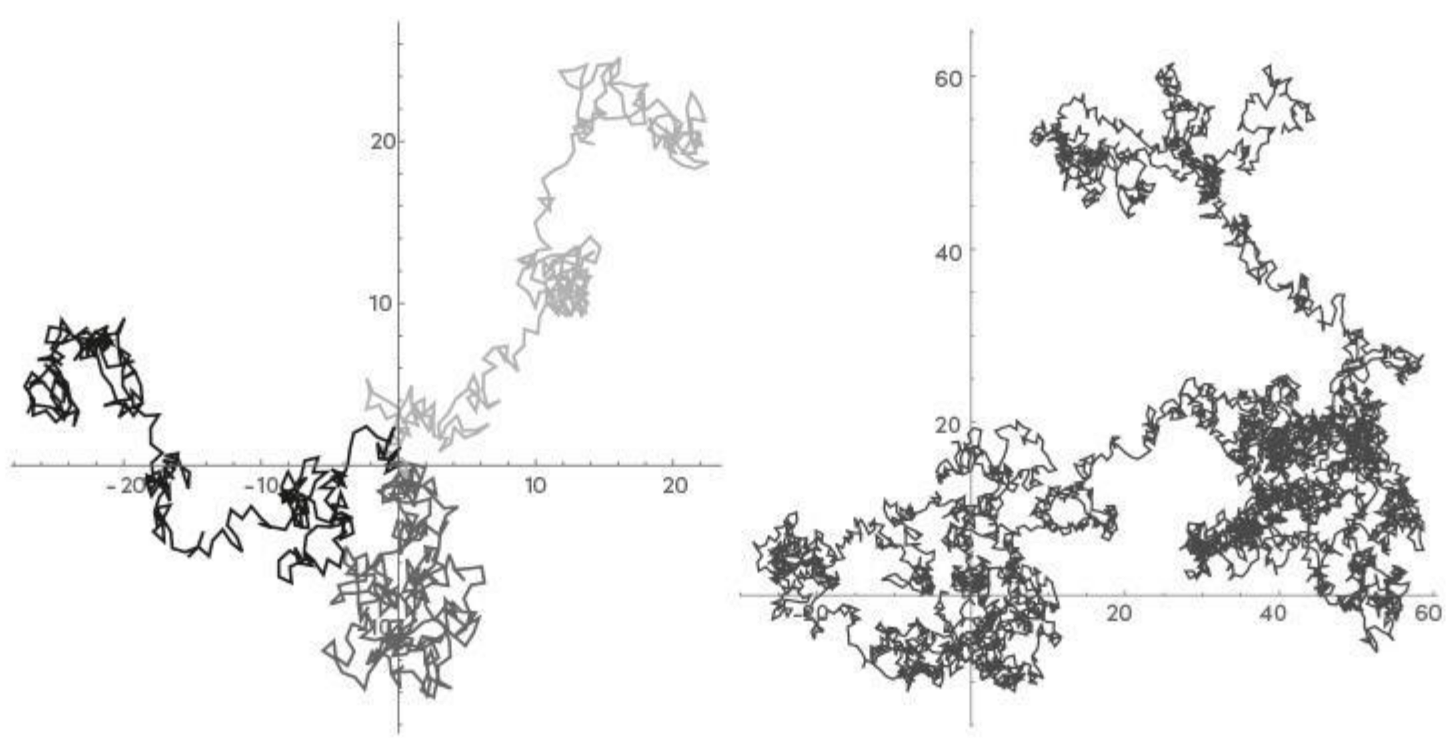



**Рис. 9.3.** Траектории случайных блужданий на плоскости. Длина каждого шага равна 1. *Слева:* три блуждания по 300 шагов каждое. *Справа:* случайное блуждание в 5000 шагов

Одна проблема с пинками, которые маленький «предмет» получает от молекул, оставалась нерешенной до начала XX в., — это несоответствие масштабов. Размер пыльцы (и, видимо, «крошечных осколков египетского Сфинкса») — около одного микрона, т.е. $10^{-4}$ см, а характерный размер молекулы воды, как мы сейчас знаем, $10^{-8}$ см, т.е. в 10 000 раз меньше (сами броуновские частицы видны в микроскоп, а молекулы/атомы нет). Даже при отсутствии ясных данных о размере атомов и молекул было понятно, что они *много* меньше, чем частицы, которым они передают свое движение. Кроме того, число столкновений, которые молекула испытывает каждую секунду (скажем, $10^{12}$ в воде), никак не соответствует возможностям человеческого глаза, который способен замечать движение лишь в интервале не менее 1/30 секунды (и микроскоп здесь ничем не поможет). Ответ появился в статье Эйнштейна, вышедшей в мае 1905 г. — примерно за месяц до статьи о теории относительности. Наблюдаемые смещения броуновской частицы — это итог сложения множества одиночных воздействий. Из механизма случайных блужданий удалось вывести, что все то огромное количество элементарных столкновений, которые претерпевает броуновская частица, приводит к ее среднему смещению на несколько микрон при времени наблюдения порядка минуты. Для того чтобы в моей модели на рис. 9.3 описать нечто похожее на *наблюдаемое* броуновское движение, следует, во-первых, продолжить его не до 5000, а до 500 000 000 000 шагов, а затем, чтобы смоделировать картину, наблюдаемую в микроскоп, сгладить всю мелкую рябь: для начала представить всю суету, происходящую на рис. 9.3 справа, в виде двух «больших» скачков, а затем произвести подобное огрубление еще *много* раз. Элементарных шагов в микроскоп не видно, а совершаются они один за другим так часто, что с нашей точки зрения воздействия на броуновскую частицу можно считать непрерывными. Она исполняет неклассический танец, демонстрируя совсем неньютоновский тип движения, у которого толком нет скорости, а есть только средние смещения. Такое понимание представляло собой расширение взглядов на движение вообще.

Реальное движение броуновской частицы отражает некоторые ключевые черты поведения окружающих ее молекул. Среднее смещение частицы зависит от температуры, а также от вязкости жидкости и (технический, но важный момент) от числа атомов/молекул, определяемого специальным образом (это уже встречавшееся нам число $6{,}022... \times 10^{23}$). Возможность определить это число, хорошо известное по своим разнообразным проявлениям, из наблюдения за броуновским движением заметно повлияла на преодоление скепсиса в отношении атомов [166]. Заодно Эйнштейн установил связь между случайными блужданиями и *диффузией*. Траектории на рис. 9.3 (особенно справа, где блуждатель делает больше шагов) не случайно напоминают «растворение» чернил в воде или молока в кофе. В основе диффузии лежат те же механизмы раздробленного движения и случайных блужданий, так что в результате тот же закон квадратного корня из времени описывает средние показатели того, как далеко распространилось в воде облако чернил [167].

Броуновское движение — движение без скорости, случайный процесс нерегулярных смещений, описываемых только вероятностно, — пример того, как наблюдение за движением видимого и размышления о его причинах позволяют делать заключения о невидимом; самих атомов и молекул не видно, но об их свойствах удается кое-что узнать. В более широком контексте броуновское движение стало междисциплинарным инструментом исследования и моделирования мира; разнообразные случаи его применения пересекают границы различных областей знания. Незнание подробностей заменяется тут на действие случайности, реализуемой в рамках некоторых предположений, а уже из них выводится знание о среднем поведении, некоторые проявления которого можно наблюдать.

*****

**Градусы раздробленного движения.** Невозможность знания о происходящем с самими молекулами в индивидуальных деталях требует некоторого «массового» описания. В широком смысле оно называется статистическим, и это единственный доступный нам способ понимать огромную часть мира. У многих обитателей Земли эволюционно развилась способность непосредственно воспринимать среднюю энергию движения молекул вокруг себя. Каждый из нас *чувствует* ее как температуру. «Более горячее» — это просто проявление большей энергии движения там внутри. Для выражения температуры можно использовать различные шкалы, но их смысл — средняя энергия «измельченного» движения. На рис. 9.4 показаны две бытовые шкалы (в градусах Фаренгейта и Цельсия), одна научная (в кельвинах) и еще одна, где температура измеряется буквально в тех же единицах, что и энергия, — похожие шкалы часто используют, но только не в быту, во всяком случае, мне не попадались в продаже термометры, калиброванные в зептоджоулях или миллиэлектронвольтах. Фаренгейт и Цельсий — это шкалы, установленные достаточно произвольным образом. Правило перевода между соответствующими значениями температуры $F$ и $C$ имеет вид $F = 9/5\ C + 3$. Но ни та ни другая шкала не обладает свойством «в два раза выше температура — в два раза больше энергия внутреннего движения». Чтобы добиться такого, каждую из них надо сдвинуть: перенести начало шкалы («нуль»). В результате подходящего сдвига из шкалы Цельсия получается шкала с эпитетом «абсолютная»: нулевая отметка на ней называется абсолютным нулем, а ее градусы и называются кельвинами (неправильное название, на которое я часто сбиваюсь, — градусы Кельвина). Для одного и того же состояния тела показания в кельвинах и в двух других шкалах связаны как $K = C + 273{,}15$ и $K = 5/9\ F + 255{,}372$. А из кельвинов перевод в энергию выполняется уже простым умножением: на 0,0207097, чтобы получить энергию в зептоджоулях (десять-в-минус-двадцать-первой-долях джоуля), или на 0,12926, чтобы получить энергию в миллиэлектронвольтах, как на моей придуманной шкале [168]. Именно из-за простоты перевода в энергию (одним умножением) все и любят абсолютную шкалу, терпя небольшие неудобства типа выражения «298 градусов» для температуры отличного летнего дня.

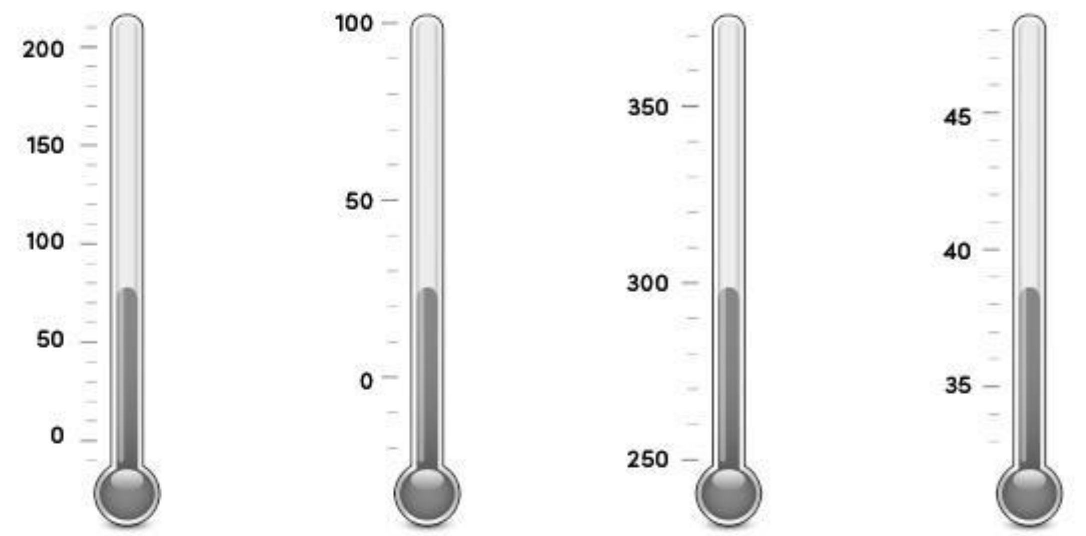



**Рис. 9.4.** Одна и та же температура, представленная в градусах Фаренгейта и Цельсия, в кельвинах и в миллиэлектронвольтах, непосредственно выражающих среднюю энергию движения одной молекулы: 77 °F = 25 °C = 298,15 K = 38,539 мэВ

При нуле градусов Цельсия средняя энергия движения одной молекулы равна числу, которое едва ли многое сообщает (5,657 зДж), однако более выразительные числа получаются, если вместо энергии движения поинтересоваться скоростью. Средние скорости, правда, зависят от массы молекулы: чтобы легкой и тяжелой молекулам «набрать» одну и ту же энергию движения, легкой приходится двигаться быстрее. При 0 °C молекулы азота в воздухе (те самые 78% по объему) движутся со средней скоростью 493 м/с, а чуть более тяжелые молекулы кислорода (21% объема воздуха, без которого для нас нет жизни) — со средней скоростью 461 м/с. Наконец, молекулярный водород, который почти в 16 раз легче кислорода (и который присутствует в атмосфере в «следовых», т.е. совершенно ничтожных, количествах), движется со средней скоростью 1904 м/с. Нагрев от 0 до 100 °C приводит к тому, что эти средние скорости увеличиваются до 576, 539 и 2148 м/с соответственно [169].

**Рис. 9.5.** Прыжок со специальным снаряжением с высоты около 38 км. Испытателю предстоит падение в более холодные слои атмосферы, чем тот, где находится аэростат; более теплые встретятся только ближе к поверхности

Если бы «молекулы воздуха» и могли заскучать в какой-нибудь банке, где ничего не происходит, то атмосфера Земли предоставляет им немало шансов развлечься из-за того, как температура изменяется с высотой над земной поверхностью. Температура на поверхности достаточно сильно различается в разных точках, но на границе тропосферы и стратосферы (в среднем около 12 км вверх, что, впрочем, означает от 9 км над полюсами до 17 км над экватором) она держится на уровне –60 °C или –70 °C. Маршруты дальнемагистральных пассажирских самолетов проходят чуть ниже, и командир корабля обычно сообщает о температуре за бортом около –50 °C. Граница тропосферы не задается в виде математически точно определенной поверхности, это до некоторой степени умозрительная конструкция типа Восточно-Сибирского моря, но мысленно отделять тропосферу от лежащей над ней стратосферы имеет смысл уже по той причине, что в стратосфере неожиданно делается теплее: от ее нижней границы на уровне 12 км до верхней границы (50–55 км) температура возрастает от –60 °C до «небольшого минуса», приближающегося снизу к 0 °C. Это не значит, что там можно находиться (рис. 9.5); но это в точности отражает ситуацию с движением молекул, средние скорости которых в верхней части стратосферы оказываются такими же, как в мягкую зиму вблизи поверхности Земли. Источник разогрева — ультрафиолетовая составляющая солнечных лучей, которая поглощается молекулами; в результате основная доля ультрафиолета не достигает земной поверхности, а молекулы там наверху разгоняются. Еще выше, в мезосфере (до 80–85 км), температура снова падает до –90 °С или даже сильнее. Но это еще не конец слегка парадоксальной истории. В лежащей *еще* выше термосфере (простирающейся, уже несколько условно, до высот 500–1000 км, в сильной зависимости от солнечной активности) температура поднимается до 1500 °С или даже 2000 °С — до полутора или двух тысяч, здесь нет опечатки в виде лишнего нуля; впрочем, температуры сильно (на сотни градусов) различаются днем и ночью, а также в период высокой и низкой солнечной активности. Термосфера — выразительный пример того, что температура выражает только среднюю энергию движения, но не сообщает больше ничего: молекулы (в основном уже атомы) в термосфере пролетают между столкновениями друг с другом целые километры, поэтому «согреться» там решительно не обо что. В пределах термосферы летает немало космических аппаратов, включая Международную космическую станцию (высота несколько более 400 км над земной поверхностью); трение об эти остатки атмосферы — второй по значимости фактор, после сплюснутости Земли у полюсов, влияющий на их орбиты (см. прогулку 4). Молекулы воздуха летают там и правда быстро: при 2000 °С атомарный кислород имеет среднюю скорость 1882 м/с, а атомарный водород — среднюю скорость, близкую к первой космической.

*****

**Равенство возможностей.** Энергию, которая уходит внутрь вещей, традиционно называют теплотой или (с ускользающей от меня разницей в смыслах) теплом. Тепло — это *энергия*, которую горячее тело передает холодному при их контакте, при этом происходит выравнивание их температур.

Измерения температуры отражают только *среднюю* энергию движения, и никто при этом не думает, что все молекулы в воздухе в углу вашей комнаты имеют одну и ту же энергию. Точно так же известная величина среднего дохода жителей города N не означает, что все они имеют в точности этот доход. Молекулы постоянно обмениваются количеством движения и энергией и поэтому решительно не в состоянии делить между собой энергию движения всегда поровну — вместо этого они *как-то* распределены по энергиям. Для только что упомянутых жителей их распределение по доходам определяется экономической и социальной политикой, но «кто регулирует», какая доля молекул имеет энергию в половину средней или в три раза больше средней? Имеются ли вообще какие-то элементы организации в молекулярном хаосе? На первый взгляд это довольно безнадежный вопрос, и перед погружением в него я предлагаю перерыв на кофе.

### *Молекулы делают все, что не запрещено законами сохранения*

Желая иметь горячий кофе под рукой в течение дня, вы можете налить его в термос («вакуумный сосуд»). Идея этого изобретения в том, чтобы запретить обмен энергией с внешней средой. В реальном термосе это удается с большим или меньшим успехом, но если времени прошло немного, а ваш термос все-таки не самый плохой, то из него не успеет уйти заметное количество энергии и на протяжении недолгой поездки на работу можно считать, что ваш кофе *изолирован* от внешнего мира. При этом разные части самого кофе успели прийти к общей температуре, даже если перед закрытием крышки вы доливали сверху горячего. Что бы «молекулы кофе» ни делали, их суммарная энергия равна той, которую вы фактически зафиксировали в момент завинчивания крышки. Молекулы могут реализовать это требование, двигаясь колоссальным числом разных способов: они могут вести себя как угодно, лишь бы их энергии складывались в то, что надо, — в пределах маленькой неопределенности, которую приходится допустить, потому что ничего нельзя задать совсем точно. Не имея возможности вдаваться в подробности молекулярного движения, мы тем не менее хотели бы делать *какие-то* заключения о поведении молекул. Какого типа могли бы быть такие заключения? При игре в карты незнание подробностей о расположении карт в колоде (при *скромном* числе 80 658 175 170 943 878 571 660 636 856 403 766 975 289 505 440 883 277 824 000 000 000 000 способов упорядочить 52 карты) побуждает нас оценивать *вероятности* возможных раскладов, учитывая весь небольшой объем доступной информации (скажем, о собственных картах). Аналогичная программа в отношении молекул состоит в том, чтобы оценить вероятности разных способов их обустройства — разных реализаций, удовлетворяющих требуемым условиям (фиксированная энергия, нулевое общее количество движения, нет общего вращения). Ситуация тут поначалу выглядит удручающе: как узнать вероятности, с которыми реализуются возможности, если мы не знаем, как в точности какая молекула взаимодействует с другими, и т.п.? Усмотрение того, что здесь можно найти простой и *работающий* ответ, ничего не зная о свойствах конкретной системы, а зная только, что это система из *огромного* числа движущихся «деталей», кажется мне одним из самых масштабных чудес в современном научном описании мира. Не все разделяют мое изумление, но они, вероятно, просто лучше меня понимают, как работают вероятностные законы в применении к движению огромного числа частей/частиц. На меня же происходящее неизменно производит такое впечатление, будто кролика вынимают из шляпы: мне все время кажется, что два незнания неожиданно складываются в знание.

Вот рецепт (он принадлежит Больцману). Ни одну из возможных реализаций — возможных способов распределить движение среди молекул — мы не в состоянии предпочесть другим. Поэтому мы считаем, что все реализации имеют одну и ту же вероятность. Это постулат. И это какой-то отчаянно гениальный постулат, потому что развить в себе интуицию, способную его подсказать, не так просто. Например, среди возможных реализаций имеется и такая, где *две* молекулы поделили между собой поровну почти всю внутреннюю энергию вашего кофе и движутся при этом с невероятными скоростями навстречу друг другу (чтобы не нарушить сохранение количества движения), а все остальные молекулы имеют ничтожно малые скорости, и поэтому их вклад в энергию очень мал. Постулат Больцмана говорит, что такая реализация *равновероятна* с любой другой, не запрещенной законами сохранения.

Из этого постулата выводится множество подтверждаемых на практике следствий, чем он, собственно, и обосновывается. Формальное наличие абсурдистских реализаций (две, или сто, или миллиард сверхбыстрых молекул, которые забрали себе почти всю энергию движения, а все остальные молекулы едва шевелятся) оказывается несущественным — буквально *пропадает* — на фоне огромного числа всех возможных реализаций. Постулат равновероятности приводит к отличным предсказаниям, платить же за этот практически «даровой» успех придется чуть позже и не совсем так, как можно было бы ожидать, — не неточностью предсказаний, а *необратимостью*.

*****

**Вероятности — организованное незнание.** Пока вы ехали на работу, ваш кофе в термосе был, оказывается, весь внутри себя равновероятен. Но если вы перелили кофе в обычную чашку *и он остыл* до комнатной температуры (зачем вы только брали термос?), то он попал в класс систем, которые встречаются гораздо чаще, чем изолированные: он оказался в контакте и равновесии с внешней средой. «Равновесие» означает не (только) то, что ваша чашка не опрокидывается, а в первую очередь то, что тепло не переходит из кофе в воздух или обратно — но не потому, что кофе изолирован! Над полной энергией внутри вашего кофе вы больше не властны: она определяется тепловым контактом с внешней средой. Некоторые из молекул отдают часть своей энергии внешней среде (стенкам чашки и воздуху), а некоторые другие получают ее оттуда. Этот обмен происходит безостановочно: микропорции энергии приходят, дробятся и сливаются, меняя своих носителей, а другие микропорции уходят вовне, но *в* *среднем* потока тепла нет — в чем и состоит тепловое равновесие. То же самое имеет место для молока в холодильнике через некоторое время после того, как вы его туда поставили. Большая внешняя среда, находящаяся при постоянной температуре, часто называется тепловой баней. В бытовом языке баня как-никак ассоциируется с жаром, но холодильник — фактически лучшее из доступных в домашних условиях приближений к «тепловой бане».

### *Тепловое равновесие — это не изоляция, а постоянный обмен малыми порциями энергии*

В случае теплового равновесия мы спрашиваем, с какой вероятностью нам может попасться молекула с какой-то интересующей нас энергией. Снова «кролик из шляпы»: на поставленный вопрос опять удается ответить, вообще не интересуясь подробностями внутреннего устройства кофе, атмосферы или космической плазмы. Этот ответ — одна из научных вершин XIX в., которая ничуть не потеряла своего значения и в наше время. Его можно получить (вывести) из больцмановского постулата о равнораспределении, используя минимальные дополнительные предположения [170]. Вероятность, что взятая наугад «простая составная часть» большой системы, пребывающей в тепловом равновесии, имеет какую-то энергию *E*, удается в результате представить в виде простой формулы, которую нужно будет привести хотя бы для того, чтобы оценить ее простоту. Словами она описывается чуть дольше, но я попробую, только сначала оговорюсь, что речь идет об *относительных* вероятностях. «Настоящие» вероятности устроены так, что сумма по всем возможностям («исходам») равна единице (например, 1/3, что пойдет дождь, и 2/3, что не пойдет). Если за этим не следят, то, значит, вероятности относительные [171].

Относительная вероятность, что встреченная молекула имеет определенную энергию движения, зависит от этой энергии: чем больше энергия, тем вероятность меньше. В какой степени меньше? Распоряжается здесь, как оказалось, геометрическая прогрессия. Это такой вид зависимости, когда увеличение энергии *на* фиксированную величину уменьшает вероятность *в* определенное количество раз. Конечно, геометрические прогрессии могут и возрастать: например, для некоторых напитков действует (по крайней мере, одно время действовало) очень грубое, но все-таки правило: каждые дополнительные шесть лет выдержки увеличивают цену вдвое. Двенадцатилетний — в два раза дороже, чем шестилетний; восемнадцатилетний — *еще* в два раза дороже. Двадцатичетырехлетний — надеюсь, идея ясна; боюсь только, мы сильно отвлеклись от кофе. Для молекул вашего кофе в чашке *убывающая* геометрическая прогрессия выдает вероятности в зависимости от энергии; получаемая вероятность *уменьшается* в определенное *число раз*, если вы решили поинтересоваться энергией, которая больше предыдущей, скажем, на 5 миллиэлектронвольт, и еще в такое же *число раз* для энергии, большей еще на 5 миллиэлектронвольт. А вот в *какое именно* число раз, определяется температурой. При низких температурах — в большое число раз (вероятности быстро уменьшаются с ростом энергии), при высоких — не очень. Высокая температура, другими словами, означает не только большую *среднюю* энергию движения, но и большую «терпимость» к энергиям выше средней (более энергичных молекул не так уж и мало).

И я обещал формулу, которая все это выражает в очень малом числе букв. Мы спрашиваем, какова относительная вероятность встретить молекулу с энергией вблизи выбранного значения $E$. [172] Вот она (семь букв и шесть символов, хотя можно записать и короче, пятью буквами и двумя символами): $\exp(-E/(k_\mathrm{B}T))$. Конечно, $T$ — это температура по абсолютной шкале (кельвины); кроме того, exp — это обозначение для участвующей здесь геометрической прогрессии, причем знак минус означает, что эта прогрессия убывающая: чем больше $E$, тем меньше вероятность. И еще здесь присутствует постоянная величина $k_\mathrm{B}$, решающая небольшую техническую проблему. Мы измеряем температуру в градусах, а энергию — в чем-то еще (эргах, или джоулях, или миллиэлектронвольтах, или киловатт-часах), поэтому, поделив энергию $E$ на температуру $T$, мы получим не «голое» число, а число с размерностью. Геометрическая же прогрессия умеет работать только с «голыми» числами, такими как –0,7. Чтобы они получились, надо «доделить» на постоянную $k_B$, которая специально для этого и придумана. Этот переводной множитель имеет фиксированное численное значение в зависимости от того, в каких единицах измеряются энергия и температура, и называется постоянной Больцмана.

Знание вероятностей, с которыми попадаются носители с любой заданной энергией, — это серьезное знание, открывающее немало возможностей: например, из него можно вывести, как именно молекулы в газе распределены по скоростям, да еще в зависимости от температуры. Получается, что среди легких молекул немало тех, которые летят в разы быстрее среднего; но скорости более тяжелых молекул в основном близки к средней. Это имеет последствия среди прочего для устройства атмосферы: высокие скорости молекул и атомов в верхних слоях атмосферы означают их расставание с Землей, как только им случится полететь в правильном направлении. Поскольку водород, будучи самым легким, и так в среднем летает быстрее всех, да еще его молекулы охотно приобретают скорость много выше средней, не стоит удивляться его отсутствию в атмосфере.

Совсем простое упражнение на применение найденных вероятностей — вычислить *среднюю* энергию молекулы. Вообще-то я уже проболтался, что должно получиться что-то вроде температуры, но вот и интересно посмотреть, что же именно. Найти среднее, имея дело с вероятностями, означает сложить все возможные результаты, умножив каждый на его вероятность. Если вы оказались в довольно примитивном казино, где подбрасывают монету и за выпадение орла вы получаете 45 рублей, а при выпадении решки отдаете 55, то в среднем за одно подбрасывание ваш выигрыш составляет $1/2 \cdot 45 - 1/2 \cdot 55 = -5$, т.е. за одну попытку вы в среднем теряете пять рублей. Одна вторая, дважды встречающаяся в этом расчете, — это вероятности выпадения орла и решки. Но если монета «подкручена» таким образом, что в 2/3 случаев падает

орлом, а в 1/3 случаев решкой, то в среднем за одно подбрасывание ваш выигрыш составит 2/3 · 45 – 1/3 · 55 = 35/3, т.е. 11 рублей, после того как вы отдадите копейки на благотворительность. В этой истории имеются две «ставки» (45 и –55) и соответствующие им вероятности (в последнем варианте 2/3 и 1/3); зная это, мы
определяем *средний* выигрыш. Точно так же надо поступить, чтобы найти среднюю энергию: «ставки» — это сами значения энергии $E$, а «подкрутки» — это вероятности, что встретится одно из этих значений, те самые $\exp(-E/(k_B T))$. Вычисление среднего «как в казино» — математическая процедура, и она дает однозначный ответ: $3/2\ k_B T$. (Именно эти $3/2\ k_B T$ и отложены на правом градуснике на рис. 9.4.) Средняя энергия движения одной молекулы отличается от температуры только неинтересным переводным множителем $k_B$ (задача которого в том, чтобы согласовать две традиции: измерять температуру в градусах, а энергию в каких-то своих единицах) и *интересным*, как мы прямо сейчас увидим, множителем 3/2.

### *Энергия распределяется поровну по степеням свободы*

Разные молекулы могут брать на себя энергию разными способами: не только двигаться в любых направлениях, но, например, еще и вращаться. Различные «каналы», по которым может распределяться энергия, называются степенями свободы. Число степеней свободы показывает количество различных форм движения. Пока нет причины заглядывать внутрь атомов, каждый атом имеет три степени свободы, по числу независимых направлений скорости; молекулы могут дополнительно иметь вращательные степени свободы, а кроме того, еще и колебательные, если некоторые их части *как будто* соединены пружинками. Чудеса из серии «индивидуальность не важна» продолжаются. В средней энергии движения молекулы, которую мы сейчас обсуждаем, $3 \cdot 1/2\ k_B$, скрыта размерность пространства: тройка здесь — это три степени свободы движения в пространстве. На каждую из этих трех по отдельности приходится средняя «порция» энергии $1/2\ k_B$, а из-за того, что молекулы летают в трехмерном пространстве, движение каждой из них забирает три порции. А сколько энергии уходит в другие формы внутреннего движения, если они есть, — в колебательные и вращательные степени свободы каждой молекулы? *Столько же*! То же самое 1/2 $k_B$. Энергия дробится по всем степеням свободы одинаковыми средними порциями. Независимо от того, поступательное это движение, вращение или колебания, все виды движения *в среднем* принимают на себя одну и ту же порцию энергии — с одним важным уточнением, что степень свободы, связанная с колебаниями, несет две порции, потому что колебания происходят как переход энергии движения во что-то похожее на энергию сжатой пружины и обратно, из-за чего видов энергии там два и порций тоже получается две (быть может, лучше считать, что с каждым колебанием связаны две степени свободы; так или иначе, я больше не буду специально это оговаривать). Средняя энергия распределяется поровну по степеням свободы. Это несколько удивительное свойство («Как они знают?!») имеет даже характер теоремы — точного высказывания, с неизбежностью верного, если верны некоторые посылки. Основная посылка вот в чем. Если $E$ — это энергия движения, то она зависит от скорости как «эм-вэ-квадрат-пополам», как мы обсуждали, без связи с молекулами, на более ранних прогулках [173]. Сейчас главным оказывается слово «квадрат». Если $E$ — это энергия сжатия или растяжения чего-то вроде пружинки, то она (энергия) зависит от сжатия/растяжения тоже как квадрат (растянуть в два раза сильнее — в четыре раза больше энергии). Если $E$ — это энергия вращения молекулы, то и там зависимость от скорости вращения содержит квадрат. Когда энергия зависит от чего-то квадратично (а энергия *очень любит так делать*), математическая процедура усреднения разных значений энергии с данными вероятностями их появления дает 1/2 $k_B$ в качестве среднего.

Большие системы «стирают» индивидуальные особенности. В переполненном вагоне метро всего 250–300 человек, но в целом они ведут себя одинаково, вне зависимости от того, как кого из них зовут (хотя я должен признать, что иногда случаются *яркие* исключения). В интересующих нас системах число участников неизмеримо выше, и от их индивидуальности совсем ничего не остается. Неважно, что собой представляют молекулы, если только соблюдены некоторые общие условия. Неважно, как именно молекулы «сходят с ума» в более или менее неистовом движении. Равнораспределение энергии по степеням свободы выражает, *как работает вычисление среднего*, а не как называется то, что при этом подлежит усреднению.

*****

**Мера и цена незнания.** Знание вероятностей, с которыми движущиеся молекулы обзаводятся различными значениями энергии, — это намного большее знание о системе, чем просто информация о среднем значении, но все равно ничтожное по сравнению с объемом нашего незнания — с тем количеством информации, оперировать которым мы в любом случае не собираемся, главным образом ввиду полной невозможности этого, да, собственно, и его бесполезности, ведь мы совершенно слепы к деталям микроустройства. Каждая картина, которую мы способны отличить от других (кофе при температуре 52 °C — кофе при температуре 51,5 °C — сливки, перемешанные с кофе при температуре 51,5 °C, — …), с точки зрения молекул реализуется несметным количеством способов. У них остается огромный объем «неконтролируемой самостоятельности»; совершенно неважно, какая именно молекула и в какой именно точке приобрела данную скорость прямо сейчас, — не пройдет и наносекунды, как скорость ее изменится, как и скорость каждой другой молекулы, а мы слишком велики и слишком медлительны, чтобы заметить хоть какие-нибудь проявления этой «внутренней жизни» [174].

### *Энтропия — мера незнания подробностей*

*Незнание*, на которое мы обречены согласиться, оказывается не только философской категорией — оно еще и выражается некоторой величиной, которую в принципе можно даже измерить. Она называется энтропией: чем больше энтропия, тем больше незнание (тем больше молекулы могут вытворять такого, что полностью ускользает от нашего внимания). Это незнание имеет неожиданную практическую важность: как оказалось, энтропия выражает сопротивление вещей — тел и сред — извлечению из них «полезной энергии» (работы). Когда мы хотим собрать раздробленную энергию движения и пустить ее на хорошее дело, мы лишены информации о том, как движутся какие молекулы, и из-за этого оказываемся беспомощными перед задачей, скажем, отобрать более быстрые молекулы, которые подвинули бы какой-нибудь поршень справа налево и в результате подняли бы груз. Молекулы бьют по поршню во всех направлениях, делают это совершенно хаотически, и поршень никуда не движется. Грубый способ все-таки извлечь полезную работу из раздробленного движения состоит в том, чтобы нагреть газ под поршнем. Он грубый, потому что мы управляем процессом, меняя всего один параметр — температуру (*среднюю* энергию движения), и предоставляем молекулам сходить с ума как угодно во всем остальном. Устройства, которые совершают работу за счет того, что собирают вместе и делают «полезной» часть раздробленного движения, скрытого в телах, называются тепловыми машинами. Именно они сделали возможной промышленную революцию, хотя их создатели и не подозревали о природе теплоты как форме движения. При всей той роли, которую тепловые машины сыграли и *продолжают* играть в развитии цивилизации, они никогда не были особенно эффективными, и дело здесь далеко не только в технологиях, а, как оказалось, в «невидимой руке энтропии».

*Тепловые машины — грубый способ использовать энергию движения молекул*

*****

**Беспокойная сестра энергии.** Первоначально энтропию открыли не как меру незнания, а именно как величину, контролирующую протекание процессов с обменом теплом и вообще процессов с участием большого числа молекул. Истоки наших представлений об энтропии — в исследовании под заголовком «Размышления о движущей силе огня...»

(рис. 9.6), которое в 1824 г. опубликовал 27-летний офицер французской армии (и выпускник Политехнической школы в Париже) Сади Карно [175]. *Движущую силу огня* не стоит недооценивать и два столетия спустя: даже на атомных электростанциях электричество производится путем нагревания газа (водяного пара), который, расширяясь, толкает поршень (лопатки турбины в современном исполнении). Карно не внес технологических новшеств в устройство тепловых двигателей; его рассуждения вообще относятся к идеальным машинам, т.е. скорее к воображаемым, чем реальным, но он смог увидеть за ними нечто более глубокое, чем любой набор технологических усовершенствований. Понятия энтропии еще нет в «Размышлениях...», оно появилось через два десятилетия после смерти автора, но рассуждения, проделанные в книге Карно, подготовили его введение.

**Рис. 9.6.** Книга Сади Карно «Размышления о движущей силе огня и о механизмах, пригодных для ее использования» и ее автор

Через идеальную тепловую машину (как и через реальную) протекает поток тепла: от горячего тела к газу и далее от газа к холодному телу [176]. Тепло, ушедшее в холодное тело, становится недоступным, а это означает, что то тепло, которое отдает горячее тело, превращается в работу далеко не полностью. И с этим ничего нельзя поделать. Карно установил, что в идеальном варианте (являющемся чистым мысленным экспериментом в смысле своей реализуемости, но одновременно и непреодолимым ограничением для любой реальной системы) бесполезно теряется доля теплоты (т.е. энергии), выражающаяся очень просто: надо абсолютную температуру холодного тела поделить на абсолютную температуру горячего. Если горячее тело имеет температуру 231 °C (чуть ниже температуры плавления олова), а холодное — температуру 25 °C, то неизбежно *теряется* вот сколько: $\frac{25 + 273{,}15}{231 + 273{,}15} \approx 0{,}59$ т.е. почти 60%. И это в идеальной тепловой машине; во всех реальных случаях теряется заметно больше.

### *Энтропия — свойство не энергии, а ее носителей, но она говорит о «полезности» энергии для работы*

Поскольку затраты энергии на поддержание горячего тела горячим — это, как правило, наша забота, низкая эффективность тепловых машин несколько огорчительна. А тот факт, что за неизбежными потерями скрывается конкретная величина, присущая каждому состоянию системы/тела, понял позднее Клаузиус. Он и ввел понятие энтропии, и он же изобрел это слово — как вариацию на тему древнегреческого корня, но с начальным «эн-», которое должно было напоминать о слове «энергия», в соответствии с идеей Клаузиуса, что эти две величины одинаково важны. Выбранный греческий корень (встречавшийся нам недавно в слове «*тропо*сфера») имеет в том числе и значение «преобразование/изменение» [177]. Осознание же связи энтропии с *незнанием* — это следующий шаг, потребовавший еще некоторого времени, и определяющая роль в этом принадлежит Больцману; мы доберемся до него чуть позже.

Энтропия, однако, совсем не похожа на энергию. Она и не думает сохраняться; наоборот, она *производится* передачей телу тепла. Для подсчета энтропии каждую малую порцию тепла, которой тело обменивается с окружающим миром, надо подвергнуть «уценке», поделив ее на ту (абсолютную) температуру, которую тело имеет как раз в момент данного обмена. (Теплоту, которая передается системе извне, удобно считать положительной, а теплоту, которую система отдает вовне, — отрицательной, поэтому я могу всегда говорить, что тело получает тепло, имея в виду, что если оно получает отрицательное количество, то, значит, в действительности отдает.) Складывая все «уцененные» порции тепла, мы узнаем, насколько *изменилась* энтропия тела в ходе всех этих действий. В добавлениях к этой прогулке приведены некоторые подробности этого с использованием сказочно-сумасшедшей аналогии.

Наблюдение за макроскопическими телами и средами говорит, что, когда с ними что-то происходит (кофе остывает; газ совершает работу; насос накачивает воздух; чернила растворяются в воде; …), их энтропия всегда увеличивается. Например, когда горячее и холодное тела, приведенные в контакт, приходят к общей температуре, энтропия возрастает из-за различной уценки одних и тех же порций тепла: горячее тело *отдает* порцию тепла, при этом его энтропия уменьшается на размер этой порции, деленный на температуру. Холодное тело принимает ту же по величине порцию тепла, и его энтропия возрастает, но, чтобы узнать, насколько в точности, надо поделить эту порцию тепла на меньшую температуру — тело ведь *холодное*. Значит, холодное тело приобретает больше энтропии, чем горячее теряет, и общая энтропия возрастает.

### *Энтропия — во всем, но измерить ее не так просто*

Энтропию не определить невооруженным глазом и не измерить, приложив к телу «энтропометр», но это никак не умаляет ее статуса. Невооруженным глазом не видны и эллипсы, по которым летают планеты, и Кеплер проделал немалую работу, чтобы они «появились» в результате обработки наблюдений. Чтобы добраться до энтропии, анализируя более непосредственные наблюдения, тоже требуется работа мысли. Важна в первую очередь не величина энтропии сама по себе, а факт ее возрастания. Утверждение, что энтропия неизменно возрастает (точнее, не убывает), выражает запрет на такие явления, как перетекание тепла от холодного тела к горячему. Само по себе сохранение энергии не запрещает таких явлений, но мы решительно *не* ожидаем, что посреди лета вода в пруду станет ледяной, а воздух вокруг пруда *от этого* нагреется. Не случается и разделения азота и кислорода по разным углам комнаты или разделения уже перемешанных воды и чернил. Определение энтропии устроено как раз таким образом, что все эти явления непременно сопровождались бы уменьшением полной энтропии. Тогда запрет на все «странные» явления такого сорта выражается в виде *закона возрастания энтропии*. Как и все законы, он представляет собой обобщение опытных фактов. И совокупность всех наших наблюдений над миром говорит, что это очень общий закон:

Если кто-нибудь укажет вам, что лелеемая вами теория Вселенной не согласуется с уравнениями Максвелла, то тем хуже для уравнений Максвелла. Если выяснится, что она противоречит наблюдениям, то что ж, время от времени этим экспериментаторам случается что-нибудь напортачить. Но если окажется, что ваша теория идет против второго закона термодинамики, то оставьте всякую надежду: судьба вашей теории — потерпеть самый уничижительный крах.

*А. Эддингтон*

«Второй закон термодинамики» в этой цитате (да и вообще) — это и есть закон возрастания энтропии. Правильнее говорить «неубывания», но у меня это не всегда получается, потому что «возрастание» звучит все-таки выразительнее. В специальных случаях энтропия может оставаться неизменной. «Специальные случаи» означают, что любые действия над системой надо производить очень плавно; порции тепла, передаваемые «за один раз», должны быть малы и передаваться медленно; а все участвующие в деле механизмы должны быть полностью лишены трения. Все это выражают словосочетанием «обратимые процессы», и это идеализация. При обратимых процессах энтропия остается прежней, когда система возвращается в исходное состояние, но в реальности этого добиться невозможно, и энтропия возрастает. (Речь, конечно, всегда идет о возрастании энтропии в изолированной системе; в какой-нибудь части мира, куда приходит и откуда уходит энергия, энтропия может убывать, но происходит это за счет ее возрастания где-то снаружи.)

Закон возрастания энтропии запрещает так называемый вечный двигатель второго рода: циклический (повторяющийся) процесс, единственным результатом которого является извлечение тепла из «горячего тела» и совершение полезной работы (словами лорда Кельвина, которому принадлежит эта формулировка, — «подъем груза»). Логический анализ показывает, что запрет на такие явления *эквивалентен* закону неубывания энтропии. Другая логически эквивалентная формулировка найдена Клаузиусом: невозможен циклический процесс, единственный результат которого состоит в извлечении тепла из «холодного тела» и передаче ее «горячему телу» [178]. Связь энтропии с ограничениями в работе тепловых машин не должна удивлять: способность тепловой машины совершать работу основана на том, что она получает тепло при большей температуре, а отдает тепло — при меньшей; но энтропия — это как раз такая величина, изменение которой выражает количество переданной теплоты, приходящееся на один градус.

В энтропии прежде всего бросается в глаза ее отличие от того, что мы знаем про энергию. В той главное — ее сохранение, которое работает в виде требования, чтобы всегда выполнялось *равенство* (стало) = (было); все, что нарушает это равенство, оказывается невозможным. Кофе, который вы налили в термос, изолировав его от остального мира, не может сделаться там горячее (собственно, и холоднее он делается только потому, что из реального термоса энергия все-таки уходит наружу). А закону возрастания энтропии предлагается действовать в виде неравенства (стало) ≥ (было). Это совсем другая идея, чем в законах сохранения. И вот где разверзается бездна. Если бы мы знали о теплоте примерно столько же, сколько было известно во времена промышленной революции, мы бы приняли закон возрастания энтропии как фундаментальный закон природы. Но мы знаем, что теплота — явление не «самостоятельное», а всего лишь проявление движения отдельных молекул. В какой мере «самостоятелен» закон возрастания энтропии? *Следует* ли он из известных законов движения? Или же к ним необходимо добавить что-то, на что мы до сих пор не обращали внимания, и только тогда мы сможем логически вывести, что энтропия никогда не убывает?

*Энергия сохраняется, а энтропия стремится к максимуму*

*****

**Свобода, равенство и братство: последствия.** Чтобы обсуждать связь закона неубывания энтропии с фундаментальными законами движения, необходимо для начала выразить энтропию не через передаваемые порции тепла, учитываемые с «уценкой», а через движение молекул. Задача совсем не выглядит простой. Решение предложил Больцман, и формула, выражающая энтропию «через молекулы», теперь выбита на его надгробии. Энтропия, согласно этой формуле, измеряет степень нашего незнания о том, как в точности движутся молекулы. Это звучит несколько противоречиво (оценки в школе измеряют, предположительно, уровень знания, а не уровень незнания, который даже непонятно как определить), но тем не менее работает вот как. Изолируем систему от внешнего мира, как ваш кофе в термосе. Там равновероятны все допустимые варианты движения всех молекул при фиксированной полной энергии. Молекулы ведут себя как довольно безумная труппа актеров, которые ставят пьесу вообще без режиссера и даже без автора: они каждое мгновение перераспределяют роли между собой, да и сами роли каждый раз переписываются произвольным образом, а через мгновение переписываются и перераспределяются снова; требуется только, чтобы некоторое число, общее на всех, не менялось (у актеров пусть это будет общий уровень шума, который они создают; у молекул это энергия). Чтобы полностью описать все возможные способы «раздачи ролей» молекулам, надо задать положение и количество движения каждой молекулы. Точнее, чтобы имеющиеся роли все-таки можно было перечислить в виде списка, надо разбить весь объем термоса на *очень маленькие* кубики и интересоваться тем, в каком именно кубике оказалась та или иная молекула. Аналогично нужно поступить и с количеством движения: определить небольшие интервалы вблизи выбранных значений количества движения и интересоваться тем, в какой интервал какая молекула попадает. Про то, что получится, говорят, что это *состояния* молекул. Каждое состояние молекулы — это местоположение («где она находится») в пределах какого-то из выбранных кубиков и количество движения («что делает», т.е. как движется), тоже в пределах выбранных интервалов. Полная конфигурация задается перечислением состояний всех молекул.

Молекулы кофе, изолированного от окружающего мира, «сами» выбирают для себя состояния из числа доступных. Доступно многое, но не все: *не*доступны состояния, отвечающие пребыванию вне термоса; определенно недоступны, кроме того, состояния со слишком большой энергией — большей, чем полная энергия, фиксированная с самого начала. В пределах же доступного молекулы делят между собой состояния на основе принципов свободы (можно все, что не запрещено) и равенства (различные возможности равновероятны). И, пожалуй, братства, хотя прямо сейчас это менее существенно: все молекулы одного вида полностью взаимозаменяемы. Каждая молекула непрестанно меняет одно доступное состояние на другое, но при этом мы можем наблюдать *одну и ту же* макроскопическую картину, потому что различные способы, которыми молекулы занимают доступные состояния, для нас неразличимы. Правда, и наша жизнь не совсем скучна, потому что макроскопических картин тоже немало, хотя и несравнимо меньше, чем вариантов «раздачи ролей» молекулам: мы готовы различить, например, картину, где молекулы у правой стенки термоса в среднем имеют большие энергии, чем молекулы у левой стенки. Это выражается в том, что температура кофе в двух точках различается, скажем, на 1 °C; или, если у вас есть подходящие инструменты, на 0,1 °C. У каждой такой картины имеется множество *реализаций* — множество разных вариантов расселения молекул по состояниям, подчиненных необходимым ограничениям (чтобы движение молекул, например, «поддерживало» заданную разность температур). И тут молекулы «наносят ответный удар» за то, что мы не вникаем в подробности. Их оружие — *число* *реализаций* каждой из макроскопических картин. Число реализаций огромно для каждой макроскопической картины, но для некоторых картин оно «еще огромнее» или даже «намного огромнее», чем для других. Только из-за того, что у них больше реализаций, такие картины встречаются (намного) чаще; а мы в результате наблюдаем *необратимое* развитие событий — смешивание, выравнивание температур и т.п. При растворении капли чернил в воде (рис. 9.7) имеется *намного* больше таких способов расселить молекулы по состояниям, что мы наблюдаем картину «чернила растворены в воде», чем способов, которые дают картину «чернила сконцентрированы в виде капли». При смешивании двух газов все молекулы газа 1 исходно находятся в одной части, а все молекулы газа 2 — в другой части объема, разделенные перегородкой. После того как перегородку убирают, у молекул обоих газов появляется больше состояний. Доступ к большему числу состояний дает большее число возможных реализаций для макроскопической картины «два газа перемешаны в полном объеме». Молекулы просто разбегаются по всем доступным для них состояниям и беспрестанно меняют эти состояния, а у нас перед глазами оказываются те макроскопические картины, которые с большим отрывом лидируют по числу реализаций, в результате чего мы и видим необратимые процессы: температуры выравниваются, чернила растворяются в воде, газы перемешиваются.

**Рис. 9.7.** Диффузия чернил в воде

## *Причина необратимости — доступность большего числа состояний*

Число возможных реализаций (способов «раздачи ролей» молекулам) для данной макроскопической картины и есть, по существу, энтропия. *Почти* энтропия. Числа эти большие, и нам будет удобно сэкономить на записи, выражая их в виде $2^X$ и принимая $X$ за меру числа реализаций. Экономия заметная: если, скажем, $X = 100{,}25$, то $2^X$ — это 1 507 499 113 128 880 389 969 770 996 486 реализаций. Итак, предположив на секунду, что мы можем сосчитать все способы расселить молекулы по состояниям так, чтобы реализовалась выбранная макроскопическая картина, мы получим какое-то «длинное» число; записав его в виде $2^X$, находим соответствующее «короткое» число $X$. Это и есть *энтропия, выраженная в битах* — как количество информации. Оно показывает наше незнание о движении молекул — о том, каким именно из возможных способов они «сейчас» реализуют данную макроскопическую картину. Правда, биты — это «голые числа», не несущие в себе никаких градусов, килограммов, секунд, джоулей и т.п., а исходное определение энтропии выражает ее в единицах энергии, деленных на градусы. Величина, которая спасает дело в таких случаях, нам уже встречалась — это постоянная $k_B$ = (маловыразительное число) · Дж/градус. Мы просто умножим число бит $X$ на $k_B$ и, по причинам совершенно техническим, умножим еще на 0,693. [179] Получится желаемая энтропия, выраженная через джоули и градусы: $S = 0{,}693\, k_B X$. *Почти* это и высечено на надгробии Больцмана, только постоянная $k_B$, которую мы называем постоянной Больцмана и поэтому включаем в обозначение букву B (Boltzmann), там обозначена просто как $k$. [180]

Формула Больцмана относится к системам, которые изолированы от внешнего мира и не обмениваются с ним ничем, даже теплом: кофе в идеальном термосе. Этот ваш кофе, как мы помним, буквально несет внутри себя воплощение демократии и равенства возможностей: все, что не запрещено, может там реализоваться, причем с одинаковыми вероятностями. Для этих возможностей теперь есть количественная мера, о чем, быть может, стоит вспомнить, в следующий раз наливая кофе.

### *Тепловое равновесие — максимум энтропии*

Зафиксируем новое понимание, *почему* энтропия возрастает: из-за доступа к большему числу состояний.
А *останавливается* рост энтропии в каждой конкретной системе тогда, когда молекулам доступно максимальное число состояний, и поэтому имеется больше всего реализаций одной и той же макроскопической картины (а картины, у которых еще больше реализаций, недостижимы в имеющихся условиях). Именно это мы называем *равновесием* (техническое название — тепловое или термодинамическое равновесие). Отсутствуют не только потоки тепла, но и всякие макроскопические изменения. Пока равновесие еще не установилось, макроскопическая картина характеризуется тем, что «здесь чуть теплее, а там чуть холоднее»; «здесь больше чернил, а там — воды»; любые такие условия означают наличие некоторых *ограничений* на расселение молекул по состояниям и потому сравнительно меньшее количество реализаций. В равновесии же таких ограничений просто нет, и число реализаций, а с ним и энтропия максимальны. Все то вокруг нас, что находится в тепловом равновесии, включая ваш остывший кофе в чашке, добилось максимального значения энтропии, возможного в данных условиях. Этот принцип оказался могущественным средством изучения природы: чтобы узнать, например, как молекулы в воздухе распределены по скоростям (много ли совсем медленных или радикально быстрых по сравнению со средней скоростью), достаточно ответить на вопрос, какое распределение обеспечивает максимальную энтропию; и целая история, как мы скоро увидим, произошла, когда таким же образом попробовали выяснить, как *свет* устраивается в равновесии с веществом.

Больцмановское выражение энтропии «через молекулы» — *смелая* формула, потому что, не принимая никаких дополнительных предположений, крайне трудно установить ее буквальное совпадение с энтропией, определенной «через порции тепла». Это видно уже из того, что в определении энтропии через число реализаций макроскопической картины участвуют все те расселения молекул по состояниям, «между которыми мы не видим разницы» — что оставляет место для произвола. Обоснование формулы Больцмана состоит в том, что «его» энтропия ведет себя так же, как та, другая в зависимости от таких величин, как температура, давление и т.д., и точно так же участвует в соотношениях между разнообразными величинами. Это убедительное обоснование (хотя и оно, строго говоря, требует некоторых допущений), но все же остается место для небольших сомнений: а что, если какое-то слегка измененное определение энтропии «через молекулы» ведет себя так же хорошо и, кто знает, в каких-нибудь аспектах даже лучше?

И действительно ли из законов движения строго следует, что энтропия, определенная по Больцману, никогда не убывает?

*****

**Неубывать иль нет?** Здесь начинается второй акт драмы.

Неубывание энтропии и его связь с первопринципами — вероятно, наиболее широко обсуждавшаяся тема во всей классической картине мироздания. Основная причина — связь с необратимостью, а потому и с направлением времени. Где-то по дороге от молекул к «нам», буквально от отдельных молекул к функционированию Вселенной в целом, происходит труднообъяснимое. Законы, по которым взаимодействуют любые две молекулы, одинаково хорошо описывают происходящее в обе стороны по времени. Две сталкивающиеся молекулы, наскакивающие друг на друга с количествами движения $A$, $B$ и разлетающиеся с количествами движения $A'$, $B'$ (рис. 9.8 слева), делают это по Ньютону, под управлением действующей между ними силы, которая сложно зависит от расстояния. Но если в конечных состояниях $A'$, $B'$ заменить скорости обеих молекул на точно противоположные (см. рис. 9.8 справа), то под управлением тех же законов они превосходно проделают эволюцию в обратную сторону по времени и придут в состояния, которые отличаются от *A*, *B* только развернутыми на 180° скоростями. Столкновение каждой пары молекул, обменивающихся энергией и количеством движения, подчинено точным законам, которые не нарушатся, если «запустить фильм в обратную сторону». Каждое отдельное взаимодействие молекул дружит с обращением времени, но собранные вместе они не дружат совсем: время течет в ту сторону, где раздробленное движение расползается по большему числу возможностей. Капля чернил в воде со временем распространяется по всей чашке, но, если вода и чернила уже перемешаны, не стоит ожидать, что через какое-то время чернила соберутся в одном месте, оставив вокруг себя чистую воду. Не говоря уже о том, что осколки разбившейся чашки не собираются вместе. (В отличие от сталкивающихся молекул, мы довольно уверенно различаем прошлое и будущее по совокупности таких признаков.) Можно ли вывести *необратимое* поведение из законов Ньютона? Конечно, следить за отдельными молекулами никто не собирается, но из законов Ньютона — при несколько рафинированных, но часто реализуемых на практике предположениях — на правах теоремы следуют правила, определяющие, как могут меняться со временем величины, описывающие *массовое* поведение молекул. Эти-то правила и требуется применить. Интрига, однако, усложняется, потому что про массовое поведение молекул приходится дополнительно постулировать еще что-то — для изолированных систем, как мы видели, это равновероятность. С учетом *всего этого* действительно ли величина, определяемая формулой на надгробии Больцмана, возрастает *вследствие* известных законов и уже сделанных предположений о движении молекул?

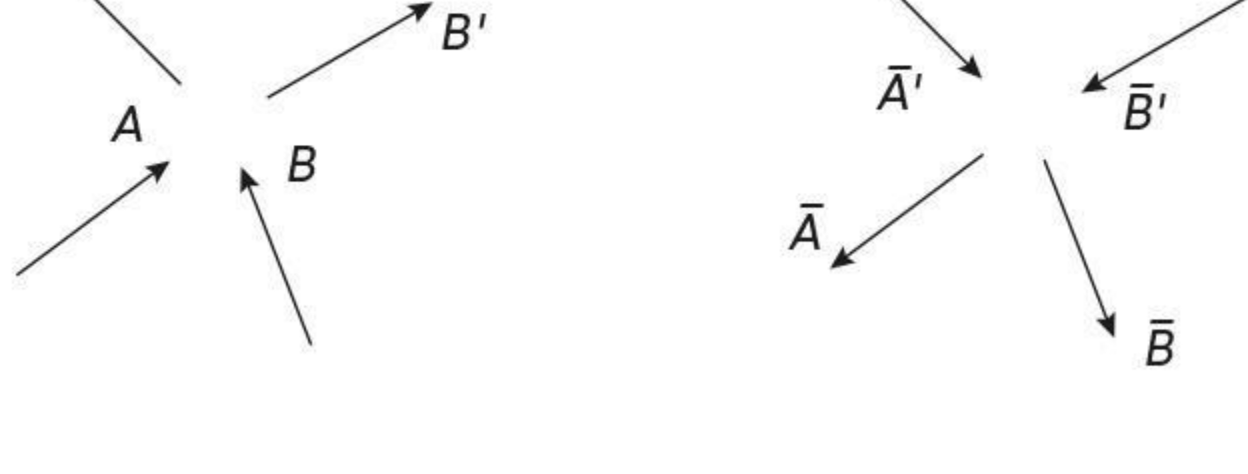


**Рис. 9.8.** *Слева:* столкновение молекул, в результате которого они переходят из состояний $A$, $B$ в состояния $A'$, $B'$, управляется действующей между ними силой. *Справа:* если начать с конца, поменяв скорости на противоположные, то под управлением той же силы пара молекул придет в начальное состояние, только с противоположно направленными скоростями

С больцмановской энтропией оказалось все хорошо, когда все просто, и не очень хорошо, когда все сложно. Процессы, в которых видимая нами макроскопическая картина может развиваться со временем только одним способом, называются детерминистскими, и вот хорошая новость: во всех детерминистских процессах энтропия, определенная по Больцману, не может (математически не может) убывать, так что гармония между принципами и практикой установлена. В таких случаях каждый способ расселения молекул по состояниям, отвечающий исходной макроскопической картине, эволюционирует в какой-то из множества способов расселения, отвечающих финальной макроскопической картине. Но все не так хорошо, когда различные реализации исходной картины могут эволюционировать к реализациям разных финальных картин. Такая ситуация означает, что и макроскопический процесс является недетерминистским: в нем возможны различные исходы, каждый с некоторой вероятностью. Организовать такое не так уж и сложно — например, поместив каплю чернил в воду и разглядывая какой-то небольшой объем жидкости в микроскоп. Здесь важно, что в микроскоп молекул заведомо не видно, поэтому, несмотря на присутствие корня «микро», глядя в микроскоп, мы все равно видим *макроскопическую* картину. Здесь-то и неприятность. Мы можем заинтересоваться тем, прозрачен или непрозрачен выбранный крохотный объем воды. Или три каких-то объема. Характер диффузии чернил в воде таков, что эти очень небольшие объемы воды могут становиться и более мутными, и более прозрачными; если мы повторяем опыт, начиная с одной и той же макроскопической картины, и фиксируем состояния выбранных объемчиков, мы можем получать разные результаты. Ставшее мутным (смешивание произошло, энтропия увеличилась) может через некоторое время оказаться более прозрачным (энтропия понизилась).

А это значит, что энтропия подвержена *флуктуациям*: ее значения могут спонтанно изменяться в некоторых пределах, причем в обе стороны. Пока мы отказывались наблюдать за системой в слишком больших подробностях, она для нас эволюционировала детерминистски, стремясь к максимуму энтропии — равновесию, которое в этом случае одно-единственное при заданных условиях. Но если мы особенно привередливы и желаем следить за достаточно мелкими деталями, то мы можем обнаружить флуктуации энтропии; то, что в крупную клетку выглядело как одна-единственная равновесная макроскопическая картина, теперь может оказаться набором нескольких картин, между которыми система каким-то образом переходит. Выбор пути развития — с возрастанием или с убыванием энтропии — становится тогда вопросом вероятностей; возрастание энтропии оказывается более вероятным вариантом, чем убывание, но и только. Правда, *намного* более вероятным. Если, например, сначала имелась картина с энтропией, выражаемой «коротким числом» $X = 80$, а нас интересует возможность перехода системы к более низкоэнтропийной картине, для которой $X = 70$, то вероятность такого развития событий содержит множитель $2^{70-80} = 2^{-10} \approx 0{,}001$. Чем сильнее различаются значения буквы $X$ «до» и «после», тем ниже вероятность: например, $2^{-20} \approx 0{,}00000095$ (около одной миллионной) [181].

Можно ли умерить свое беспокойство за закон возрастания энтропии, установив, что энтропия возрастает хотя бы *в среднем*? «В среднем» здесь снова понимается «как в казино»: при наличии нескольких макроскопических исходов мы берем изменение энтропии для каждого исхода и умножаем его на вероятность этого исхода; все, что получится, складываем. Могут ли слагаемые с отрицательным изменением энтропии «пересилить»? В начале 1970-х гг. выяснилось, что в принципе больцмановская энтропия может убывать даже в среднем. Есть, однако, две утешительные новости. Во-первых, убывание в среднем не может быть любым, оно ограничено некоторым выражением, составленным из вероятностей появления различных макроскопических картин. Во-вторых, в случае недетерминистских процессов можно несколько «улучшить Больцмана» — модифицировать его выражение для энтропии, внедрив в него те самые вероятности переходов между макроскопическими картинами таким образом, чтобы по-новому определенная энтропия уже никогда не убывала.

Идея «поправить» определение энтропии отражает метания между ненаблюдением выраженных случаев убывания энтропии и желанием получить это неубывание из первопринципов: если при некотором выборе первопринципов и выражения для энтропии получается не совсем то поведение, которое хотелось бы получить, то, может быть, мы где-то недоугадали? Модифицировать определение энтропии, внося в него вероятности развития всей системы от одной макроскопической картины к другим, может показаться не самым изящным решением, потому что такая новая энтропия зависит уже не только от числа состояний, доступных молекулам (хотя и всегда возрастает). В пределах наблюдаемого нами мира вполне можно смириться с возможностью флуктуаций больцмановской энтропии, потому что сколько-нибудь значимое ее уменьшение слишком маловероятно; правда, и здесь нашлось теоретическое рассуждение, смущающее парадоксальным выводом, оно обсуждается в добавлениях к этой прогулке.

*****

**Широко образованный демон.** Связь между возрастанием энтропии, (не)знанием и движением подчеркнута изобретением самого известного в науке демона — демона Максвелла [182]. Придумал «демона» Максвелл, но слово впервые употребил лорд Кельвин, заметив при этом, что указывает тем самым на роль демона не как зловредного существа, а как посредника (что вообще-то составляет задачу не демона, а ангела). Эта умозрительная конструкция была предложена в 1867 г., но с тех пор продолжает обсуждаться, причем с привлечением все новых знаний из числа приобретенных за полтора века развития науки. Демон Максвелла — устройство, задача которого в том, чтобы систематически нарушать закон возрастания энтропии. Для этого ему требуется заполненный газом сосуд с внутренней перегородкой, где имеется отверстие, которое можно открывать или закрывать. Демон, собственно говоря, поселяется рядом с этим отверстием и открывает/закрывает «дверь» в зависимости от того, какая молекула и с какой стороны к нему подлетает. Оценивая их скорости, демон стремится собрать более быстрые молекулы по одну сторону от перегородки (рис. 9.9). Такое разделение молекул по скоростям (т.е. разделение газа по температуре) означает понижение энтропии; демон собирается добиться этого без открытого жульничества: без «выбрасывания» высокой энтропии из системы в другое место и без траты энергии из каких-нибудь принесенных с собой «батареек». Последнее надо понимать с небольшими оговорками, а именно как возможность сделать затраты энергии сколь угодно малыми, для чего есть даже ясный критерий. Разделив молекулы в газе на быстрые и медленные, демон может (сам или через посредников) организовать работу тепловой машины — например, предоставив более горячему газу, за счет его большего давления, двигать перегородку. Успешный демон — тот, кто смог затратить на все свои действия меньше энергии, чем ее будет получено в виде полезной работы от его машины. Другими словами, путем *тонкого* жульничества демон хочет устроить вечный двигатель второго рода, определенным образом организуя дезорганизованное, «раздробленное» движение молекул [183]. Большую или малую работу совершит устройство под управлением одного демона — неважно, потому что если как-то удалось наладить устойчивое получение работы из теплоты, то демонов можно набрать неограниченно много и получить сколько угодно полезной работы. Но главное, конечно, принципиальный вопрос нашего понимания устройства мира: действительно ли частичное преодоление того самого незнания, которое измеряется энтропией, позволяет реорганизовать хаотическое движение в регулярное?

## *Демон извлекает работу из информации*

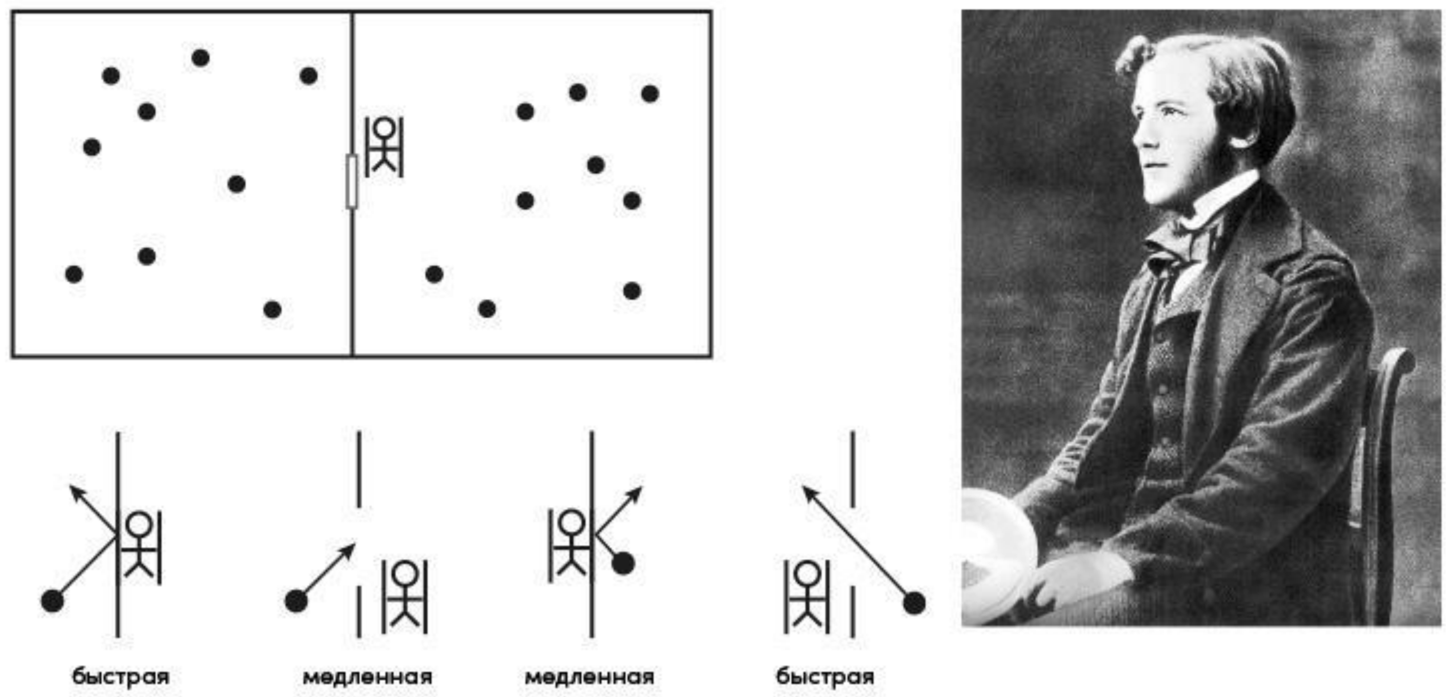



**Рис. 9.9.** Демон Максвелла и его изобретатель в молодости. Демон контролирует отверстие в перегородке, закрывая и открывая его в зависимости от скорости приближающихся к нему молекул с целью собрать в левой половине более быстрые. Четыре случая слева внизу: быстрая молекула остается слева, медленная молекула уходит направо, медленная молекула остается справа, быстрая молекула уходит налево

Осмотрительно интересуясь молекулами по одной за один раз, чтобы избежать информационной катастрофы, демон фактически собирается «восстановить» небольшую часть знания о молекулах, от которого мы отказались; а сократить *незнание* почти буквально и означает уменьшить энтропию. Минималистский вариант демона, делающий многие вопросы яснее или, во всяком случае, острее, предложил Сцилард [184]: *одна* молекула в коробке, находящейся в тепловом контакте со средой; тепловой контакт означает, что стенки могут «пнуть» молекулу сильнее или слабее, и она может приобрести или отдать некоторую энергию в результате каждого пинка; в среднем же молекула имеет ту самую энергию движения $3/2k_{\mathrm{B}}T$, которую полагается иметь при заданной температуре среды. Молекула летает «как получится» и не собирается систематически толкать какой-нибудь поршень туда, куда мы пожелаем. Демоническая схема состоит в том, чтобы «обмануть систему» на основе *знания*. В середину коробки вносится подвижная перегородка, которая присоединяется к механизму (например, лебедке) *одним из двух* способов в зависимости от того, где оказалась молекула после внесения перегородки: в левой или правой половине, как показано на рис. 9.10. Знание относится именно к тому, в какой половине коробки оказалась молекула. Это знание содержит ровно один бит информации (скажем, значение 0, если слева, и 1, если справа). После того как перегородка внесена, молекула, возможно, не сразу, но дотолкает ее до крайнего положения и тем самым совершит работу (поднимет груз). Затем перегородку вынимают и процесс повторяется. Молекула постоянно подпитывается энергией из-за контакта со стенками, а знание требуется для того, чтобы превратить эту энергию в работу.

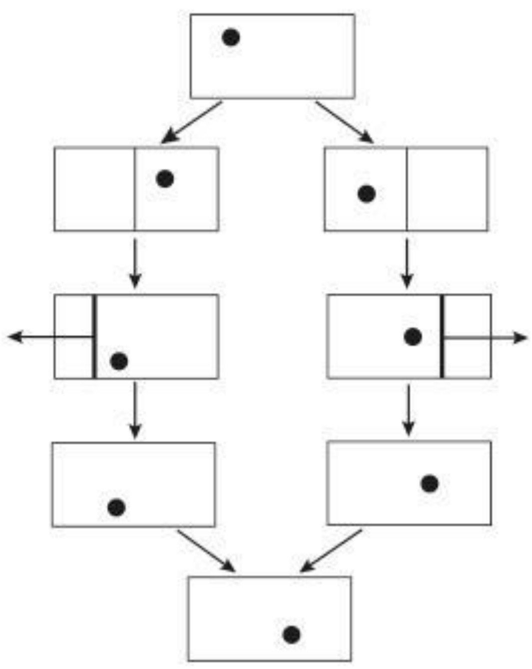


**Рис. 9.10.** Двигатель Сциларда. По строкам сверху вниз: (1) одна молекула в коробке в тепловом контакте со стенками; (2) в момент внесения перегородки молекула может оказаться в правой или левой половине; (3) на основе информации о нахождении молекулы совершается выбор типа «0 или 1»: подсоединить механизм (например, лебедку) с одной или другой стороны коробки, чтобы молекула, сдвигая перегородку до упора, совершала полезную работу; (4) после завершения движения перегородка убирается; (5) система возвращается в исходное состояние «одна молекула в целой коробке в тепловом контакте со стенками».

Сцилард предложил эту схему в 1929 г.; общее ожидание состояло скорее в том, что такая штука не должна заработать, но требовались конкретные объяснения, почему именно. Прежде всего нужна осторожность при перенесении привычных макроскопических понятий на микроуровень. По объективным причинам здесь смешиваются понятие информации как абстракции (один бит — уменьшение нашего незнания вдвое, т.е. выбор «между 0 или 1», между левой и правой половинами коробки в данном случае) и свойства носителей этой информации, и даже свойства процессов, необходимых для обработки информации. Любые логические операции с информацией, они же вычисления, — это преобразования одной последовательности нулей и единиц («бит») в другую по тем или иным правилам. Но преобразуемые биты должны быть *представлены* (записаны) каким-то физическим способом — хотя бы в виде неких конфигураций минимального числа молекул. Логические преобразования, которым подвергается информация, имеют физическую сторону: соответствующие конфигурации молекул необходимо определенным образом менять. Немедленно возникает вопрос: какова в идеале минимальная энергетическая цена, которую надо платить за обработку информации? Ваш компьютер тоже платит энергетическую (а вы — денежную) цену за обработку информации: он греется тем сильнее, чем активнее вычисляет, т.е. выполняет эти самые логические операции; но сейчас речь идет об абсолютно идеализированных системах, а потому и об абсолютном минимуме энергозатрат, ниже которого опуститься нельзя в силу законов природы. Выяснилось, что необратимые логические операции (такие, по результату которых нельзя сказать, каковы были входные данные) с необходимостью требуют рассеяния некоторой энергии — перевода ее в тепловую форму, что означает увеличение энтропии. Коль скоро вычисления содержат необратимые операции, демон терпит поражение: тратит на обработку информации больше, чем выигрывает. Но к началу 1980-х гг. появилось понимание, что обработка информации возможна без логически необратимых шагов, что «отменяло» неизбежность рассеяния некоторого количества энергии в тепло. Демон снова приободрился. К этому моменту, надо сказать, он окончательно превратился из «сознательного» субъекта в некоторое подобие специализированного компьютера — что только способствовало ясности рассуждений [185]. Информацию о положении молекулы слева или справа он может получать, используя «очень слабый свет» (фотоны крайне низкой энергии) и тратя на это исчезающе мало энергии; команду, управляющую «лебедкой», он тоже может сформировать практически без энергозатрат.

От внимания «экзорцистов» (т.е. «изгонятелей демонов»), впрочем, не ускользнул другой аспект. Да, демон, управляющий коробкой Сциларда, может извлечь работу, при этом оставив молекулу во вполне определенном состоянии в конце цикла (она занимает всю коробку). Но демон обрабатывает и использует информацию, для чего ему нужна *память*. От него не требуется воспоминаний о случившемся вчера около полудня, но поступающую к нему информацию нужно каким-то образом фиксировать, что и называется записью в память. И вот про память демона, в отличие от молекулы, нельзя сказать, в каком состоянии она окажется. Заполнение памяти описывается недетерминистским процессом; отвечающее ему незнание в данном случае оказывается еще одним вариантом «молекулярного» незнания, и получается, что энтропия не уменьшается, а просто *переносится* из «системы» в память демона! Демон снова повержен. Его ответный ход может состоять в том, чтобы по завершении цикла очищать память, приводя ее в исходное состояние. Но эта *необратимая* операция имеет неизбежную цену в виде возрастания энтропии, что подрывает усилия демона. Стирание информации оказалось неотделимым от накладных расходов (рассеяние энергии, возрастание энтропии) даже в самом идеальном варианте. Утверждение, известное как принцип Ландауэра, говорит, что стирание одного бита неизбежно приводит к увеличению энтропии по крайней мере на 1 бит (т.е. на 0,693 $k_B$ Дж/К). [186] Минималистский вариант стирания информации, откуда яснее видна его энергетическая цена, демонстрирует устройство, которое можно считать «машиной-Сциларда-наоборот» (рис. 9.11). На входе у нее — один бит информации, т.е. знание о том, находится ли молекула в левой (0) или правой (1) половине коробки. На выходе же требуется получить коробку, в которой молекула находится всегда в левой половине (0, обнуление ячейки памяти). Сделать это нужно способом, не требующим дополнительного знания, т.е. единообразно для любого входного состояния (иначе мы попадем в замкнутый круг!). Для этого предлагается во всех случаях вытаскивать перегородку и переставлять ее в крайнее правое положение, после чего двигать к среднему положению. Но это требует затраты той же работы, которую мы надеялись извлечь из машины Сциларда, потому что придется преодолевать пинки со стороны молекулы. Принцип Ландауэра говорит, что, изничтожая следы недетерминизма даже самым оптимальным для себя образом, демон потратит все, что нажил своим трудом.

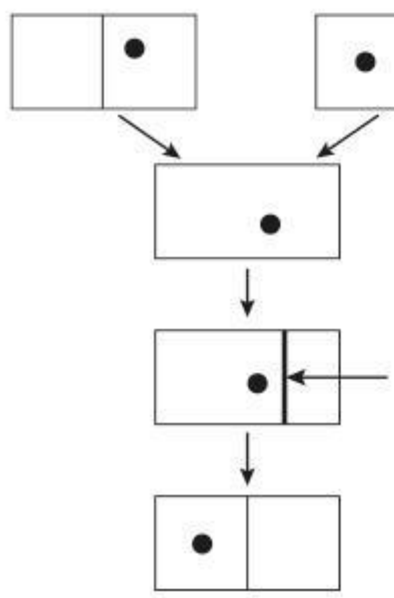


**Рис. 9.11.** Очистка ячейки памяти требует совершения работы

Демон может пуститься на хитрость: купить себе память достаточно большого объема и отложить ее зачистку, цикл за циклом накапливая в ней случайную последовательность нулей и единиц (уж что туда «запишется» по завершении каждого цикла работы). Конечно, в какой-то момент ему все же придется сделать то, что он так долго откладывал, потому что от переполнения памяти он потеряет способность к управлению. Казалось бы, стирание памяти бит за битом потребует как раз столько полезной работы, сколько он к этому времени извлек из теплового резервуара, и не стоило тратиться на приобретение памяти. Но не тут-то было! Эта часть битвы, начатой в 1867 г., разворачивалась уже в компьютерную эпоху, и демон оказался сведущ и в этом предмете. Он сначала архивирует — сжимает — накопленные данные, из-за чего последовательность нулей и единиц становится короче, а стирание ее требует меньше энергии. В итоге демон оказывается в выигрыше! Сжатие информации (как в любой из знакомых нам программархиваторов) — обратимая операция: более короткую строку из нулей и единиц можно превратить в исходную, более длинную, применяя алгоритм сжатия «в обратную сторону». Из-за этой обратимости демон в принципе может обойтись минимальными расходами на само сжатие, и экзорцисты, казалось бы, терпят поражение.

### *Сложность объекта — длина его самого короткого описания*

Сюжет становится все более закрученным. Для очередного изгнания демона потребовался новый массив научного знания. В середине XX в., с развитием теории информации, выяснилось, что последовательности из нулей и единиц могут быть устроены «более сложно» или «менее сложно», где сложность понимается не в человеческом, а скорее в «программном» (алгоритмическом) смысле: как длина самого короткого точного описания данной последовательности. Например, последовательность из 52 бит 01100110011001-10011001100110011001100110011001100110 представляет собой тринадцать повторов последовательности 0110 и может быть так и описана, а про последовательность 11010001101001111000100000110110101110010011100010 заранее неизвестно, как описать ее короче. Строго говоря, алгоритмическая сложность определяется минимальной длиной *программы*, которая генерирует данную последовательность нулей и единиц, но это сейчас не очень важно. Так или иначе, алгоритмическая сложность показывает, «насколько случайна» последовательность: мой первый пример очевидным образом не случаен, а потому переупаковывается очень простым способом, в тем или иным образом выраженное сообщение о повторе одного и того же участка, а про второй пример я этого не знаю, потому что сгенерировал его случайным образом (надо признать, впрочем, что оба примера слишком коротки для серьезного применения алгоритмической сложности).

Последовательность, которая накопится в памяти демона, будет случайной и потому плохо упаковываемой, так что он ничего не выиграет. Но это в среднем; временами ему может сопутствовать везение, и последовательности все-таки будут допускать достаточно экономную переупаковку. Это значит, что временами он сможет добиваться уменьшения энтропии, притянув к делу недетерминистский процесс (заполнение своей памяти).

На решение энергетических проблем человечества за счет толпы информационных демонов надеяться не приходится, а с принципиальной точки зрения просматриваются параллели с тем, что мы видели для больцмановской энтропии: она может уменьшаться из-за флуктуаций в недетерминистских процессах (здесь недетерминистским процессом является заполнение памяти демона). Предложение со стороны экзорцистов, не желающих оставить демону даже эпизодической радости от флуктуаций, состоит в том, чтобы дополнить правило для определения энтропии: включив память демона в систему, мы, разумеется, уже учитываем ее энтропию, но теперь к ней предлагается *добавить* алгоритмическую сложность той последовательности бит, которая имеется в памяти. Я не могу оценить перспективы этого предложения в полной мере, но нахожу весьма знаменательным, что состояние памяти дает вклад в полную энтропию и как *физическая* система (больцмановский вклад на основе подсчета числа состояний), и как *информация* (вклад в виде алгоритмической сложности). Такая энтропия-на-стыке-наук полностью определяется самим микросостоянием (в отличие от того, что обсуждалось в связи с модифицированной больцмановской энтропией, она не использует вероятности перехода системы от одной макроскопической картины к другим в недетерминистском процессе). Если демону особенно повезло — в памяти накопилась алгоритмически простая последовательность, — он получает *вероятность* добиться понижения энтропии; но в среднем, даже для макроскопически недетерминистских процессов, такая информационно-модифицированная энтропия только возрастает.

Железного вывода закона возрастания энтропии из фундаментальных принципов, по-видимому, нет.

Обсуждение «демонов» в их разнообразных вариантах позволило лучше понять, как на микроскопическом уровне формируется «цена» не только за макроскопические действия, но даже и за принятие решений, т.е. обработку информации. От десятилетия к десятилетию тренд показательным образом менялся, захватывая разные области. Исходное намерение Максвелла было в том, чтобы очертить границы закона возрастания энтропии. Сцилард первоначально предложил свой вариант демона, чтобы увидеть, каким образом нечто вроде сознания могло бы нарушать закон возрастания энтропии (его статья называлась «Об уменьшении энтропии в термодинамической системе путем вмешательства разумных существ»), но со временем стало ясно, что с обманом молекулы в коробке вполне справится компьютер, и фокус внимания сместился на фундаментальные вопросы теории информации и на энтропийную цену за ее обработку. Надо сказать, приводились и аргументы (в связи с машинами Фейерабенда — Поппера и Ротстайна, обсуждать которые мы все-таки не будем) в пользу того, что можно обойтись вообще без обработки информации; но, как и в других случаях, компенсирующее увеличение энтропии может оказаться хорошо спрятанным где-то в самой процедуре и ее последствиях. Так или иначе, продолжающееся полтора века обсуждение, инициированное Максвеллом, затронуло несколько фундаментальных законов и вопросов об устройстве Вселенной. Следует ли *все-таки* постулировать закон возрастания энтропии в каком-нибудь виде (хотя бы в среднем) и тогда уж догадываться, как в точности надо определять энтропию «через молекулы», чтобы этот закон строго выполнялся? Требуется ли отдельно постулировать принцип, связывающий информацию и энтропию? Один из подходов состоит в том, чтобы принять принцип Ландауэра как постулат, а при анализе различных демонов применять его как руководство к поиску того места, возможно, хорошо замаскированного, где, несмотря на все ухищрения, все-таки происходят затраты энергии или рост энтропии. Современные квантовые технологии, в том числе при сверхнизких температурах, добавляют новые повороты в этот сюжет, выросший из идеи контроля за микроскопическим движением, но мы здесь остановимся.

### *Равновесное состояние — состояние максимального незнания*

При этом едва ли кто-нибудь сомневается в том, что энтропия вокруг нас возрастает. Оставленный в покое фрагмент мира из-за внутреннего движения в том или ином варианте стремится к равновесию, которое означает максимум энтропии; продолжается это до прихода какой-нибудь внешней встряски — любого контакта с внешним миром, который вызывает перераспределение энергии. Вещи находят новое равновесие и снова набирают максимально возможное количество энтропии. Процесс продолжается, пока где-то есть источники неоднородности. Каждый раз, когда мы видим рядом с собой вещи в тепловом равновесии, можно вспомнить, что наше незнание об их внутренней жизни при этом максимально. Не демоны из мысленных экспериментов, а реальные окружающие вещи открыто издеваются над нами, уходя в состояния, про которые мы «больше всего не знаем».

*****

**Следы преступления Уилера.** «Гонка вооружений» между усовершенствователями демонов и экзорцистами, как бы то ни было, не оставила сомнений в том, что если есть какая-то величина, которая пусть с небольшими оговорками, но все-таки постоянно возрастает, то это энтропия. В начале 1970-х нарушение этого положения дел беспокоило Уилера не из-за тонкостей информационного обмена с внутренностью вещей, а из-за информационной грубости черных дыр. В то время считалось, что раз уж вещи исчезают под горизонтом, то бесследно исчезает и их энтропия, поэтому черные дыры, казалось, безжалостно стирают все следы и высокой, и низкой энтропии. Сам Уилер впоследствии высказывался по этому поводу так:

Мысль, что у черной дыры нет энтропии, беспокоила меня, но я не видел, как избежать такого вывода. Как-то раз в своем кабинете я в шутку признался Джейкобу Бекенстайну [187], что всегда чувствую себя преступником, когда ставлю чашку горячего чая рядом со стаканом чая со льдом, а затем позволяю им прийти к общей температуре. Мое преступление, сказал я Джейкобу, будет отзываться до конца времен, потому что нет никакого способа изгладить его и вернуть сделанное обратно. Но предположим, что рядом проплывает черная дыра, а я бросаю в нее горячий и холодный чай. Не сотрутся ли тогда навсегда все свидетельства моего преступления? Ничего сверх этих слов Джейкобу не требовалось. Он отнесся к ним серьезно и отправился их обдумывать.

### *Как тебе такое, Сади Карно?*

Энтропия — концепция, которая исходно была сформулирована в применении к вполне определенной «начинке» (молекулам и атомам). До какой степени она может распространяться на более широкий круг явлений? (В отношении энергии, например, последовательно открывались ее новые виды, с новыми носителями — что никак не мешало основной концепции, что энергия сохраняется.) С «начинкой» черных дыр все непросто: там в основном пусто, а где, видимо, уже не пусто, действуют неизвестные нам законы природы. Выживет ли в таких экстремальных условиях энтропия со своим свойством неубывания? В другом месте Уилер рассказывает о последствиях своего разговора с Бекенстайном:

Через несколько месяцев он вернулся и сказал: «Вы не избавились от возрастания энтропии, а просто переложили его в другое место. У самой черной дыры есть энтропия». <…> Когда вышла работа Бекенстайна, Стивен Хокинг с [Брэндоном Картером] сочли все его рассуждения настолько немыслимыми, что решили написать статью с целью показать, что эти рассуждения неверны, но в конце концов пришли к выводу, что рассуждения правильные и что это свойство должно проявлять себя еще и другим способом — черная дыра может испарять электроны со своей поверхности.

«Поверхность» здесь — это поверхность горизонта (хотя высказывание об «испарении с горизонта» не следует понимать буквально). В искривленном пространстве-времени вблизи черной дыры, на взгляд удаленного наблюдателя, рождаются и исчезают элементарные частицы, и открытие Хокинга состояло в том, что некоторые (*очень немногие*, и в первую очередь даже не электроны, а фотоны) выбираются на волю — улетают туда, где черная дыра притягивает уже слабо. Они и составляют так называемое излучение Хокинга

[188]. Если какой-то наблюдатель сможет зафиксировать это излучение и измерить, как его интенсивность зависит от длины волны, он придет к выводу, что источник — некоторое тело, которое находится при определенной температуре, и что это тело «только само светит», но не отражает ничего из того, что на него сваливается извне. Для этого он воспользуется законом излучения, который ждет нас буквально за поворотом на этой прогулке. Позаимствуем его содержание: закон говорит, что если тело не отражает «чужое» излучение, то интенсивность его собственного излучения на разных длинах волн имеет вполне конкретные значения в зависимости от температуры тела. Это, кстати, дает способ дистанционного определения температуры. Для обычных тел ее можно, конечно, определить и непосредственно, и получится то же самое, но для черных дыр нет другого способа, кроме «бесконтактного». Температура черной дыры массой в 5 масс Земли, изображенной в масштабе 1 : 1 на рис. 7.15, если по-прежнему предполагать, что она не вращается (или вращается не слишком быстро), всего на 0,004 градуса выше абсолютного нуля (для черной дыры, имеющей массу Солнца, она составляет 0,000015 от этих четырех тысячных; чем массивнее черная дыра, тем ничтожнее температура, хотя и кажется, что ничтожнее уже некуда).

Наблюдатель, воодушевленный дистанционным определением температуры черной дыры, может далее произвести с ней, пусть мысленно, действия, которые ближе всего к тем, которые (тоже мысленно) проводил с нагреваемым газом Карно: передать черной дыре энергию. Это, конечно, легче легкого, потому что $E = mc^2$: в черную дыру надо просто кидать массу. Приобретенная масса *изменяет* температуру черной дыры. Но, кидая маленькие порции массы и записывая все свои действия в журнал, наблюдатель внезапно решает учитывать каждую порцию с «уценкой» в соответствии с той температурой, которую в данный момент имеет черная дыра, — именно так, как это делается для энтропии. Здесь требуется уточнение, потому что масса — это не единственное, что получает черная дыра; падающие на нее предметы передают ей еще и некоторое количество вращения, поэтому наблюдатель должен аккуратно учитывать все, что он туда отправляет; это относительно несложно. Анализируя свои записи, наблюдатель обнаруживает, что «уцененные» порции энергии, отправленные в черную дыру, оказываются добавками к некоторой величине, связанной с самой черной дырой; неожиданно или нет, эта величина *никогда не убывает*. «Энтропия!» — восклицает наблюдатель. А потом обнаруживает нечто новое: во всех других известных ему ситуациях энтропия — достаточно абстрактное понятие, но для черной дыры она получает простое *геометрическое* воплощение. Энтропия черной дыры — это площадь поверхности ее горизонта; *практически* площадь поверхности, отличие состоит просто в умножении на число. (У Бекенстайна была только оценка для этого числа, а точно его нашел Хокинг; оно равно 1/4.) При этом горизонт — никакая не твердая поверхность, а нечто, определенное математически и лишенное опознавательных знаков. Но, если оставить в стороне тонкие квантовые эффекты, что бы ни происходило с черной дырой, площадь ее горизонта только возрастает [189].

Энтропия черной дыры колоссальна. Это ожидаемо, если вспомнить основную идею: энтропия выражает количество способов, которыми можно реализовать наблюдаемую макроскопическую картину так, чтобы мы не видели разницы. А для черной дыры наши возможности «видеть разницу» ограничены в максимальной степени, потому что судьба всего, в нее попавшего, скрыта под горизонтом и внешний вид черной дыры определяется *только тремя* числами: кроме массы и количества вращения, это еще электрический заряд. И всё [190]. Энтропия черной дыры должна выражать количество способов, каким ее можно создать, при всего лишь трех заданных числах. Для обычных тел вокруг нас энтропия определяется расстановками атомов и молекул, которые играют роль «дна» в измельчении движения. В черной дыре «дно» находится не на уровне молекул, а в области *колоссально* меньших длин. Вот какой у них масштаб. Площадь поверхности горизонта выражается, как и всякая площадь, в квадратных метрах, или в квадратных километрах, или в чем-то аналогичном. Сколько ни умножай площадь на постоянную Больцмана $k_B$, энергия-деленная-на-температуру (размерность энтропии) не получится; квадратные метры надо сначала как-то превратить в «голое» число. Правильные формулы об этом уже позаботились (иначе они бы не были правильными) и сообщают, что площадь горизонта надо поделить на другую, фиксированную площадь — что-то вроде площади *очень* маленького квадратика: $2{,}61 \times 10^{-66}$ см$^2$. Откуда она взялась и почему она именно такая? Она встроена в структуру нашей Вселенной примерно так же, как две другие уже встречавшиеся нам постоянные: скорость света $c$ и ньютоновская гравитационная постоянная $G$. Скорость света выглядит большой по сравнению со скоростями из нашего более-менее обычного опыта; ньютоновская постоянная имеет множитель $10^{-11}$, если пользоваться метрами, килограммами и секундами (и $10^{-8}$, если пользоваться сантиметрами, граммами и секундами), из-за чего выглядит малой; но Специальная площадь $2{,}61 \times 10^{-66}$ см$^2$ запредельно мала по сравнению с любыми площадями, которые мы можем вообразить в рамках хоть какого-то опыта. Если Специальную площадь действительно представлять себе как квадрат, то длина его стороны будет во столько же раз меньше *атома*, во сколько раз атом меньше — нет, не яблока, не Земли и не радиуса земной орбиты, а расстояния, на преодоление которого свету требуется без малого месяц, что намного дальше, чем уходят от Солнца самые далекие известные объекты Солнечной системы, включая все упомянутые на прогулке 3.

Чтобы получить энтропию черной дыры, площадь горизонта надо выразить через число, показывающее, сколько раз на этой воображаемой поверхности укладывается квадрат невообразимо малого размера; неудивительно, что энтропии черных дыр оказываются колоссальными. Полюбившаяся нам черная дыра на рис. 7.15 не может похвастаться большой площадью поверхности горизонта: в одном квадратном метре уместится 40 таких горизонтов и почти половина еще одного. Но эта малая площадь выражается в терминах Специальной площади колоссальным числом порядка $10^{67}$. Для черной дыры, имеющей массу Солнца, площадь ее горизонта — уже $10^{77}$ повторений Специальной площади. Эти огромные числа — те самые *X*, которые при обсуждении количества незнания на уровне молекул выглядели *короткими* числами: скажем, из трех знаков, а не из семидесяти семи.

### *В черных дырах — основная энтропия Вселенной*

Черные дыры несут в себе основное энтропийное содержание Вселенной. Продолжая в самом общем виде идеи Больцмана, мы думаем, что с высокими значениями энтропии как-то связаны степени свободы — тем или иным образом реализованные состояния *чего-то* («квантовой гравитации»), но мы не знаем, каковы они. Наличие Специальной площади само по себе не означает, что пространство-время составлено из каких-то кубиков; мы просто не знаем, о чем вообще можно говорить на столь малых масштабах, а «потыкать» туда нам нечем — не только потому, что фотонов (света) с подходящей длиной волны нет под рукой, но и по более фундаментальным причинам: такой фотон оказался бы носителем столь большой энергии в столь малом объеме, что сам превратился бы в черную дыру. Специальная площадь, таким образом, указывает на грань, ниже которой заведомо не распространяются наши представления о пространстве-времени, да и движении, и эта грань — предельные по своей интенсивности проявления гравитации. Она работает там в квантовом режиме, а от его систематического понимания мы довольно далеки. В отсутствие каких-либо подробностей относительно происходящего там мы пытаемся получить подсказки от энтропии: опирающиеся на нее соображения вызывающе безразличны к деталям, а потому иногда позволяют заглядывать глубже, чем проникает взор, различающий подробности.

На рубеже XX в. граница понятного мира проходила на 25 порядков выше — на масштабе, выражающем размер атома, и при невозможности «заглянуть внутрь» самая первая подсказка о неожиданном (квантовом!) укладе внутриатомной жизни также появилась не без помощи энтропии. «Энтропийные» соображения помогли угадать закон излучения — первый закон природы, отражающий квантовую природу мира. Чуть выше мы брали его взаймы, а сейчас наконец обсудим связанную с ним интригу по порядку. Закон носит имя своего первооткрывателя — Планка.

*****

**Расфасовка света.** Мы отступаем от эффектов сверхсильной гравитации и сопутствующих им ужасов в виде 77-значных чисел в *несравненно* более близкий нам мир молекул и атомов, а заодно в год со знаменательным номером 1900, когда Планк установил первый квантовый закон природы — закон излучения. В максимально грубой формулировке этот закон говорит, каким цветом светится нагретое тело в зависимости от его температуры; а точнее, речь идет о том, как интенсивность излучения распределена по разным длинам волн. Если вам случалось настраивать монитор вашего компьютера, то вы могли обнаружить указание на *температуру*, скажем, 6000 K — что вообще-то близко к температуре на поверхности Солнца. Как-то раз, высказав подозрение, что *внутри монитора* таких температур все-таки нет, я получил от консультанта в магазине исчерпывающее пояснение: «Но ведь это абсолютно черное тело» (что это, собственно, такое, мы обсудим чуть позже). Планковский закон излучения «абсолютно черного тела» оказался точкой входа в квантовый мир. Это достижение состоялось благодаря счастливому сочетанию нескольких факторов: предшествовавших теоретических идей, прогресса в экспериментальной науке, настойчивости самого Планка, его удачливости в квалифицированном угадывании, а еще — энтропии.

Сначала Планк собирался решить совсем другую задачу. Еще в 1894-м его заинтересовала возможность строго вывести закон возрастания энтропии, исходя из первопринципов. Возрастание энтропии — синоним необратимости, и в поисках источника необратимости Планк взялся исследовать процессы излучения и поглощения света (электромагнитных волн) веществом. Главное про электромагнитные волны сами по себе было известно к тому времени из вторых-бессмертных-после-законов-Ньютона уравнений, записанных Максвеллом. Они говорят, в частности, что излучение случается тогда, когда электрический заряд *меняет* характер своего движения — испытывает ускорение. Хотя тела вокруг нас электрически нейтральны, *там внутри* имеются положительные и отрицательные заряды; сейчас про них известно много подробностей, но и без этих подробностей можно было сделать вывод и о существовании зарядов, и о чем-то вроде их колебательного движения, исходя из одного только факта *теплового излучения*: все тела излучают электромагнитные волны просто оттого, что имеют некоторую температуру (рис. 9.12). На этом среди прочего основано «инфракрасное видение» во всех его разнообразных вариантах, от приборов ночного видения до существенного компонента систем дистанционного зондирования Земли.

**Рис. 9.12.** Тепловое излучение

Планка, однако, ждало разочарование: он вскоре понял, что надежды найти источник необратимости в процессах взаимодействия света и вещества тщетны. Но эта неудача в блуждании на ощупь оказалась не концом, а началом истории: свое желание понимать вещи исходя из первопринципов Планк перенес на законы излучения. Каждое нагретое тело излучает волны всех длин, но с разными интенсивностями, и длина волны, на которую приходится пик излучения, зависит от температуры. Строго говоря, при этом обсуждается излучение тела, которое не отражает «ни лучика» из падающего на него света, а *только* испускает излучение из-за того, что нагрето. Такой источник излучения как раз и называется «черное тело» (или, видимо, для красоты, «абсолютно черное тело»). Этот *термин*, звучащий как обычное слово, вводит в небольшое заблуждение: черное оно, строго говоря, только при температуре абсолютного нуля (неплохим примером абсолютно черного тела является Солнце). Связь между длиной волны, на которой «черное тело» излучает сильнее всего, и температурой была известна Планку как один из законов Вина — законов излучения, носящих имя их первооткрывателя. В другом законе Вин обобщил экспериментальные факты о свойствах излучении в виде формулы, которая неплохо описывала интенсивность излучения на разных длинах волн. Формула представляла собой «умную» подгонку под данные наблюдений и содержала две постоянные, численные значения которых следовало выбрать на основании экспериментальных данных [191]. Планк спросил себя: из какого знания можно было бы *вывести* формулу Вина? Наблюдая тепловое излучение, мы вообще-то получаем сигналы о том, что происходит где-то *внутри* молекул и атомов: из-за беспорядочного движения, которое *где-то там* происходит, заряды подвергаются беспорядочным ускорениям; они и излучают беспорядочно. Вопрос о том, что в точности представляют собой «состояния» электрических зарядов в веществе, как мы теперь знаем, не мог быть решен ни в конце XIX в., ни в начале следующего столетия; более того, решение требовало как минимум тех знаний, дорогу к которым еще только предстояло проложить Планку. Если бы Планк об этом знал, возможно, ничего бы и не произошло (а в 1890-е гг. Планк вообще не был уверен в реальности атомов и молекул; его сомнения подогревались тем, что, допустив существование молекул, приходилось, как тогда казалось, признать возможность демона Максвелла, который нарушает закон возрастания энтропии, а это Планку крайне не нравилось). Но Планк вооружился энтропией, а сила подходов, вовлекающих энтропию, как раз и состоит в возможности гусарского отношения к деталям. Не обязательно знать тонкости внутреннего устройства, достаточно допустить, что там имеется нечто максимально простое, способное излучать на каждой частоте, а именно множество колебательных систем — зарядов, колеблющихся с разными частотами. Между собой они находятся в состоянии теплового равновесия. Как мы видели, молекулы в газе в состоянии теплового равновесия «расталкивают» друг друга так, что устанавливается вполне определенное распределение молекул по энергиям; здесь же колебательные системы с различными частотами «расталкивают» друг друга путем обмена энергией так, что тоже устанавливается некоторое равновесное распределение по энергиям. О том, каким оно получилось, мы судим по характеру излучения: по тому, какую долю всей излучаемой энергии несут различные частоты [192].

Используя основные теоретические концепции, известные к тому моменту, Планк нашел, как в равновесии должна выглядеть связь между средней энергией колеблющихся зарядов и энергией, которую несет излучение с данной частотой. Соединив этот результат с формулой Вина (глупо было делать вид, что ее нет), Планк получил знание про энтропию, которое его очень вдохновило: зависимость энтропии от средней энергии колебательных систем управлялась уравнением, которое подсказывало, что энтропия всегда возрастает. Оставалось полшага до обратного вывода, который и был целью Планка: взяв в качестве первопринципа закон возрастания энтропии и использовав найденную им связь между средними энергиями, вывести закон Вина теоретически! Увы, это было невозможно. Мы отлично знаем это сейчас, и это же стало предельно ясно в октябре 1900 г., когда появились новые данные экспериментов. Они говорили, что природа описывается законом Вина не вполне точно — и тем хуже, чем больше длина волны излучения. Расхождения были очевидными, и они означали, что «подгоночный» закон Вина не является фундаментальным, а значит, его нельзя строго вывести из фундаментальных принципов. Надежды Планка снова рухнули.

Планк тем не менее продолжал думать в терминах уравнения для энтропии, которое говорило, как она зависит от энергии. Он волюнтаристски изменил это уравнение: несколько усложнил его, внеся туда элементы, которые могли опосредованным образом отражать новые экспериментальные данные для длинных волн. С использованием нового — строго говоря, ниоткуда не следовавшего — уравнения делом техники было получить новое выражение для того, как энергия распределена по колебаниям в веществе и как заодно она распределена по разным частотам излучения. Волшебным образом оказалось, что новое выражение для интенсивности излучения в зависимости от длины волны отлично согласуется с наблюдениями *для всех* длин волн. Заодно выяснилось, что закон излучения Вина — это упрощение новой формулы, допустимое для достаточно коротких волн. Одна из двух декабрьских статей Планка называлась «Об одном улучшении закона излучения Вина»; это *улучшение* теперь называется законом Планка или, на всякий случай, законом излучения Планка. Ничего сверх этого про излучение черного тела с тех пор придумывать не потребовалось. Так называемая цветовая температура вашего монитора — это та температура, при которой распределение интенсивности по длинам волн для вашего устройства ближе всего к распределению интенсивности абсолютно черного тела, которое описывается формулой Планка. И именно закон излучения Планка позволяет приписать температуру черной дыре.

После удачи, сопутствовавшей Планку с «умным угадыванием», можно было бы, наверное, счесть дело сделанным — и многие, вероятно, остановились бы в своих исследованиях данного предмета, коль скоро получен такой прекрасный, законченный результат. Но он не был законченным для Планка. Со свойственной ему концентрацией на первопринципах Планк нуждался в оправдании своих собственных волюнтаристских действий (изменения уравнения) исходя из каких-то фундаментальных механизмов. Он продолжал обдумывать угаданную им зависимость энтропии от энергии. Именно Планк впервые записал формулу для больцмановской энтропии в том виде, который теперь высечен в камне, и теперь он же обратился к этой формуле, чтобы узнать, сколько имеется реализаций, при которых система «излучение + вещество» в равновесии производит одну и ту же наблюдаемую картину излучения. Случившееся далее выросло из безобидного технического момента, который и нам уже несколько раз встречался. Нельзя считать состоянием буквально каждое значение частоты, потому что такие состояния невозможно сосчитать, как невозможно сосчитать точки на отрезке линии. Когда мы измеряем длину отрезка, мы выражаем ее не в количестве точек, а в количестве *делений*, нанесенных на линейку. Аналогичным образом требовалось ввести какие-то «деления» на шкале энергии. Собственно говоря, так действовал и Больцман, обсуждая связь энтропии и числа реализаций макроскопической картины. В той постановке задачи Больцмана интересовал выбор ячеек — «нанесение делений» — на шкале энергий; он не видел никакого предустановленного выбора для размера ячеек (интервала между делениями), и еще в 1877 г. ему пришлось сказать, что конкретный размер не имеет большого значения. Если другой исследователь выберет размеры ячеек как-то иначе, то с энтропией произойдет не самое страшное: ко всем ее значениям просто прибавится одно и то же число — а это не слишком большая беда, потому что не влияет на разницу энтропий («стало минус было»), которая в основном всех и интересует. В любом случае способа избежать этой неоднозначности у Больцмана не было, поскольку никто еще не знал, что во Вселенной определены ячейки специального размера.

Планк чрезвычайно удачно «нанес деления» на шкалу энергий — что вообще-то было еще одним элементом угадывания. В отличие от делений на линейке, расстояния оказались не одинаковы. Их размер возрастает вместе с частотой: для частоты вдвое выше размер в два раза больше: (интервал энергии) = (постоянная) · (частота). Входящую сюда *постоянную* Планк решил считать вообще ни от чего не зависящей. Значение ее надлежало определить из эксперимента. Оказалось, что оно «малое»: содержит множитель $10^{-34}$, если пользоваться метрами, килограммами и секундами (и чуть менее огорчительные $10^{-27}$, если пользоваться сантиметрами, граммами и секундами): $h = 6{,}62607015 \times 10^{-34}$ кг · м$^2$/с. Ничего не подозревающий автор закона излучения думал об этой постоянной всего лишь как об инструменте для подсчета числа реализаций, нужного для вычисления энтропии. Сейчас (и уже давно) она называется постоянной Планка или (несколько реже) квантом действия $h$, но в декабре 1900 г., когда Планк решил учитывать энергию порциями величиной $h$ · (частота), никто еще букву $h$ так не называл.

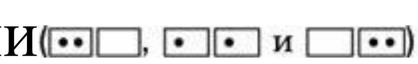
Превратив с помощью буквы $h$ выражение для энтропии в выражение для числа реализаций, Планк углядел в нем неожиданное и ранее не встречавшееся — черты комбинаторной задачи. Комбинаторные задачи имеют дело с числом способов создать какие-то конфигурации — например, разложить заданное число предметов по некоторому числу ящиков. Если сами предметы различать между собой не нужно, то, скажем, два предмета можно распределить по двум ящикам тремя способами ; два предмета по трем ящикам — уже шестью; три по пяти — тридцатью пятью; еще один пример приведен на рис. 9.13. Обсуждаемое число способов сравнительно невелико при малом или даже умеренном числе предметов или ящиков, но оказывается необычайно большим, когда много и предметов для раскладывания, и ящиков.

**Рис. 9.13.** Четыре неразличимых предмета можно разложить по трем ящикам пятнадцатью различными способами

Вместо «предметов» перед глазами Планка оказались порции энергии величиной $h$ · (частота), а вместо ящиков — колебательные системы (колеблющиеся заряды), служащие источниками излучения в веществе. За довольно впечатляющий срок (около двух месяцев напряженной работы) Планк извлек из своей волюнтаристской формулы указание, что колебательные системы могут обладать не любой энергией, а только сложенной из некоторого числа порций. Полную энергию, другими словами, следовало разбить на порции указанного размера и далее обращаться с порциями как с предметами: раздавать их по колебательным системам так, как будто предметы распределяются по ящикам. Полное число реализаций одной и той же картины (излучение на заданной частоте, обусловленное температурой вещества) оказалось в точности равным числу способов распихать порции энергии по колебательным системам, как по ящикам. Число реализаций отправляется далее в формулу Больцмана для энтропии, а из знания энтропии выводится условие равновесия, что и дает закон излучения, превосходно описывающий реальный мир.

Безоговорочный успех — полное и точное согласие с опытом — закона излучения, опирающегося на формулу Планка для энтропии, придавал легитимность постулатам, на основе которых он этот закон получил. Собственно говоря, к известным первопринципам надо было добавить только неизвестно откуда взявшийся учет энергии порциями специального размера $h$ · (частота). Правда, предлагаемое предписание по обращению с энергией было не похоже ни на что известное, коль скоро энергия, согласно опыту, представляет собой величину непрерывную; и порции почему-то следовало брать разного размера для колебательных систем с разными частотами — но тогда все и сходилось! Планк чрезвычайно прозорливо усмотрел в своей формуле скрытую комбинаторную задачу, но считал всю «порционную» идею лишь техническим приемом, а не разрывом с известным знанием — чем она была на самом деле.

Ниоткуда не следовавший постулат о порциях оказался самым фундаментальным законом, открытым Планком. Среди прочего он привел к радикальным изменениям представлений о движении.

*****

**Квант действия.** Постоянная Планка *h* оказалась входным билетом в описание мира, где многое — и в первую очередь, пожалуй, движение — устроено не так, как мы привыкли. Она — одна из Мировых постоянных нашей Вселенной (в том же клубе — скорость света *c* и постоянная гравитационного взаимодействия *G*), и ее появление в любом выражении — неоспоримое указание на его «квантовую природу». Мы достаточно подробно обсудим, что это значит, на следующих прогулках, а пока можно думать, что «квантовый» означает устройство вещей, в ряде случаев предполагающее наличие некоторых «порций» или «ячеек» — во всяком случае, слово «квант» было первоначально выбрано для указания на некоторое отмеренное количество чего-либо [193]. Самому Планку его постоянная требовалась для введения дискретных «делений» на шкале энергии. *Насколько* такая дискретность соответствовала природе вещей, а не была вычислительным приемом, выяснилось не сразу; на современников закон Планка слишком большого впечатления поначалу не произвел. В 1905 г. Эйнштейн предложил объяснение происходящего в совсем другой ситуации, постулировав, что свет поглощается *только* порциями энергии и каждая такая порция буквально равна выражению *h* · (частота); это относилось уже не к упаковке каких-то значений энергии в «ячейки», как вроде бы было у Планка, а к свойствам света: при заданной частоте не бывает порций света меньшего размера. Впоследствии (1921) эта идея Эйнштейна была удостоена Нобелевской премии, но в 1900-х гг. события развивались еще неспешно. Для самого Планка осознание истинного смысла достигнутого — принципиального разрыва между описаниями мира без буквы *h* и с ней — заняло без малого десять лет (понадобилось влияние Лоренца, Эренфеста и других, а также вклад Эйнштейна).

Только в 1911-м постоянная $h$ была «наконец» использована для вычисления энтропии газа — использована в качестве предустановленного размера «ячеек», которого не хватало Больцману, чтобы вычислить количество реализаций каждой макроскопической картины и найти абсолютное значение энтропии из формулы, которая теперь сопровождает его навсегда. Впечатляющим образом энтропия, найденная с использованием формулы Больцмана, совпала с экспериментально определенным значением, если в качестве фиксированного «размера» использовалась именно постоянная $h$; правда, это были ячейки не для энергии. Точное выражение для энтропии (результат вычисления «числа ячеек» и применения формулы Больцмана) носит имена своих первооткрывателей Тетроде и Саккура [194]; эксперимент по его проверке, который оказался осуществимым для паров ртути, потребовал и остроумия, и использования ранее полученных данных о нескольких других величинах. Установленное совпадение свидетельствовало о нескольких фактах сразу: формула Больцмана работает, а абсолютно точной делается тогда, когда отдельные состояния каждого движущегося атома/молекулы — это ячейки фиксированного размера $h$. Но только где или в чем эти ячейки?

Ячейки, которые отмеряет буква $h$, — это площади некоторых «площадок», но не в обычном пространстве, а в воображаемом, однако напрямую связанном с движением. Состояние каждого атома или молекулы — это три координаты и три компоненты количества движения; они сами собой разбиваются на пары: координата вдоль выбранного направления 1 и количество движения вдоль того же направления 1; аналогично координата вдоль направления 2 и количество движения вдоль того же направления 2; и разумеется, то же для направления 3 (рис. 9.14 слева). Возьмем для начала пару, отвечающую направлению 1, и представим эту пару чисел графически — точкой на воображаемой плоскости, как показано на рис. 9.14 справа.

На этой плоскости проведены две оси: горизонтальная отображает координату 1 из обычного пространства, а вертикальная — количество движения вдоль того же направления 1. Когда мы точно так же поступим с координатами атома и компонентами его количества движения вдоль направлений 2 и 3, получится три воображаемые плоскости. Будем временно называть каждую из них Плоскостью действия. На рис. 9.14 изображена только одна из них, отвечающая направлению 1, и на ней мы и сконцентрируемся (с двумя другими все совершенно аналогично). Постоянная Планка $h$ — это *предустановленная площадь, определяющая размер «ячеек»* на Плоскости действия. Этими ячейками могут быть прямоугольники любых пропорций, но фиксированной площади, как показано на рис. 9.15. Всю *область* на Плоскости действия, которая в принципе доступна данной частице (положение вдоль оси 1 при соответствующем количестве движения вдоль той же оси), следует «нарезать» на кусочки площади $h$ каждый; число кусков и есть число состояний (с пониманием, что аналогичное вычисление надо проделать и для двух других Плоскостей действия, а результаты перемножить). Это число состояний отправляется в формулу Больцмана, которая в течение пары десятилетий и мечтать не могла о подарке в виде предустановленного размера. В подобном качестве постоянную $h$ иногда называют квантом действия; эта постоянная, отмеряющая «размер ячеек», имеет совсем иной характер по сравнению с уже встречавшимися нам скоростью света $c$ и гравитационной постоянной $G$: это не скорость и не стандартизованная сила, но Вселенная без нее тоже не продается [195].

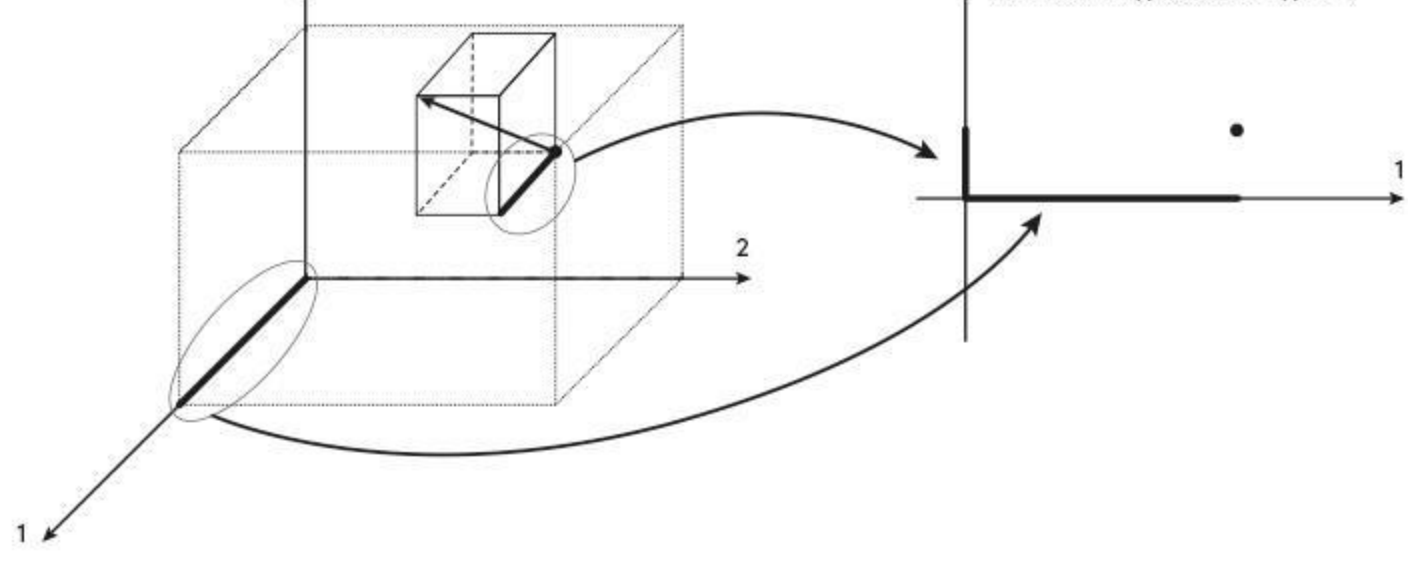


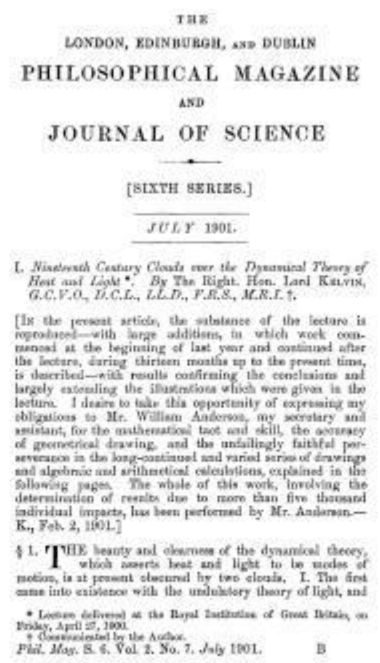
**Рис. 9.14.** *Слева:* движущийся атом, схематично представленный положением в пространстве (жирная точка) и стрелкой, которая выражает его количество движения. Точка задается своими координатами по каждой из осей 1, 2 и 3. Вокруг стрелки выполнено построение, из которого видны ее компоненты вдоль тех же осей. *Справа:* воображаемая плоскость, где на горизонтальную ось перенесена координата атома вдоль оси 1, а на вертикальную ось — его количество движения вдоль той же оси. Положение точки на плоскости, таким образом, кодирует одну координату и одну компоненту количества движения атома


**Рис. 9.15.** Несколько прямоугольников на Плоскости действия, которые имеют одну и ту же площадь

Все это несколько необычно, потому что, с одной стороны, процедура выглядит умозрительной: форма ячеек не имеет значения, важна только площадь, из-за чего возникает ощущение, что ячейки какие-то «ненастоящие» (да и наносить их предлагается на воображаемую плоскость!). С другой стороны, разнообразные экспериментальные проверки, начиная с пионерских результатов Тетроде и Саккура, свидетельствуют, что пары ртути, и далеко не только они, «прекрасно осведомлены» о ячейках с площадью, точно равной $h$, на каждой Плоскости действия. Но как же фиксированные площади ячеек могут входить в устройство вещей? Ведь речь идет о движении — например, тех самых атомов ртути, которые, казалось бы, делают «что хотят» и которые решительно невозможно принудить к какой-то дискретности на воображаемых плоскостях, да еще с учетом только заданной площади, но не формы.

Взглядам на мир предстояло поменяться. Развитие представлений о внутреннем движении привело к впечатляющим результатам, один из которых состоял в крепнущем осознании, что «там что-то не так» — что для самого движения внутри вещей действуют какие-то другие правила. *Весной* того же — «планковского» — 1900 года лорд Кельвин выступил перед Британской ассоциацией по развитию науки с речью «Тучи XIX столетия над динамической теорией тепла и света», расширенный вариант которой был затем опубликован под тем же названием (рис. 9.16) [84]. Первые слова и выступления, и статьи говорили о двух совсем разных видах движения:

Красоту и ясность динамической теории, согласно которой тепло и свет — это виды движения, в настоящее время затмевают две тучи.



THE
LONDON, EDINBURGH, AND DUBLIN
PHILOSOPHICAL MAGAZINE
AND
JOURNAL OF SCIENCE

[SIXTH SERIES.]

*JULY* 1901.

I. *Nineteenth Century Clouds over the Dynamical Theory of Heat and Light**. *By* The Right. Hon. Lord KELVIN, *G.C.V.O., D.C.L., LL.D., F.R.S., M.R.I.*†.

[IN the present article, the substance of the lecture is reproduced—with large additions, in which work commenced at the beginning of last year and continued after the lecture, during thirteen months up to the present time, is described—with results confirming the conclusions and largely extending the illustrations which were given in the lecture. I desire to take this opportunity of expressing my obligations to Mr. William Anderson, my secretary and assistant, for the mathematical tact and skill, the accuracy of geometrical drawing, and the unfailingly faithful perseverance in the long-continued and varied series of drawings and algebraic and arithmetical calculations, explained in the following pages. The whole of this work, involving the determination of results due to more than five thousand individual impacts, has been performed by Mr. Anderson.—K., Feb. 2, 1901.]

§ 1. THE beauty and clearness of the dynamical theory, which asserts heat and light to be modes of motion, is at present obscured by two clouds. I. The first came into existence with the undulatory theory of light, and

* Lecture delivered at the Royal Institution of Great Britain, on Friday, April 27, 1900.
† Communicated by the Author.
*Phil. Mag.* S. 6. Vol. 2. No. 7. *July* 1901. B

**Рис. 9.16.** *Слева:* первая страница статьи Кельвина «Тучи XIX столетия над динамической теорией тепла и света». *Справа:* памятник Уильяму Томсону (с 1866 г. — сэр Уильям Томсон, а с 1892-го — барон Кельвин; титул отчасти отражал его вклад в науку о теплоте и энтропии, а отчасти его политическую позицию)

*Ясную* картину мира затмевали две тучи (или, в зависимости от умонастроения переводчика, омрачали два облака): сложности с законами теплового излучения и не вполне понятные свойства распространения света. Вторая «туча» — предвестник теории относительности (прогулка 5), до появления которой оставалось пять лет. Первая же — предвестник квантовой механики; создание ее во всей полноте потребовало больше времени, но самая первая квантовая формула — закон теплового излучения — появилась уже в декабре. Науку о движении ожидали большие перемены.

## Добавления к прогулке 9

**Определение энтропии «из теплоты».** К определению энтропии можно прийти (и это сделал главным образом Клаузиус), развивая рассуждения Карно и оперируя теплом/теплотой (это энергия) и температурой (это то, что одинаково у тел, между которыми тепло *не* перетекает).

Телам — вашему кофе, например — можно передавать и у них можно забирать теплоту; для этого, собственно, и придуманы разнообразные разогревающие (да и охлаждающие) устройства. Если кофе сначала нагрели, а потом охладили до исходной температуры, то вроде бы сколько тепла в него вошло, столько потом и ушло. Но это потому, что от кофе трудно добиться, чтобы в процессе нагреваний и охлаждений он двигал соседние тела, т.е. совершал работу (часто говорят «полезную работу»). Старомодный чайник, крышка которого приподнимается от давления водяного пара (рис. 9.17), подходит чуть лучше, даже если *полезность* работы по приподниманию крышки не вполне очевидна. В зависимости от того, сильно ли подпрыгивала крышка, содержимое чайника отдаст меньше теплоты, когда он будет остывать, чем получило при нагревании — из-за затрат энергии на приподнимание крышки. То же самое, но без помощи чайника: *какая-то* система (например, газ под подвижной крышкой — поршнем) переходит из состояния 1 в состояние 2 разными способами (газ сначала нагревают, а потом дают расшириться или наоборот; или где-то в середине приводят в контакт с холодным телом и т.п.). Количество теплоты, которое в итоге система получит/отдаст, зависит от последовательности действий, притом что начальное и конечное состояния (давление, температура, объем) остаются фиксированными. Но вот что оказалось: *если передаваемую теплоту брать с «уценкой»*, то зависимость от последовательности действий по переводу из начального состояния в конечное пропадает. Я рискну описать ситуацию в житейских терминах, надеясь на снисходительность моих спутников по этой прогулке там, где история становится совсем уж сумасбродной; важна не реалистичность, а идея.

Если вы планируете прогулку из пункта 1 в пункт 2 и один путь ведет вас по асфальту, а другой — по глубокой грязи, то вы, без сомнения, затратите на дорогу разное количество энергии; это не кажется удивительным никому, кто хоть раз пробовал месить грязь ногами на разбитой тропе. Однако в той сказочной стране, где вы всем этим занимаетесь, вы могли бы заметить нечто неожиданное (если вы так же наблюдательны, как Клаузиус). Записывайте порцию энергии, которую вы тратите на каждый шаг, и (!) делите ее на текущее значение некоторой величины Р. Эта Р — нечто, что характеризует ваше состояние в каждый момент, но может меняться от момента к моменту в зависимости от всего, что с вами происходит; я рискну предложить в качестве такой характеристики «радость». Радость от прогулки по асфальту низкая (вы же, скорее всего, ходите так каждый день), и небольшие порции энергии, которые вы тратите на каждый шаг, надо поделить на небольшую величину. Радость же от вытаскивания ноги из грязи — предположительно колоссальная, и значительную затраченную при этом энергию вы делите на большую величину, из-за чего получается нечто умеренное. Если походы по пересеченной местности не ваш конек, то можно договориться, что Р означает «расстройство». Так или иначе, Р — меняющаяся по ходу прогулки характеристика вашего текущего *состояния*.

**Рис. 9.17.** Чайник представляет собой очень несовершенный вариант тепловой машины. Тем не менее, если заткнуть носик, плотно закрытую крышку может сорвать, что означает превращение тепла в (полезную) работу

Учтя все затраты энергии и сложив все вклады $\frac{\text{затраты}}{P}$ при прогулке по тротуару и через болото, вы обнаружите, что в этой волшебной стране получается всегда одно и то же вне зависимости от пути. Выбор дороги между любыми двумя точками не влияет на то, какая получится сумма $\frac{\text{затраты}_1}{P_1}+\frac{\text{затраты}_2}{P_2}+\frac{\text{затраты}_3}{P_3}+\cdots$ взятая по всем шагам вдоль этой дороги [196]. А раз выбор дороги не имеет значения, то в тех пунктах, где вы часто бываете, вы можете просто расставить таблички: быть может, 30 в точке 1 и 42 в точке 2, которые означают, что при переходе $1 \to 2$, *неважно, по какому пути*, это нечто, связанное с вами, всегда меняется на 42 – 30 = 12. Что же получается? Вы внезапно открыли *в себе* некоторое свойство *S*: в точке 1 вы находитесь *в таком состоянии*, что ваше *S* там равно 30; в точке 2 оно равно 42. Свойство *S* — это *не* затраты (энергии) и уж тем более не радость, но вы догадались о его существовании, учитывая затраты энергии на единицу радости, испытываемой в каждый данный момент.

С аналогией/аллегорией радостного туриста пора заканчивать, ее возможности ограниченны, но я надеюсь, что она передала главное: нашлась величина, изменение которой от состояния к состоянию не зависит от пути перехода между состояниями, а значит, эта величина однозначно связана с самим состоянием (для каждого какая-то своя). Только никаких пространственных перемещений у Клаузиуса нет, а «пути» — это какие-то способы перехода между различными *макро*скопическими состояниями тел (с разными давлением, температурой, объемом). С каждым макроскопическим состоянием, *оказывается*, связано некоторое свойство, измеряемое числом *S*. Изменение этого *S* между двумя состояниями равно вот чему: надо посчитать все порции теплоты, которые передавались системе (они могут быть положительными или отрицательными, как мы договорились), каждую порцию надо «уценить», поделив на температуру *T*, *при которой* эта передача осуществлялась, после чего полученное на каждом шаге надо сложить [197]. По какому «пути» переходить при этом между двумя состояниями? По любому! Одно и то же изменение величины $S$ получится независимо от выбора пути.

Это новое свойство $S$ и называется энтропией. У каждого макроскопического тела, в каждом его макроскопическом состоянии, всегда есть некоторая энтропия. Важная оговорка: при этом остается неясным, от какого уровня энтропию отсчитывать, ведь мы смогли определить только ее изменение между любыми двумя состояниями. (Эту проблему в полной мере сознавал и Больцман; его формула для энтропии через число реализаций «знала больше, чем ее создатель» — она ждала заключительного штриха в виде кванта действия $h$.)

**Больцмановский мозг.** Идея, что больцмановская энтропия может из-за флуктуаций понизиться, пусть и с очень малой вероятностью, приводит к отдельной серии парадоксальных рассуждений: если ждать *очень* долго, то вроде бы можно дождаться флуктуации любого масштаба. Правда, «очень» может означать время, существенно (на колоссальное число *порядков*) превосходящее возраст Вселенной. Пока все хорошо: в имеющейся сравнительно молодой Вселенной безумным флуктуациям места нет, так что неудивительно, что мы их здесь и не наблюдаем. Но что если Вселенная в своем (ускоряющемся) расширении просуществует неограниченно долго? Тогда за неопределенно большой промежуток времени — не за примерно 14 млрд лет, прошедших после Большого взрыва, а в фантастически далеком будущем — может случиться очень разное: например, флуктуация, в силу которой образуется Солнечная система со всеми подробностями, включая все, что нас окружает на планете Земля. Не разовьется эволюционно, как мы это себе представляем про наш мир, а возникнет в виде флуктуации. Да, вероятность этого *чудовищно* мала. Но заметно выше (хотя и все равно необычайно мала) вероятность, что флуктуации сложатся в более простую систему: один мозг (в окружении космоса), в котором записана вся знакомая вам картина окружающего мира, включая историю человечества на планете Земля в той самой Солнечной системе, историю науки и техники, личные воспоминания, ощущения от контактов с окружающей средой и т.п. Возникновение в качестве флуктуации вероятнее для одного мозга, заполненного всеми этими представлениями, чем для мозга внутри живого существа, окруженного другими живыми существами на планете вблизи Солнца в галактике Млечный Путь в Местной группе галактик в скоплении Девы. Уединенная ощущающая конструкция, которой «всё это кажется», известна как «больцмановский мозг». Парадоксальность ситуации в том, что если расширяющаяся вселенная вечна, то вероятность возникновения больцмановских мозгов делается такой, что вы должны скорее всего оказаться одним из них — флуктуацией, произошедшей в действительности в неопределенно далеком будущем и включающей последовательную систему наведенных ощущений, говорящих, что вы живете в эволюционирующей вселенной, которой не исполнилось и 14 млрд лет и которая управляется законами, часть которых люди поняли, сделав из них вывод, что сами должны с большей вероятностью являться больцмановскими мозгами.

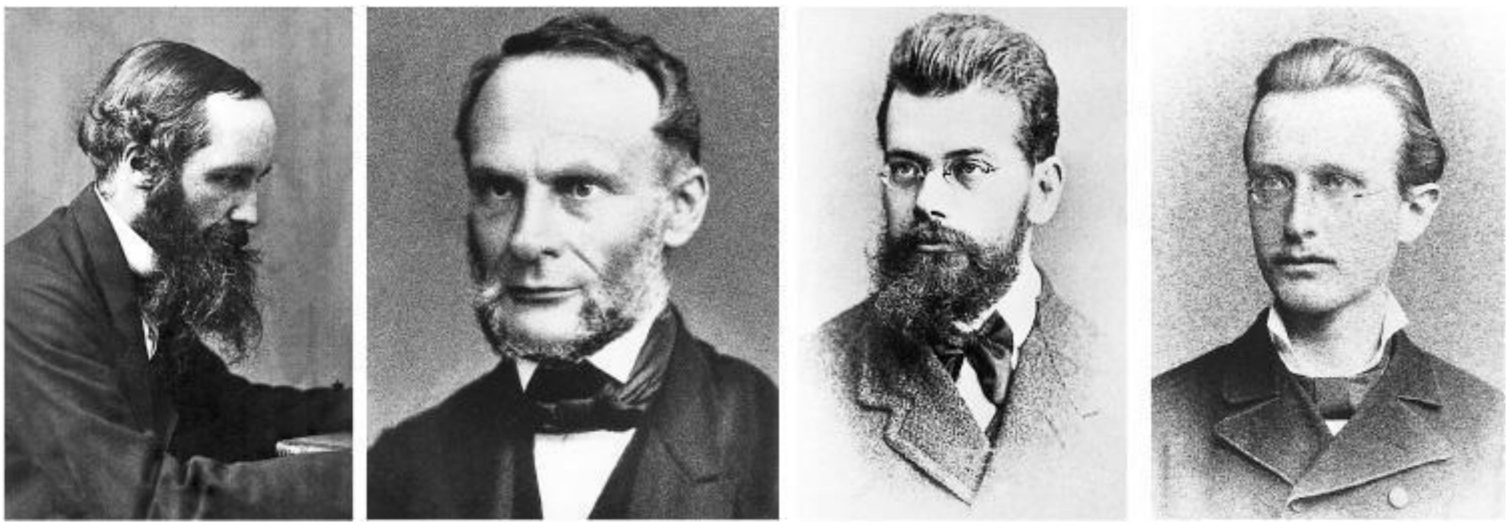


**Рис. 9.18.** Джеймс Клерк Максвелл, Рудольф Юлиус Эмануэль Клаузиус, Людвиг Эдуард Больцман, Макс Карл Эрнст Людвиг Планк

**Действующие лица.** Четверо основных участников событий представлены на рис. 9.18.

**Энтропия — беспорядок?.**По-видимому, нет независимого способа определить, какие расселения молекул по состояниям мы считаем «более упорядоченными», а какие «более беспорядочными», не прибегая для этого к энтропии. Поэтому популярное высказывание, что энтропия — это мера беспорядка, несет в себе не так много содержания. Напротив, интерпретация энтропии как степени *незнания* видна непосредственно из определений (больцмановского, а также некоторых других, родственных ему).

## Признания и **литературные комментарии**

Средние скорости молекул, которые я по нескольким поводам вычисляю, понимаются как среднеквадратичные, которые непосредственно связаны с энергией движения; средняя скорость по распределению чуть меньше, отличаясь множителем $\sqrt{8/(3\pi)} \approx 0{,}92$. Под теоремой о «массовом поведении частиц» имеется в виду теорема Лиувилля об эволюции плотности числа состояний в фазовом пространстве. Говоря о статистическом описании макроскопических тел и сред, я полностью проигнорировал аспект ансамблей. Не добрался я и до формулы Эйнштейна для флуктуаций. Случайные блуждания в тех или иных условиях — важный вид движения в природе, в том числе в живой, в первую очередь внутри клетки, а также, например, в задаче об оплодотворении (где, впрочем, наиболее интересный вопрос не о среднем времени для всех блуждателей, а о том, каково типичное время, за которое цель будет достигнута *хотя бы одним* блуждателем). Современная *рукотворная* вариация на тему случайных блужданий, на которую обратил мое внимание Сергей Нечаев, — так называемые янус-частицы. Это частицы нано- или микромасштаба, поверхность которых различна с двух разных сторон: скажем, одна сторона отражает, а другая поглощает свет. Под действием падающего излучения случайное поведение таких частиц демонстрирует разнообразие свойств, включая подобие самоорганизации.

«Закон неубывания энтропии» называется, конечно, вторым законом (началом, т.е. принципом) термодинамики. Не только энтропия, но и энтропия тоже, к тому же в связи с направлением времени, обсуждается в небольшой, но насыщенной книге [23]. Посвященная примерно той же теме (времени), но намного большая по объему книга [51] затрагивает разнообразные аспекты энтропии, в том числе такие, которые я совсем не рассматриваю. Процитированное высказывание Эддингтона об энтропии имеет широкое хождение; его источник — [63]. Энтропия от Карно до черных дыр обсуждается в [83]. Современные приложения науки об энтропии обсуждаются в книге [103]. По поводу демона Максвелла и связи энтропии и информации я следую обзору [89], где освещено множество интригующих подробностей, но трудно избавиться от ощущения, что и они не исчерпывают всех тонкостей. В отношении возрастания и невозрастания больцмановской энтропии мой источник — книга [99] (автор — брат сэра Роджера Пенроуза, которого мы встречали в связи с извлечением энергии из вращающихся черных дыр и с «утыкающимися» геодезическими). Алгоритмическая сложность (длина самого короткого описания) — это колмогоровская сложность. Развитые отношения демона и информации выводят на сцену информационную энтропию (Шэннона), но я остановился в шаге от нее; о ее близости к и отличиях от колмогоровской сложности см. [78]. Не стал я обсуждать и так называемую энтропию Гиббса, в некотором роде обобщающую энтропию Больцмана, и серию связанных с ней вопросов. Время от времени возобновляются обсуждения возможностей для убывания энтропии в малых квантовых системах; как напоминает мне Сергей Нечаев, дискуссии здесь порой оказываются неожиданно жаркими и даже выплескиваются из специализированной научной литературы на страницы популярных изданий. Мой источник знания о биографии Тетроде и Саккура — заметка [109]. Подробности того, как развивалось сражение Планка с формулой для излучения (мало согласующиеся с тем, что пересказывается из учебника в учебник), можно найти в [47], [71], [83].

Выражение «Специальная площадь» — изобретение для этой прогулки, а стандартное название — *планковская площадь*. Плоскость действия в общеупотребительной терминологии — это плоскость в фазовом пространстве. Пассаж Уилера о чае приведен в [108]. О Бекенстайне, Хокинге и энтропии Уилер говорит в небольшом ролике https://www.youtube.com/watch?v=Bti2_qwJkTA&t=47s , который является частью обширной подборки, где он высказывается по различным вопросам, возникавшим в ходе его жизни и научной карьеры (среди прочего он обсуждает и издание в СССР книги [18]). В отношении черных дыр я обошел молчанием информационный парадокс, возникший как развитие идей о температуре, энтропии и излучении. Это история разворачивается на наших глазах, и один из ее этапов выразительно описан в книге [24]. За ним, однако, последовали новые раунды. Упомянутое «отсутствие волос» у черной дыры, по-видимому, перестает быть верным при должном учете квантовых эффектов (а сохраняющаяся здесь степень неопределенности вызвана, конечно, отсутствием последовательной теории квантовой гравитации).

## Движение на прогулке 9

Невидимое и безостановочное движение окружает нас в прямом смысле слова везде, потому что вещи вокруг нас состоят из колоссального количества малых движущихся частей — молекул и атомов. Подробности этого движения «стерты» для нас, и из всего огромного числа его параметров мы непосредственно ощущаем только один — среднюю энергию движения, по существу являющуюся температурой. Дистанционное проявление внутреннего движения — тепловое излучение. В наших силах оказывается статистическое описание массового движения в терминах вероятностей, с которыми участники движения приобретают различные значения энергии. Сигналы о некоторых свойствах не наблюдаемого напрямую молекулярного движения удается считывать, наблюдая мелкие объекты значительно большего масштаба, чем молекулы. Воздействие на них со стороны молекулярного хаоса порождает специальный вид движения, сводящийся к случайной последовательности смещений; законы реализуемой при этом случайности лежат в основе широко распространенных явлений типа диффузии.

Неконтролируемость молекулярного движения оборачивается низкой эффективностью тепловых машин. Потерянное знание о молекулярном движении численно выражается энтропией. Эта величина, возникшая из законов передачи тепла и лишь затем понятая как мера потерянной информации, оказалась общей, универсально применимой концепцией, использование которой может давать подсказки об устройстве неизвестных частей мира. Она указала на наличие фундаментальной дискретности на субатомном уровне строения мира в тот момент, когда никакие подробности этого строения еще не были открыты; сейчас она же намекает на возможное «внутреннее содержание» черных дыр. Возрастание энтропии в макроскопических процессах отражает перераспределение внутреннего движения по все большему числу возможностей и необратимость подавляющего большинства процессов в мире. Равновесный характер внутреннего движения означает максимум энтропии. Идея использовать знание о поведении молекул для совершения работы затрагивает законы обработки информации, которые на самом фундаментальном уровне оказываются связанными с законами молекулярного движения.

## Прогулка 10

# Неопределенность и непримиримость

**Маршрут:** *Атом не должен существовать. — Природа не терпит траекторий. — Спасибо неопределенности. — Атом почти не существует. — Вражда, отбирающая свойства. — Господство целых чисел. — Напряженное существование. — Почему Менделеев был прав. — Неугомонные колебания. — Квантовая первооснова. — Кипящая пустота. — Один мир и две системы. — Вращение без движения. — Спин электрона, наконец-то! — Лишняя половина, и такая разница. — Про что же уравнение?*

**Главный герой:** *непримиримая вражда*

---

**Атом не должен существовать.** Неожиданно скоро после того, как окончательно утвердилась реальность атомов, случился «взрыв внутрь» — проникновение вглубь атома [198]. Атом оказался делимым и сложенным из некоторого числа «деталей», которые, очевидно, не могли не пребывать в движении, но одновременно с этим должны были соединяться между собой каким-то относительно устойчивым образом. Эти требования оказались взаимно противоречивыми. Для понимания происходящего потребовался переворот во взглядах на движение и, как следствие, на устройство мира, кульминация которого — неповторимая эпоха Sturm und Drang («бури и натиска») — пришлась на 1925–1926 гг., когда была сформулирована новая механика, названная квантовой. Слово «механика» указывает на изучение движения, в первую очередь с точки зрения его причин, т.е. выражает желание ответить на вопрос о том, что будет, исходя из того, что имеется сейчас, если известны все действующие факторы. Смысл же прилагательного «квантовая» оказался *значительно* шире, чем у слова «квант», как его использовал Планк [199].

Начало этой цепочки событий пришлось на 1908–1911 гг., когда — всего через несколько лет после смерти Больцмана — для прощупывания внутренности атомов удалось использовать *движение*. Идея была близка к следующему, довольно затратному способу знакомства с окрестным ландшафтом. Если перед вами находится начисто затянутая туманом узкая полоса зеленых насаждений (деревьев или кустов), то способ разобраться, что там скрыто от глаз, — усердно бросать в туман камни и фиксировать, пролетают ли они насквозь. Из моего пристрастия к рогаткам можно, наверное, сделать вывод, что в детстве я не настрелялся вволю, но здесь и правда подойдет хорошая рогатка, используемая с некоторым «стандартным» натяжением. Через кустарник камни будут пролетать насквозь, испытывая лишь небольшое влияние встреченного ими по дороге, но в случае отдельно стоящих деревьев вроде сосен картина будет иной: камни или пролетят через исследуемую область без какого-либо сопротивления, или, в достаточно редких случаях, вообще не пролетят насквозь, из чего вы сможете со временем сделать вывод о густоте, с которой посажены деревья, и даже о средней толщине стволов. Революционное предложение состояло в том, чтобы похожим образом простреливать слой вещества. Подходящими «камнями» оказались альфа-частицы (ядра атомов гелия, по другому поводу уже встречавшиеся нам в главе «прогулка 5» и далее;

они электрически заряжены и поэтому поддаются ускорению электрическим полем, хотя в первых экспериментах достаточно было скоростей, с которыми они вылетали из радиоактивного источника). Альфа-частицы направили на фольгу из золота толщиной всего в несколько сотен атомов, а затем фиксировали, как они разлетаются; все работало даже лучше, чем с рогаткой, потому что альфа-частицы никогда не оставались где-то внутри, а всегда вылетали, *отклоняясь* из-за взаимодействия с веществом. Эти отклонения оказались очень информативными. За выяснение того, что происходит, взялся Резерфорд.

Исходно ожидался вариант, относящийся скорее к типу «кустарник». Было понятно, что где-то в недрах вещества имеются электроны, которые несут отрицательный электрический заряд; существование электрона в качестве заряженной частицы — «корпускулы» — установил в 1897 г. Дж. Дж. Томсон [200]. А раз вещество в целом электрически нейтрально, там же должны находиться и положительные заряды. Про них совсем ничего известно не было, и Томсон не стал делать предположений о корпускулах, которые *не* наблюдались, а высказал идею, что известные ему электроны погружены в атоме в какое-то облако, несущее положительный заряд. Это звучало *приемлемо* с учетом имевшегося знания, но к 1911 г. выяснилось, что природа устроена совсем не так.

Оказалось, что альфа-частицы, сами несущие положительный заряд, проходят насквозь, практически не встречая положительного заряда нигде, за исключением областей крайне малого объема, диаметром в несколько тысяч раз меньше, чем предполагаемый размер атома. Зато при попадании в эту малость альфа-частица отклонялась радикально, вплоть до отскока практически назад. Этого никак не могло случаться, если бы положительный заряд был распределен по всему атому. Сам Резерфорд еще не употреблял слова «ядро», но именно он и обнаружил таким образом атомное ядро: весь положительный заряд в атоме оказался сконцентрирован в очень малом объеме. Для оценки можно считать диаметр атома равным $10^{-8}$ см, а размер ядра

— $10^{-12}$ см. Разделяющие их четыре порядка означают различие в объеме в *триллион* раз. Там же, в крохотном ядре, как вскоре удалось выяснить, сидит и практически вся масса атома. Масштаб, которым оперировало человечество, в одночасье распространился на четыре порядка вглубь. Это было достигнуто только и единственно с использованием движения, и с тех пор исследование мира на все более мелких масштабах идет безостановочно в том темпе, в каком удается обеспечивать движение, необходимое для исследования (для чего и строятся ускорители элементарных частиц).

Недоразумение же возникло после этого (и долго не исчезало) из-за того, что известные законы природы остро конфликтовали с идеей, что в центре атома сконцентрирован положительный заряд, а на некотором удалении от него каким-то образом удерживаются электроны. Источник конфликта в том, что электрон совершенно нечем «закрепить» внутри атома. На этом масштабе уже нет ни «гвоздиков», ни «подставок». Все силы, которые там имеются, — это электрическое притяжение электрона, несущего отрицательный заряд, к положительному заряду в ядре (и еще отталкивание между любыми двумя электронами, что сейчас не так важно). Под действием притяжения к ядру все электроны должны были бы на него «упасть», но тогда и сам атом имел бы примерно размер ядра, а это очевидным образом не так. Из этого виден только один выход, если рассуждать в привычных нам терминах: электроны могли бы вращаться вокруг ядра. Однако любое движущееся по орбите тело меняет направление своей скорости (потому что постоянно «заворачивает»), другими словами — ускоряется. А ускоряющийся электрический заряд непременно излучает электромагнитные волны. С ними уходит энергия, электрон может взять эту энергию только из своего движения и, как показывают простые вычисления, чрезвычайно быстро отдав всю энергию движения, упадет на ядро. Конец атому. Атомы *не должны* существовать. (И такой вывод — вскоре после преодоления сомнений в существовании этих самых атомов!)

Атом не может быть организован как планетная система, сколь бы часто в массовой культуре ни рисовали что-то вроде ядра с мечущимися вокруг него шариками-электронами (рис. 10.1); антинаучная картинка настолько укоренилась в массовом сознании, что входит в эмблему МАГАТЭ (Международного агентства по атомной энергии). Ветви оливкового дерева на этой эмблеме изображены способом, который, возможно, не нарушает базисных представлений о семействе маслиновых, но «изображение» атома является вызывающим. Электроны — не шарики, какими они там нарисованы; и у электронов в атоме в действительности нет орбит — ни изящных, как нарисовал художник, ни каких-либо еще [201].

**Рис. 10.1.** Планетарная модель атома (шарики, летающие по изящным орбитам вокруг общего центра). Она не имеет отношения к устройству атома и поэтому не изображена

У электронов, как мы знаем с середины 1920-х гг., вообще нет траекторий.

*****

**Природа не терпит траекторий.** Орбита и вообще траектория — понятие отчасти умозрительное: движущиеся тела все-таки не оставляют за собой прочерченные линии. Точнее говоря, оставляют, когда для этого применяют специальные средства, скажем, на воздушных парадах (рис. 10.2). Тем не менее идея траектории хорошо передает все то, что мы понимаем под движением в пространстве. Она «прочерчивается» по мере того, как течет время. Каждая точка на траектории — мгновенное положение тела. В каждой точке траектории можно определить скорость, которую имеет движущееся тело в данной точке (и направлена она всегда по касательной). Нам потребуется говорить не о скорости, а о количестве движения (которое есть «скорость с учетом массивности» — просто произведение скорости на массу, если оставить в стороне эффекты специальной теории относительности). Я нарочно выскажусь еще раз в терминах количества движения: в каждой точке траектории четко определено количество движения, которым обладает движущееся тело, когда оно находится в этой точке.

**Рис. 10.2.** Линии, остающиеся в воздухе, дают представление о траекториях, которым следовали концы крыльев

А вот этого в природе быть не может. На фундаментальном уровне мира обнаруживаются непреодолимые препятствия к тому, чтобы положение и количество движения были точно определены одновременно. Поэтому и точные траектории отсутствуют. Траектория — лишь приближенное понятие, пригодное для всех окружающих нас тел во всех обычных вариантах их движений. Траекторию кончика крыла можно в принципе описать во много тысяч раз точнее, чем ее задает дымный след в воздухе, но, продолжая увеличивать точность, мы в конце концов упремся в предел. В свойства нашей Вселенной встроено фундаментальное ограничение на точность в связи с движением; актуальным и даже определяюще важным это ограничение становится для разнообразной мелочи типа электрона. С чем-то похожим — и по существу близким — мы уже сталкивались в связи с рис. 9.15. Там изображена плоскость, которую я на свой страх и риск назвал Плоскостью действия. Каждая точка на ней, как и на всякой плоскости, имеет две координаты. Одна из них показывает положение интересующего нас небольшого тела вдоль выбранного в пространстве направления, а другая показывает количество движения, которое имеет тело, когда проходит эту точку, — точнее, количество движения *вдоль* выбранного направления. На рис. 9.15 на Плоскости действия показаны прямоугольные площадки разных пропорций, но одной и той же площади. Совсем безобидное жульничество с моей стороны состоит в том, что на рис. 10.3 я повторил то же изображение Плоскости действия, но площадь всех прямоугольников установил равной не $h$, как раньше, а $\hbar/2$ — такой она должна быть в задаче, которая сейчас обсуждается: о точности, с которой определена траектория. Буква $\hbar$ здесь — это, как мы упоминали мимоходом, постоянная Планка $h$, деленная на длину окружности единичного радиуса ($2\pi$). Поступать так с постоянной Планка $h$ приходится столь часто, что специальное обозначение оказалось не лишним. Придумал его, по-видимому, Дирак, но никаких пояснений по поводу мотивировки символа $\hbar$ он не приводит [202]. Закон природы, иллюстрируемый рис. 10.3, состоит в том, что на Плоскости действия не существует позиционирования более точного, чем в пределах прямоугольника площадью $\hbar/2$.

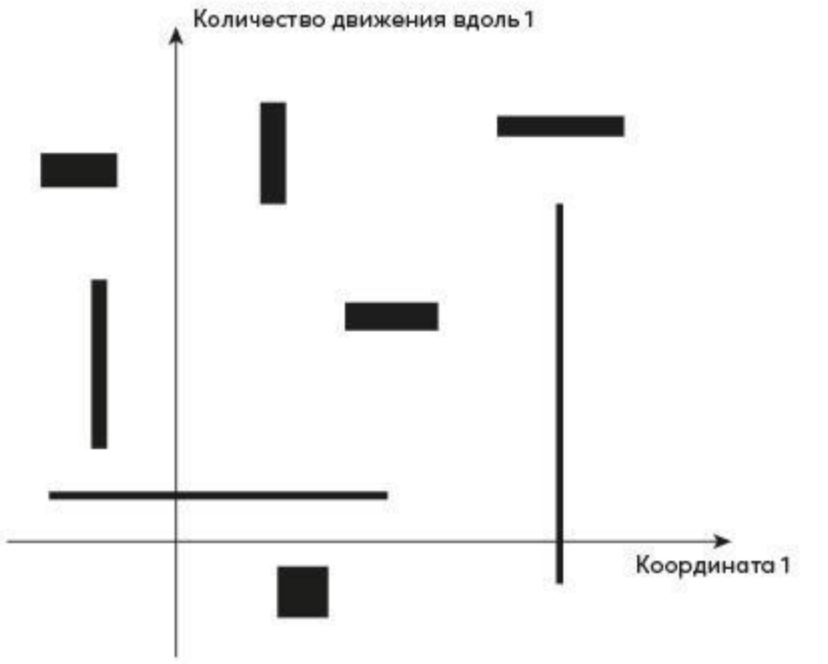



**Рис. 10.3.** Несколько прямоугольников на Плоскости действия, которые имеют одну и ту же площадь $\hbar/2$. Они задают фундаментальные «ограничения на фокусировку», но не в обычном пространстве, а на воображаемой плоскости, объединяющей координату и количество движения вдоль нее

Можно представить себе программу рисования на компьютере с не совсем обычным инструментом «кисть» или «карандаш»: желая поточнее разместить, например, электрон на Плоскости действия, вы пытаетесь поставить точку штрихом покороче, но кисть не позволяет сделать отметку, которая имела бы площадь меньше заданной. Можно сделать прямоугольник очень узким по горизонтали, как самый левый из прямоугольников на рис. 10.3: тогда вы с неплохой точностью заявите пространственное положение электрона, но, увы, точность, с которой определено его количество движения, получится очень низкой. Если же настроить кисть так, чтобы ее узкий штрих с высокой точностью определял количество движения, то она непременно будет красить очень широко вдоль направления, определяющего положение в пространстве. Это и означает, что у электрона нет траектории, потому что траектория — это *и* положение, *и* количество движения. Заколдованные прямоугольники работают только для пар: положение вдоль выбранного направления — количество движения вдоль того же направления. Крест-накрест (скажем, положение вдоль направления 3 — количество движения вдоль направления 1) никаких ограничений нет.

Что происходит?

Сначала о названиях. Власть заколдованных прямоугольников называется принципом неопределенности, часто — принципом неопределенности Гайзенберга. Слово «принцип» обычно означает, что это утверждение принимается за основное; «заколдованные прямоугольники», впрочем, можно вывести математически, приняв в качестве основного набор из нескольких других идей (сам Гайзенберг, впрочем, был склонен придавать своему принципу самостоятельное значение вне зависимости от других положений). Этот набор идей и составляет квантовую механику — основу нашего понимания мира на малых масштабах; а поскольку современные технологии часто опираются на управление происходящим именно на таких масштабах, это еще и основа технологий. В первоначальной постановке задачи требовалось разобраться с тем, как же электрон «движется» в атоме. Это понимание возникло в 1925–1926 гг., и первым к нему пришел Гайзенберг. Позже у квантовой механики появилось много других задач; в наше время часто говорят о *квантовой теории*.

Описание мира в рамках квантовой механики сильно отличается от привычного тогда, когда некоторые величины имеют значения, сравнимые с постоянной Планка $h$; когда же их значения много больше $h$, эффекты квантового устройства становятся несущественными и вполне годятся упрощенные правила, по которым существует привычный мир вещей вокруг нас [203]. Сравнивать, конечно, можно только величины одной и той же размерности: например, со скоростью света можно сравнить только скорость. Что же можно сравнивать с этой $h$ или $\hbar$? Во-первых, количество вращения [204]. Камень весом сто граммов, который крутится на веревке длиной один метр со скоростью три оборота в секунду, обладает количеством вращения, примерно равным $6 \times 10^{33}\hbar$, тогда как некоторый аналог количества вращения для электрона всегда составляет $1/2\ \hbar$; пожалуйста, почувствуйте разницу. Во-вторых, с $h$ или $\hbar$ можно сравнивать «присутствие энергии» — не саму энергию, а энергию, умноженную на то время, в течение которого данная энергия в том или ином виде присутствует. И наконец — площади на Плоскости действия. Эти площади появляются при описании целого ряда явлений, и любую такую площадь можно поделить на $\hbar$ и получить «голое» число: если оно большое, значит, об эффектах квантовой механики можно не беспокоиться, но если оно невелико, то смотрите в оба и забудьте про все, что «интуитивно очевидно».

Посмотрим, что означают заколдованные прямоугольники для частицы массой в один миллиграмм (почувствуем себя ботаником Брауном; см. главу «прогулка 9»). Если считать, что положение такой частицы задано с точностью в один нанометр, что составляет одну сторону заколдованного прямоугольника на Плоскости действия, то, зная его площадь, мы найдем ограничение на неопределенность в количестве движения частицы, а после деления на массу — и в ее скорости. Подставляя конкретные числа, мы видим, что неопределенность в скорости составляет одну двадцатую от одной миллиардной *нанометра* в секунду — что едва ли можно назвать ограничением. Вполне можно было задать положение в двадцать *миллиардов* раз точнее, и все равно неопределенность скорости осталась бы на уровне одной миллионной миллиметра в секунду. Со всех практических точек зрения можно считать, что частица весом в один миллиграмм прекрасно пребывает на своей траектории. Так получается из-за того, сколь огромна ее масса. Возьмем что-нибудь полегче, например бактерию *Escherichia coli* (кишечную палочку). Для оценки можно считать, что ее диаметр около одного микрона, длина около двух микрон, а масса — 1 пг. Вот пикограмм — это мало: $10^{-12}$ г. Испытывает ли *E. coli* квантовое беспокойство или, хуже того, квантовые метания из-за невозможности иметь одновременно точное положение и точную скорость? Определим условие ее комфорта как неопределенность положения максимум в одну десятитысячную от ее длины; для сравнения, мне кажется, что меня не должна беспокоить неопределенность моего положения в десятитысячную долю моего роста, т.е. около 0,2 мм. Для бактерии это означает, что мы локализовали ее с точностью до двух десятых нанометра. Тогда из заколдованного прямоугольника получается, что неопределенность ее скорости составляет около четверти нанометра в секунду. Нет, *E. coli* может жить спокойно, не испытывая ни малейшего квантово-механического дискомфорта.

Но для электрона все уже по-другому — из-за его массы. Желание локализовать электрон в пределах одного нанометра означает, что неопределенность его скорости составляет около (чуть меньше) 58 *километров* в секунду. Точнее этого определить его скорость *нельзя*, а с такой неопределенностью в скорости никак не получается сказать, что электрон движется по траектории: даже из пределов десяти нанометров он норовит выскочить за доли пикосекунды. Попытка четко локализовать электрон оказывается совершенно бесполезной, потому что невозможно предсказать, где мы его встретим при следующей попытке, даже если она делается почти сразу после первой.

*****

**Спасибо неопределенности.** Принцип неопределенности, при всей его необычности, работает на благо человечества, да и вообще практически всего сколько-нибудь интересного, что есть во Вселенной: он позволяет звездам гореть. Дело в том, что принцип неопределенности позволяет проходить сквозь стены.

Все, что говорилось о «горении» Солнца на прогулке 5, было правдой, но это была не вся правда. Да, Солнце и другие звезды черпают энергию из дефекта массы при слиянии меньших атомных ядер в большие, прежде всего из слияния протонов. Но чтобы соединиться в составное ядро, протонам необходимо преодолеть взаимное электрическое отталкивание и сблизиться так, чтобы «защелкнулся замок» ядерного взаимодействия: на очень малых расстояниях оно намного сильнее электрического, и это позволяет протонам оставаться в тесных взаимных объятиях. Но пока этого не произошло, электрическое отталкивание играет роль разделительной стенки между любыми двумя протонами. В обычном веществе вокруг нас у протонов, которые еще не попали в одно ядро, совсем нет возможности для сближения, необходимого для слияния. Шансы могли бы появиться в недрах звезд: температура в ядре Солнца — около 15 млн градусов, из-за чего протоны мечутся там со средней скоростью около 600 км/с (и каждый испытывает миллиарды столкновений в секунду). Однако и этого оказывается недостаточно: на том расстоянии, где ядерное взаимодействие готово всерьез взяться за дело, электрическое отталкивание между двумя протонами настолько велико, что для преодоления его «с наскока» — за счет движения — требуется температура не 15 млн, а около 10 млрд градусов. Стена продолжает разделять каждую пару протонов, которые могли бы соединиться. Солнце «не должно» светить [205].

### *Солнце все-таки светит*

Звезды *все-таки* светят (рис. 10.4), потому что протоны проходят *сквозь* стены. Слово «стена» не надо брать в кавычки, когда мы говорим, что два сближающихся протона натыкаются на стену взаимного электрического отталкивания. Привычные нам стены — это тоже тем или иным образом организованные силы отталкивания [206], просто из-за размера как нас самих, так и обычных стен мы вправе ничего не знать об атомах и молекулах, когда натыкаемся на твердую поверхность. Поэтому стена, разделяющая два протона, — это не метафора; любая стена/барьер — это просто сила в определенной конфигурации.

**Рис. 10.4.** Бурные процессы на поверхности Солнца — результат выделения энергии в его ядре

## *Протоны внутри Солнца иногда туннелируют сквозь запрещающий барьер*

И еще во фразе «могут проходить сквозь стены» пояснения заслуживает слово «могут». Если вы оставили апельсины в вазе на столе и ушли на работу, то, вернувшись домой, вы «можете» обнаружить один из апельсинов лежащим на столе из-за того, что он прошел сквозь стенку вазы. Впрочем, не пытайтесь воспроизвести это в домашних условиях, потому что *вероятность* такого события запредельно, невыразимо мала — из-за огромной массы апельсина и огромной же толщины стенки. Для протонов, разделенных барьером взаимного отталкивания, вероятность прохождения сквозь стену в обычных условиях тоже исчезающе мала, но для «разогретых» протонов в ядре Солнца она перестает быть запрещающе малой, а актов столкновений там, наоборот, очень много (раскладывая апельсины, нам нечего и пытаться сравняться в числе попыток с этой ситуацией). В некоторых столкновениях два протона, находящиеся по разные стороны барьера взаимного отталкивания, все-таки попадают на одну его сторону из-за того, что один из них проходит сквозь барьер. Говорят, что он *туннелировал*, хотя никакого «туннеля» он не просверливал, а просто *оказался* по другую сторону стенки. После этого, правда, все тоже не очень просто из-за ряда отягчающих обстоятельств (см. добавления к этой прогулке), но без прохождения — туннелирования — сквозь стены не было бы совсем ничего, и благодаря туннелированию Солнце все-таки горит.

Прохождение сквозь стены — это откровенное нарушение запретов на возможное движение в том виде, к которому мы привыкли в окружающем нас мире — мире, который, в противоположность квантовому, называется *классическим* (слово указывает в данном случае не на расцвет Античности, а на все то, что считалось непреложно верным, пока не выяснилась квантовая природа мира). В квантовом же мире само движение устроено не классическим образом, и классические запреты оказываются не совсем запретами. Впрочем, преодоление их носит вероятностный характер, и чем выше стены (что измеряется энергией, необходимой для «переползания через верх»), а особенно чем они толще, тем менее вероятно туннелирование. Радикально менее вероятно: небольшое увеличение одного или другого параметра приводит к драматическому подавлению туннелирования, и во множестве случаев вероятность его настолько ничтожна, что можно смело говорить, что запрет все-таки действует. Во множестве, но не во всех.

Принцип неопределенности позволяет частицам преодолевать запреты, пользуясь «неопределенностью своего положения». Шериф запирает квантового Неуловимого Джо в *застенке*, а тот, как выясняется, не может строго локализоваться в пределах отведенного ему тесного пространства. В результате область его возможного пребывания отчасти распространяется и на внешний мир, где все еще привязана его лошадь. Хорошо по крайней мере, что помощники шерифа недавно укрепили стены, сделав их толще. Но здесь уже настает время для очередного предупреждения о неточности аналогий и метафор. Квантовая действительность по-настоящему случайна; в природе нет средств, чтобы *запланировать* побег. Квантовый Неуловимый Джо сам не знает, когда ему удастся сбежать, и своими средствами (без сообщников снаружи, что было бы уже совсем другой историей) повлиять на это не в состоянии. Имеет смысл только вероятность, с которой событие случится в течение выбранного периода времени. Вероятность же проявляет себя не в единичных случаях, а при повторных испытаниях, как при подбрасывании монеты, или же в отношении массового поведения — как в радиоактивном распаде атомных ядер.

«Куски» некоторых ядер (не в звездах, а «сами по себе») могут сбегать наружу, тоже проходя сквозь стены, и это тоже по-настоящему вероятностный процесс. Такие ядра существуют в течение какого-то времени как ни в чем не бывало, но затем превращаются в другие из-за потери небольшого фрагмента, который туннелирует наружу из «застенка». Сам этот застенок создан совместными силами притяжения всего, из чего состоит ядро: протонов и нейтронов. Притяжение создает энергетическую яму, стенки которой не дают им отрываться от коллектива (под влиянием кальки с английского, кстати, в последнее время вместо «яма» часто говорят «колодец»; звучит красиво и даже немного загадочно). Энергетические ямы бывают разными: в той, что на рис. 10.5 слева, можно поселиться, обладая энергией, превосходящей уровень энергии, отвечающий внешней «равнине», и тогда из ямы в принципе можно туннелировать на равнину; но из ямы на рис. 10.5 справа туннелировать некуда, выбраться из нее можно только обычным способом — при получении энергии, необходимой для «выползания». Обе эти энергетические ямы изображены для одномерного пространства, когда движение возможно только вдоль одной прямой. Если Неуловимому Джо доступны перемещения по плоскости, то изображение энергетической ямы будет и правда больше всего похоже на яму, с бортиками или нет (и это по-прежнему выражение того, как *энергия* зависит от положения, теперь уже на плоскости). А для частицы, летающей по трехмерному пространству, нарисовать такую яму уже невозможно: сидящая в ней частица ощущает стенки по всем направлениям.

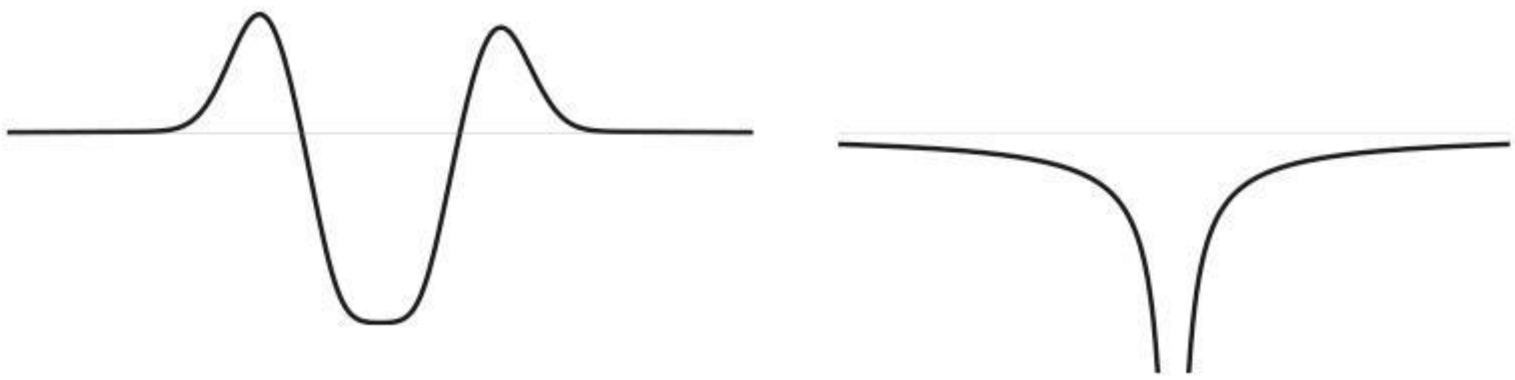


**Рис. 10.5.** Два примера энергетической ямы, куда можно посадить частицу. Контуры ямы показывают энергию, сила же, которая возвращает частицу к центру ямы, измеряется крутизной стен

Для протонов и нейтронов, сидящих в атомном ядре, энергетическую яму создает притяжение, за которое отвечает сильное ядерное взаимодействие. Ему, конечно, мешает электрическое отталкивание между протонами, но правила игры здесь неравные. Ядерные силы намного сильнее электрических, но только в пределах малых расстояний — около $10^{-15}$ м (так называемый фемтометр, в *миллион* раз меньший нанометра), и из-за этого связывают только ближайших соседей. Электрическое же отталкивание, хотя и более слабое само по себе, ослабевает с расстоянием значительно медленнее, из-за этого каждый протон отталкивается от каждого, и при слишком большом числе протонов электрическое отталкивание побеждает — берет не силой, а массовостью. Укреплению ядерных коллективов заметно помогают нейтроны: они вообще не отталкиваются электрически, потому что не имеют заряда, а в отношении притяжения за счет ядерных сил неотличимы от протонов; они и дают дополнительный «склеивающий» эффект (пока их самих не слишком много и не очень заметна их неуживчивость друг с другом из-за эффекта, до которого мы доберемся в конце этой прогулки). Поэтому в подавляющем большинстве ядер (во всех после кальция, если двигаться по

Периодической таблице элементов) нейтронов больше, чем протонов.

Те ядра, из которых возможно туннелирование, пребывают в промежуточном состоянии между существованием и несуществованием: их отдельные куски могут оказаться снаружи с некоторой вероятностью. «Кусками» при этом оказываются не отдельные протоны, а альфа-частицы — удерживаемые вместе два протона и два нейтрона. Причина предпочтения альфа-частиц — в их особой прочности, которая оборачивается энергетическим преимуществом [207]. Как только альфе-частице случилось пройти сквозь стенку (оказаться где-то на наружной стороне бортика, подобного тому, что изображен на рис. 10.5 слева), она покидает область действия ядерных сил, а электрическое отталкивание работает вовсю, из-за чего она немедленно улетает прочь, являя собой эффект радиоактивности (альфа-радиоактивности, поскольку есть и другие виды; весь процесс называют альфа-распадом). В ядре же остается на два протона и на два нейтрона меньше. Из-за своего туннельного характера альфа-распад носит истинно случайный характер (что остается предметом неизбывной зависти для программистов, решающих задачу генерирования *по-настоящему* случайных чисел компьютерными средствами). Примеры радиоактивных распадов приведены в добавлениях к этой прогулке.

### *Альфа-распад — результат прохождения сквозь стену*

Туннелирование и систематическая обработка актов туннелирования — принцип работы устройства, которое по инерции называют микроскопом, хотя оно чувствительно к деталям намного меньшего размера, чем обычные микроскопы, и работает только в определенных условиях. Сканирующий туннельный микроскоп позволяет «почувствовать» форму поверхности с точностью до атома. Для этого игла, острие которой имеет толщину, сравнимую с размером атома, удерживается на малом расстоянии от исследуемой поверхности. Игла находится под напряжением, которое в случае контакта вызвало бы ток, но этого контакта там нет: зазор между иглой и поверхностью запрещает протекание тока. Однако это «классически», а в квантовой действительности электроны могут туннелировать через зазор. Туннелирование создает слабый электрический ток, величину которого можно измерить. Из-за того что вероятность туннелирования, а потому и ток чрезвычайно чувствительны к ширине «стены» (зазора), при перемещении иглы накапливаются данные о величине тока, компьютерная обработка которых позволяет восстановить форму поверхности (рис. 10.6; цвета в таких изображениях являются условными).

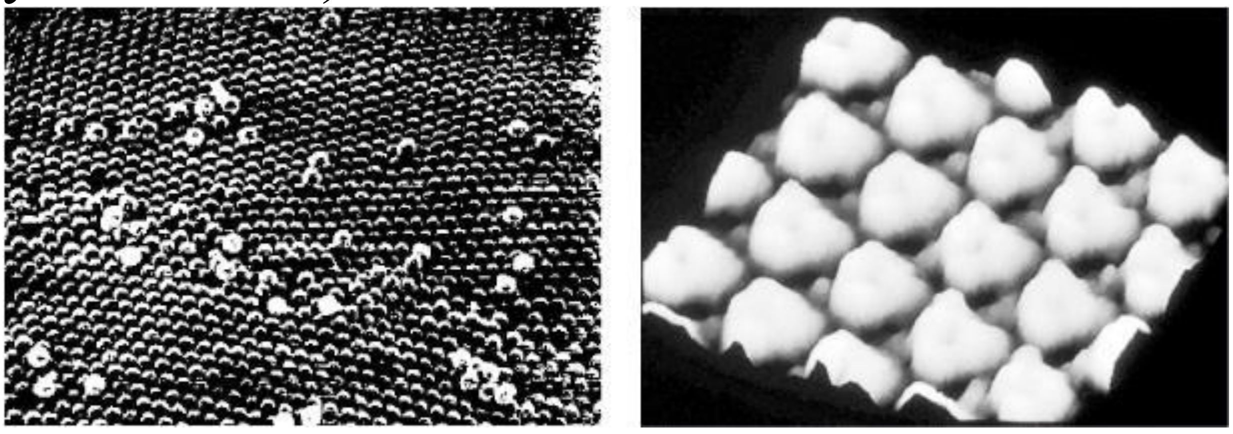


**Рис. 10.6.** Очертания поверхности, восстановленные с атомной точностью на основе туннельного эффекта. Соблазнительно думать об округлых неровностях как об отдельных атомах; они действительно имеют отношение к атомам, но, строго говоря, такой рельеф показывает распределение электрического заряда, который несут электроны

*****

**Атом почти не существует.** Но что же происходит *внутри* атома? Как разрешается «загадка Резерфорда» — невозможность движения электронов вокруг ядра?

### *Пространственно ограничить движение не так просто из-за принципа неопределенности*

Атом — *связанная* система: он собран из нескольких частей (ядра и электронов), которые существуют вместе, не разлетаясь в разные стороны. Это значит, что каковы бы ни были подробности движения этих частей, оно ограничено некоторой областью пространства. Из-за принципа неопределенности «пойманное» (пространственно ограниченное) движение оказывается довольно непростым явлением; оно радикально отличается от движения без пространственных ограничений. В привычном нам мире различие между ограниченным движением (эллипсы: спутник на орбите) и неограниченным (гипербола: прощай навсегда) можно не заметить сразу: короткую дугу гиперболы не так просто отличить от короткой дуги эллипса. В квантовом же мире, где движение не терпит траекторий, это различие огромно. Устройство атома — это, по существу, история про то, что представляет собой «пойманное» движение.

Энергетическая яма для электрона в атоме похожа на изображенную на рис. 10.5 справа (но электрон ощущает стенки по *всем* направлениям в пространстве). Создается она за счет электрического притяжения со стороны ядра (как бы ни вел себя электрон, у него не отнять его заряд). Края ямы очень полого опускаются на большом расстоянии от центра (где и сидит ядро), но по мере приближения уходят вниз все круче. В самом центре яма делается неограниченно глубокой, и туда, наверное, могли *бы* попадать электроны, если бы принцип неопределенности не препятствовал их пребыванию в очень малом объеме. Каким окажется компромисс между притяжением и принципом неопределенности, определяется точной формой ямы. Точечный электрический заряд создает энергетическую яму, в которой притяжение (крутизна стенок) меняется в зависимости от расстояния точно так же, как гравитационное притяжение точечной массы, и этот закон притяжения скрывает в себе интересную математику. В случае гравитации Ньютон получил, что замкнутые орбиты планет — непременно эллипсы: любой формы и размера, но эллипсы. Их тоже при желании можно воспринимать как результат компромисса: притяжение определяет тенденцию к сближению планеты со звездой, а сохранение количества вращения этому препятствует. Для электрона в атоме зависимость от расстояния надо передать не Ньютону, а Шрёдингеру: уравнение, открытое им в последние дни 1925 г., определяет способы существования электронов и им подобных в энергетических ямах произвольной (в принципе) формы, вблизи и внутри барьеров, в пространстве между стенками, в объеме кристаллической решетки и т.д. (везде, где нет больших скоростей, т.е. где несущественны эффекты специальной теории относительности [208]). В интересующем нас сейчас случае из уравнения Шрёдингера получаются не эллипсы и вообще не траектории, но, если угодно, способы существования электрона в атоме. И это довольно непривычные способы существования.

### *Уравнение Шрёдингера использует знание об энергии*

Уравнение Шрёдингера *одно*, но информация о конкретной системе передается ему в виде зависимости энергии от количества движения и положений в пространстве. Зависимость энергии от количества движения в огромном числе случаев одна и та же — переформулировка известного «эм-вэ-квадрат-пополам» в терминах не скорости, а количества движения, и специфика любой конкретной системы отражается здесь только в выборе массы. Зависимость же энергии от положения в пространстве может быть чрезвычайно разнообразной, и она как раз и описывает, как устроено взаимодействие — энергетическая яма или же что-то более сложное, например взаимное отталкивание нескольких электронов: если бы они занимали такие-то положения, то энергия была бы вот такой. Мы сейчас выберем массу равной массе электрона, а пространственный профиль энергии — таким, каким его создает притяжение точечного положительного заряда, и будем интересоваться решениями, описывающими постоянно существующий атом. Вообще-то определить, что значит «постоянно», не всегда просто. Например, лучшее из возможных приближение к «постоянству» в космосе — это периодическое движение планет по замкнутым орбитам. И правда, планета постоянно находится на своем эллипсе и ее никогда не нужно искать «где-то еще» (на каком-то другом эллипсе). При этом понятия «планета» и «орбита» связаны так, что планете приходится что-то *делать*, находясь на орбите, а именно — летать по ней. В применении к устройству атома нам нужно нечто аналогичное (уж что получится): чтобы электрон постоянно находился в атоме, а не где-то еще, причем делал это так, чтобы в общем было известно, где его можно найти.

При этом электрон может там что-то «делать» — то, что позволяет ему его природа. Про такой вариант «постоянства» в применении к уравнению Шрёдингера говорят, что это *стационарное* состояние (электрона в данном случае), и я скрепя сердце буду использовать этот профессиональный термин.

И вот новость, вбирающая в себя добрую половину всего, что говорит нам квантовая механика. Уравнение Шрёдингера предъявляет столь непомерные требования, что у него *в общем* нет решений для стационарных состояний — ни для электрона в атоме, ни для других вариантов пойманного движения.

Атомы [все-таки] *не существуют*?!

### *Атом почти не существует*

Существуют, но «с большим трудом» — благодаря *исключениям*, которые все же допускает уравнение Шрёдингера. У него действительно нет решений для стационарных состояний, *за исключением* очень специальных ситуаций, которые определяются полной энергией ядра и электрона с учетом их притяжения. Сконцентрируемся на атоме с одним электроном (в природе это атом водорода или же ион — комбинация из ядра какого-то другого атома и единственного электрона). При произвольном значении энергии электрона у уравнения Шрёдингера просто нет стационарных решений: компромисса между принципом неопределенности и притяжением к центру найти не удалось, стороны расходятся, не договорившись, атом и в самом деле не существует! Картина меняется только при *отдельных*, специальных значениях энергии. Это не самое привычное положение вещей. Попробуйте представить себе, например, что все комнатные растения у вас дома могут жить только при температурах из списка значений 17,4750 °C, 20,7111 °C, 21,8438 °C, 22,3680 °C, …, а при *любой* другой температуре немедленно погибают. Это непростое требование к существованию растений. Ровно настолько же нелегко и электронам в атомах — и тем не менее природа построена на таких специальных, можно сказать, исключительных случаях [209].

«Хорошие» значения энергии, при которых атом *все-таки* существует, тоже можно организовать в список и заодно пронумеровать числами 1, 2, 3, …. Значения энергии из этого списка для данного атома абсолютно одинаковы везде во Вселенной; если инопланетяне сообщат вам, чему равна наименьшая возможная энергия электрона в атоме водорода, выраженная в и. е.э., вы будете точно знать, чему равна эта «инопланетная единица энергии». Наименьшую возможную энергию мы всегда помещаем в список под номером 1, а далее располагаем значения энергии в порядке возрастания; это не обязательно, но удобно настолько, что нет причин сомневаться, что инопланетяне тоже так делают.

Этот список разрешенных энергий — фундаментальное свойство атома. И что немаловажно, его (список!) можно наблюдать почти непосредственно. Он виден — я бы сказал, *проступает* — в свойствах света, который излучается или поглощается атомами. Если электрон устроился вблизи притягивающего ядра, имея первую энергию из списка, мы можем заставить его устроиться по-другому, передав ему энергию, в точности равную разнице между первой и, скажем, десятой энергиями. Способ передачи энергии — свет: нужно отправить на свидание с электроном порцию света — фотон — с точно заданной энергией. Внезапно отдельные куски пазла начинают собираться: поскольку энергия фотона есть произведение $h \cdot$ (частота), все, что требуется, — это отправить свет определенной частоты (или, что то же самое, определенной длины волны), т.е. свет определенного цвета. Электрон поглотит его, сам фотон исчезнет, но энергия его никуда не денется, а останется у электрона, который и устроится в состоянии номер десять. При этом свет близкой, но отличающейся длины волны, несущий чуть другую энергию, не сможет отдать эту энергию электрону, потому что у того нет способа существования в атоме с неподходящей энергией (а забрать энергию фотона можно только целиком: фотон не делится на части!). Мы этим пользуемся: путешествуя от источника к детектору и встречая по пути достаточно разреженное вещество, свет зацепляется за него, но только в той своей части, которая имеет подходящую длину волны. В результате в спектре — разложении приходящего света по длинам волн — образуются затемнения, означающие, что свет с некоторыми длинами волн до детектора не доходит. Положение этих *линий поглощения* точно свидетельствует об атомах, встреченных светом по дороге. В других условиях, когда вещество само излучает свет, на тех же длинах волн могут наблюдаться яркие линии: электрон, по каким-то причинам забравшийся в состояние с шестой или десятой энергией, расстается с ней, испуская фотон, а сам попадает с состояние с меньшей энергией. Разница между двумя энергиями из списка становится энергией фотона, и мы в результате наблюдаем свет со вполне определенной длиной волны [210].

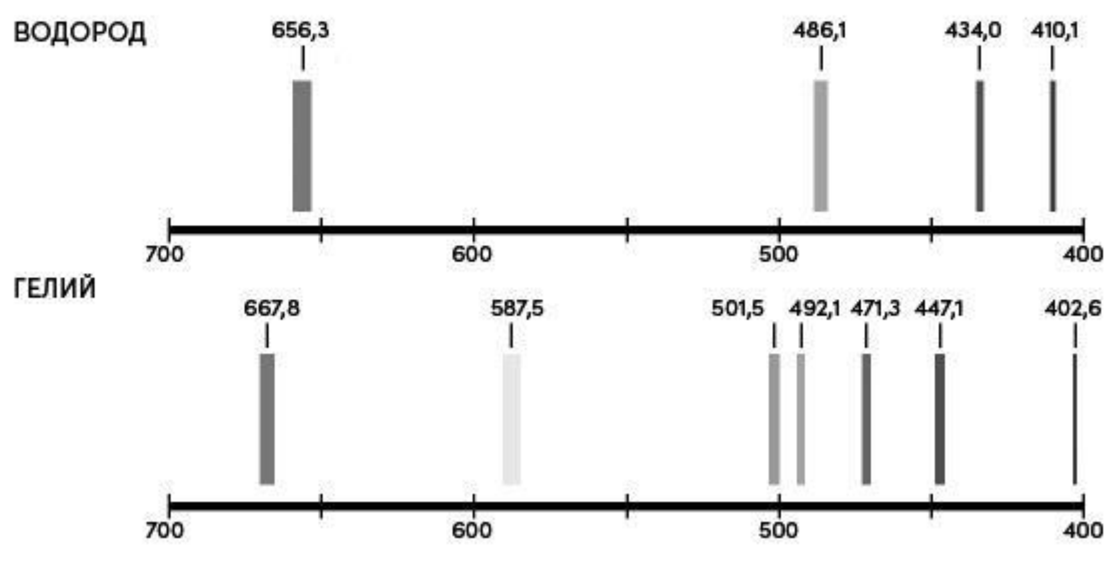



**Рис. 10.7.** *Сверху:* иллюстрация к задаче «Продолжите последовательность 656,279; 486,135; 434,0472 и 410,1734» — спектральные линии водорода в видимой области спектра. Указаны длины волн в нанометрах. *Снизу:* спектральные линии гелия. Этот элемент был сначала открыт на Солнце по своим спектральным линиям

В длинах волн, отвечающих спектральным линиям, *скрыты целые числа*. В очередной раз стоя на плечах гигантов, мы теперь знаем, что эти числа представляют собой просто *номера* из списка разрешенных энергий, но в момент их открытия — за 40 лет до появления уравнения Шрёдингера, до открытия закона излучения Планка и даже до открытия электрона (!) — они представлялись совершенно загадочными. В 1885 г. их усмотрел в спектре атома водорода швейцарский преподаватель математики Бальмер. Перед его глазами было всего четыре лежащие в видимой части спектра линии с длинами волн 656,279 нм, 486,135 нм, 434,0472 нм и 410,1734 нм (рис. 10.7 слева). Сделав прямо сейчас паузу в прогулке, вооружившись калькулятором и отводя глаза от следующего абзаца, вы можете попробовать самостоятельно найти, какие целые числа скрываются внутри этой последовательности и как поэтому ее следует продолжить. Задача не решается мгновенно, даже когда вопрос поставлен напрямую о целых числах. У Бальмера же не просто не было калькулятора; вообще ничто не предвещало появления здесь целых чисел, так что открытие их в наборе произвольных с виду длин волн кажется мне каким-то особым видом наблюдательности и выдающимся примером эмпирически найденной, но при этом точной закономерности. Эти линии называются с тех пор серией Бальмера. Разгадав тайну длин волн, Бальмер продолжил последовательность и предсказал следующую линию с длиной волны 397 нм; как он вскоре узнал, ее, именно такую, уже наблюдал Ангстрём. Это было блестящим подтверждением догадки Бальмера!

Догадка же состояла вот в чем. Первую длину волны в его серии умножим на $1/2^2 - 1/\mathbf{3}^2$ (что можно, конечно, вычислить, приведя к общему знаменателю, но именно этого делать не следует, потому что сейчас важно не численное значение, а структура выражения; и я выделил число 3); вторую длину волны в серии умножим на $1/2^2 - 1/\mathbf{4}^2$; третью на $1/2^2 - 1/\mathbf{5}^2$ и четвертую на $1/2^2 - 1/\mathbf{6}^2$. Результат всех этих операций получается одним и тем же. Только это и было известно Бальмеру: в длинах волн прятались числа 3, 4, 5, 6. Предсказанная им следующая линия отвечала числу 7.

Объяснение серии Бальмера, и не только ее, основано на том, какие именно значения энергии составляют заветный список для атома водорода. Итогом (довольно сложных) действий с уравнением Шрёдингера явилась простая арифметика. Самую первую энергию в списке мы просто запишем как (1-я энергия) = $-K$; минус здесь потому, что энергия «пойманного» движения всегда отрицательна [211]. Пока мы просто ввели обозначение, но вторая энергия в списке получается из первой делением на 4: (2-я энергия) = $-K/4$; чтобы найти следующую за ней энергию, делим первую на 9: (3-я энергия) = $-K/9$; потом делим уже на 16 и так далее. Другими словами, энергия с номером $n$ в списке равна $-K/n^2$, и таковы *все* возможные энергии электрона в атоме водорода! Тогда разность любых двух таких энергий — с каким-то номером $n$ и каким-то другим номером $k$ из списка — имеет вид $K(1/k^2 - 1/n^2)$. Именно такие энергии и несут излучаемые или поглощаемые фотоны. Энергия же фотона однозначно определяет его частоту и соответствующую длину волны (которая обратно пропорциональна энергии), и таким образом порядковые номера из списка разрешенных энергий проникают в длины световых волн, отвечающих линиям в спектре!

### *Обратные квадраты целых чисел для атома водорода*

Сама по себе серия Бальмера отвечает переходам электрона в состояние со *второй* энергией из списка: число $k$ надо взять равным 2, а числу $n$ по очереди придавать те самые значения 3, 4, 5, 6 и далее, которые и усмотрел Бальмер. Полную формулу с двумя целыми числами $n$ и $k$, развивая успех Бальмера, угадал в 1888 г. Ридберг [212]. Она описывала все спектральные линии водорода, но ее происхождение оставалось для современников загадочным, а значение буквы $K$ представлялось совершенно произвольным. Сейчас, имея на руках решение уравнения Шрёдингера, мы видим, что буква $K$ собрана из фундаментальных ингредиентов (заряда электрона, масс электрона и протона, а также постоянной Планка), которые на момент появления формулы относились к числу не просто неизвестных, а, собственно говоря, несуществующих.

Фундаментальным свойством всего происходящего оказывается *дискретность*. Электрон может существовать в атоме — в состоянии «пойманного» движения, — имея только дискретные значения энергии, для которых уравнение Шрёдингера в порядке исключения допускает решения. Этим определяется компромисс между притяжением к ядру и принципом неопределенности. Меняя варианты своего существования — переходя между состояниями из списка разрешенных, — электрон излучает или поглощает свет строго определенных длин волн. Находясь же в состоянии с наименьшей энергией, электрон лишен возможности отдать свою энергию: состояний с еще меньшей энергией просто нет. Но состояние с минимальной энергией — стационарное: бытие электрона не меняется с течением времени. При этом нет возможности говорить об ускорении электрона — том самом ускорении, из-за которого он должен был бы излучать. Он и не излучает, а пребывает в одном и том же состоянии. Таков ответ на вопрос, почему атом все-таки существует. Спасибо, что у уравнения Шрёдингера нашлись хоть какие-то стационарные решения [213].

*****

**Вражда, отбирающая свойства.** Трудно тем не менее удержаться от вопроса: а что все-таки *делает* электрон, когда он существует в атоме в стационарном состоянии с определенной энергией? И что осталось в его способе существования от движения, как мы его знаем?

### *Все «умения» электрона — обладание несколькими числами*

### *Электрон ни из чего не состоит*

А что электрон вообще «умеет делать»? Находиться внутри атома не единственный способ его существования, есть и другие: в пустом пространстве (т.е. в удалении от всего остального), или во взаимодействии с другим электроном, или в пустом пространстве во взаимодействии со светом, или внутри металла, или… — мир как-никак полон электронов. Узнаём же мы электрон по присущим ему *числам,* которые он проявляет во взаимодействии с другими частями Вселенной, в первую очередь по массе и электрическому заряду. Все «умения» электрона сводятся к демонстрации внешнему миру нескольких чисел или к обмену с этим миром какими-то числами; такие обмены требуются для того, чтобы электрон мог участвовать в законах сохранения, ведь они выражаются через баланс чисел (о законах сохранения говорится в приложении А). Набор из нескольких чисел и определяет состояние электрона. Сказать что-то сверх этого едва ли возможно, потому что электрон *элементарен*. Мы привыкли, что вещи из чего-то состоят, но элементарный объект не состоит ни из чего, кроме самого себя. Из-за этого его существование носит несколько более абстрактный, математический характер. Свойства «обычных» вещей тоже можно представлять числами: например, форма тела описывается или с помощью формулы, которая эти числа производит, или в виде огромной таблицы, в которой записаны координаты множества точек на границе тела. Для привычных нам вещей таких чисел много, пренебрежение несколькими из них никакого значения не имеет. Письменный стол, за которым я сижу, достался мне от моего деда, он несет на себе следы времени, и математически его форма слегка отличается от той, что была на пороге фабрики; это, однако, не мешает столу оставаться самим собой. Элементарным же объектам, таким как электрон, недоступно разнообразие подробностей; у электрона нет «левого бока», который можно было бы помять или поцарапать, потому что «помять» или «поцарапать» означает воздействовать на составные части, но составные части отсутствуют. Состариться электрон тоже не может, в нем *нечему* стариться. Ему решительно некуда поместить и малую долю тех свойств, которыми обладает самая крохотная песчинка, попавшая на мой стол. Песчинку я могу взвесить и таким образом узнать ее массу; могу измерить скорость, с которой она улетит, если я на нее подую (так я узнаю ее количество движения); кроме того, я всегда могу определить точку, в которой она находится. При этом количество движения и местоположение песчинки выглядят как некоторые «внешние» свойства, не определяющие ее как таковую, — песчинка может иметь любые значения этих величин, «никого не спрашивая». Дело обстоит так потому, что песчинка большая и сложная: ее «правый бок» может оказаться более острым, чем левый, одна ее сторона может оказаться более плотной, чем другая, где-то к ней мог прикрепиться вирус, где-то еще на поверхности имеются микроскопические трещины и т.д. Но элементарные объекты существуют без всех этих прекрасных подробностей. Все их свойства сводятся к горстке чисел — частью перманентных, а частью зависящих от состояния, чисел, которые им совершенно необходимы, чтобы поддерживать отношения с миром. Это довольно необычно из-за перенесения внимания с чего-то вроде вещи «самой по себе» на более абстрактные понятия — «величины» и их значения, описывающие эту «вещь». Но еще более необычно, как в этих условиях проявляет себя квантовая природа мира: из-за принципа неопределенности *не все свойства прикрепляются к объекту одновременно*. Координата вдоль выбранного направления и количество движения вдоль того же направления не могут описывать состояние электрона одновременно.

### *Постоянная Планка вызывает вражду*

Принцип неопределенности — проявление «вражды» между некоторыми величинами, вызванной тем, что постоянная Планка $\hbar$ вторгается в отношения этих величин друг с другом и непоправимо их искажает: изменяет правила, по которым с этими величинами следует обращаться в математических формулах. Из-за этого оказывается невозможным — в строгом математическом смысле невозможным, — чтобы эти величины, относящиеся к одному и тому же объекту, одновременно обладали определенными численными значениями. Они могут принимать определенные значения по очереди, но не вместе.

Привычные способы описания вещей рушатся. Неизбывная вражда, определяемая наличием постоянной Планка, составляет неотъемлемую часть устройства Вселенной. Такое положение дел влияет не только на то, *что* понимается под движением объектов, но в некоторой степени и на сам характер их существования. Объекты и явления не без труда обзаводятся свойствами, потому что все те свойства, которые они могут нести одновременно, с необходимостью ограничены набором полностью дружественных между собой величин — тех, в чьи отношения постоянная Планка не встревает. И это относится не только к собственно элементарным частицам, таким как электрон, но и к составным, таким как протон и нейтрон, и даже не только к ним, а еще ко всем *достаточно простым* объектам (например, атомам), в которых эффекты вражды не «размыты» большим количеством степеней свободы. (Я буду иногда упоминать «простые объекты» наряду с собственно элементарными, но для краткости часто буду говорить об элементарных, помня тем не менее, что законы квантовой механики актуальны вовсе не для одних только элементарных частиц.) Элементарные и простые объекты существуют в условиях «внутреннего напряжения» из-за встраивания постоянной $\hbar$ в мир в довольно неудобных местах. О том, каковы в точности правила квантового мира, удалось догадаться под жестким давлением обстоятельств: той самой невозможности существования атома и еще нескольких аналогичных «нелепиц». С тех пор мы несчетное число раз убеждались, что эти правила работают, но это не делает их интуитивно понятными.

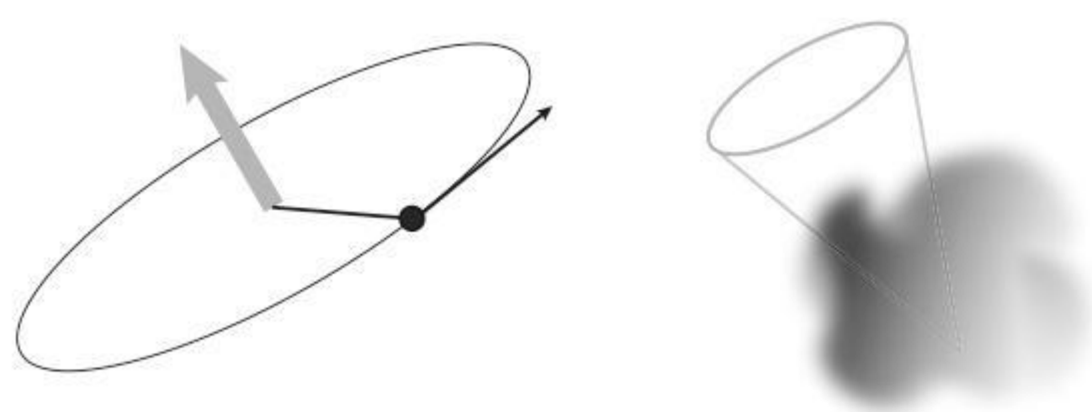


**Рис. 10.8.** *Слева:* вращение, как мы привыкли себе его представлять: камень на веревке. Количество вращения выражается тремя числами, которые определяют вектор, показанный на рисунке стрелкой; она направлена вдоль оси вращения и тем длиннее, чем больше масса «камня», радиус и скорость вращения. *Справа:* в квантовом мире нет вектора количества вращения. Одновременно определены лишь два числа: интенсивность вращения и одна из компонент количества вращения. Взятые вместе, они определяют не ось вращения, а воображаемый конус, показанный на рисунке

Вражда наследуется — переходит на другие величины, сконструированные из тех, что враждуют. Немедленная жертва — количество вращения. В ньютоновском мире оно конструируется из двух величин: это положение (три числа) и количество движения (еще три); само количество вращения — это тоже три числа: оно имеет не только величину, но и направление и направлено всегда вдоль оси вращения. Три числа, его выражающие, — это три компоненты, определяющие стрелку на рис. 10.8 слева. Но в квантовом мире ингредиенты для построения количества вращения — координаты и компоненты количества движения — попарные антагонисты, они не могут иметь значения одновременно. Из-за этого каждая компонента количества вращения враждует с каждой другой, а это значит, что даже две из них не могут одновременно иметь определенные значения. Стрелки типа той, что изображена на рис. 10.8 слева, в квантовом мире не существует: направление оси вращения указать нельзя. Вся идея «вращения» подлежит пересмотру. (Это, впрочем, вселяет осторожный оптимизм, если мы намерены понять, что делает электрон в атоме, ведь вращаться обычным образом он там заведомо не может.)

*Нельзя определить ось вращения*

*Кое-что* от стрелки все-таки остается. Три компоненты количества вращения, которые не могут ужиться даже попарно, находят способ сложить три вражды в одну дружбу: «общая величина» количества вращения, лишенная информации о направлении, все-таки дружит с каждой из компонент. Это величина, которая в классическом мире представляет собой длину стрелки на рис. 10.8 слева. Ради упрощения далее на этой прогулке я предлагаю интересоваться даже не самой длиной стрелки, а квадратом этой длины (по тем же причинам, по которым *квадрат* гипотенузы проще всего выражается через квадраты катетов). Возводим каждую компоненту количества вращения в квадрат и складываем результаты: (1-я комп.)$^2$ + (2-я комп.)$^2$ + (3-я комп.)$^2$. Мне надо придумать для этой суммы квадратов какое-то короткое название. Я уже использую необщепринятое «количество вращения», и терять мне особенно нечего, поэтому я буду говорить «интенсивность вращения». Хотя каждая из компонент количества вращения враждует с каждой, интенсивность вращения — сумма трех квадратов — дружит с каждой компонентой (буква $\hbar$ уходит из их отношений). Квантовое описание вращения задается поэтому двумя величинами, которые только и могут одновременно иметь определенные значения: интенсивностью вращения (которая не зависит от направления) и *одной* компонентой количества вращения — вдоль любого направления, но только какого-то одного (иногда удобно говорить «количество вращения вдоль данного направления»). Эти две величины определяют не стрелку, как на рис. 10.8 слева, а что-то вроде «набора возможных стрелок», которые лежат на поверхности конуса, показанного на рис. 10.8 справа. Коническая поверхность — все, что осталось от идеи оси вращения.

Мы постепенно приближаемся к ответу на вопрос о том, чем же занимается электрон в атоме. Часть ответа в том и состоит, что он несет в своем состоянии два числа: интенсивность вращения и количество вращения вдоль какого-то одного направления. Никаких дополнений, делающих картину больше похожей на вращение, нет и не будет. Правда, я чуть не забыл про еще одну проверку на вражду/дружбу. Ведь нас интересуют стационарные состояния электрона в атоме, а это — состояния с определенной энергией. Сложится ли дружный коллектив из энергии, интенсивности вращения и количества вращения вдоль одного направления? Ответ: да. Точнее говоря, если энергетическая яма для электрона одинакова по всем направлениям в пространстве (как это и имеет место вблизи атомного ядра), то все компоненты количества вращения, а потому и интенсивность вращения дружат с энергией. Энергия и интенсивность вращения, конечно, рады дружить со всеми тремя компонентами количества вращения, но те воюют между собой, из-за чего в дружный коллектив все равно можно записать только какую-то одну из этих компонент. Таким образом, в качестве свойств электрона в атоме остаются энергия, интенсивность вращения и одна компонента количества вращения. Мы серьезно продвинулись в направлении ответа на наш основной вопрос: выражаясь совсем наивно, это был вопрос «Как движется электрон в атоме?», но мы уже превратили его в несколько более осмотрительное «Что делает электрон в атоме?».

А что насчет количества движения электрона в атоме? Само наличие энергетической ямы означает, что энергия притяжения больше в одних точках и меньше в других, т.е. зависит от положения; из-за этого, как результат наследования вражды между положением и количеством движения, энергия электрона в атоме *не* дружит с количеством движения; его компоненты нельзя присоединить к списку. Здесь мы могли бы заподозрить, что если в «список дружбы» не попадает количество движения, то шансы оказаться там, наоборот, появляются у координат (положения), но в действительности координаты оказываются во вражде с уже включенными в список величинами. Это значит, что про электрон в стационарном состоянии внутри атома нельзя сказать, что в какой-либо момент времени он находится «здесь» или «там». Дело не в том, что он пребывает в разных точках в различные моменты времени, а в том, что ни в какой момент времени он не имеет свойства находиться в одной определенной точке. Такое свойство просто *не помещается* в стационарном состоянии электрона в атоме.

*У электрона в атоме нет свойства находиться в определенной точке в данный момент времени*

Промежуточный итог: энергия, интенсивность вращения и одна компонента количества вращения — вот три числа, которые может взять себе электрон в атоме. Это уже очень близко к тому, что электрон «умеет делать» в атоме, но пока еще не все квантовые странности проявили себя.

*****

**Господство целых чисел.** Энергия электрона в атоме, как мы уже видели, ограничена значениями из списка, которые занумерованы числами 1, 2, 3 и т.д. Эту энергию, другими словами, определяет целое число $n$, которое принимает значения от единицы и выше. Это просто номер! Но и две величины, которые только и остались от всей идеи вращения, — интенсивность вращения и одна компонента количества вращения, — не избежали похожей участи: жесткие правила квантового существования приводят к тому, что и они тоже управляются целыми числами. Условия, при которых движение (или уж что от него осталось) удается «поймать» в ограниченной области пространства, оказываются и в самом деле весьма ограничительными.

Для начала интенсивность вращения может равняться нулю. «Вращательный покой» для электрона, поселившегося в энергетической яме подходящей формы, ничем не запрещен. Кроме нуля, для интенсивности вращения есть и другие разрешенные значения. Это дискретный набор $1 \cdot 2\,\hbar^2$, $2 \cdot 3\hbar^2$, $3 \cdot 4\hbar^2$, $4 \cdot 5\hbar^2$ и т.д. (постоянная Планка здесь в квадрате, потому что мы не стали извлекать квадратный корень, определяя интенсивность вращения). Разумеется, дважды три — это шесть, а четырежды пять — двадцать, но сомножители оставлены «неперемноженными», чтобы была видна структура и стало понятно «и т.д.»: следующее разрешенное значение — это $5 \cdot 6\hbar^2$. Никаких других значений, кроме как из этой серии, нет: интенсивность вращения может быть равна только $\ell(\ell + 1)\hbar^2$, где букве $\ell$ можно придать значение 0 (вращения нет) или по очереди придавать значения 1, 2, 3, 4, …, что и дает приведенные выше «недоперемноженные» множители. Интуитивно: чем больше число $\ell$, тем «больше вращения». Вообще-то здорово: всего лишь постоянная Планка и произведение двух соседних целых чисел. И конечно, электрону в атоме *нельзя* сообщить интенсивность вращения, равную, скажем, $5\hbar^2$, или $\pi\hbar^2$, или $\hbar^2/3$, потому что таких значений нет среди разрешенных.

«Нечеловеческие» требования, предъявляемые уравнением Шрёдингера, на этом не заканчиваются, хотя следующее в сравнении со всем предыдущим уже похоже на придирку. Электрону нельзя сообщить слишком большую интенсивность вращения даже из только что перечисленных. На этот раз источник требования интуитивно понятен. На основе опыта обычного мира мы склонны подозревать, что более быстрая раскрутка может означать большую энергию. И если электрон устроился в атоме в состоянии с определенной энергией, то, наверное, не может взять себе слишком большую интенсивность вращения. Электрон как решение уравнения Шрёдингера и правда не может, и система ограничений работает следующим образом. В состоянии номер 1 — с минимальной энергией — электрону вообще нельзя иметь никакого вращения: число $\ell$ должно быть непременно равно нулю. В следующем состоянии номер 2 разрешены всего две возможности: иметь уже встречавшуюся нулевую интенсивность вращения ($\ell = 0$) или минимальную ненулевую, $1 \cdot 2\, \hbar^2$ (что означает $\ell = 1$). В состоянии номер 3 возможностей для буквы $\ell$ уже три: 0, 1 и 2. Так продолжается и дальше! В следующем состоянии с энергией номер 4 к уже перечисленным трем возможностям для интенсивности вращения добавляется еще одна, отвечающая значению $\ell = 3$, и т.д. Под руководством Шрёдингера электрон в целом с пониманием относится к идее, что при фиксированной энергии ему негоже брать на себя слишком много вращения.

В связи с «вращательными» состояниями электрона в атоме имеется небольшой номенклатурный курьез. До того как повсеместно распространились арабские цифры, во многих письменных языках буквам придавали числовые значения. В кириллице, например, *аз* имел значение 1, *веди* — значение 2, *иже* — значение 8 (а, скажем, *мыслете* — 40). Число $\ell$, ответственное за интенсивность вращения, являет собой нечастый пример противоположной идеи: значение 0 *называется буквой* s. Не любой нуль, а только нуль числа $\ell$, отвечающего за интенсивность вращения. Значение 1 называется буквой p, значение 2 — буквой d, а значение 3 — буквой f. Порядка в буквах не видно, поэтому первый вопрос к использованию этой схемы (*а она используется*): как продолжать? После f продолжают все-таки по алфавиту: значение $\ell = 4$ назвали буквой g, значение 5 — буквой h и т.д. Источник этого казуса, разумеется, исторический: атомы посылают во внешний мир сигналы в виде линий своих спектров, которые надо было как-то классифицировать еще прежде, чем они получили объяснение исходя из того, что делают электроны. Буквы s, p, d, f означали *sharp, principal, diffuse, fundamental*. Стоит заметить, что классификация оказалась «правильной» в том смысле, что, когда была создана квантовая механика, за различными буквами обнаружились различные числа.

### *От «вращения» электрона в атоме осталось два целых числа*

Нам осталось вспомнить про третью из величин в дружном коллективе — компоненту количества вращения (вдоль *любого* направления; от выбора направления ничего не зависит). Атому снова удается существовать только «в порядке исключения» — когда компонента количества вращения принимает специальные дискретные значения. И они совсем простые: $\hbar \cdot$ (целое число), причем это новое целое — из ограниченного интервала. Оно традиционно обозначается буквой $m$. Самое большое возможное значение этого $m$ равно $\ell$, следующее в сторону уменьшения $\ell - 1$, потом $\ell - 2$; продолжая шагать вниз по целым числам, мы пройдем нуль и доберемся до $-\ell$ (отрицательные значения означают просто, что компонента направлена не «вперед», а «назад»). Здесь и надо остановиться. Для буквы $m$ имеются только возможности из списка от (наибольшего) $\ell$ до (наименьшего) $-\ell$.

Как мы видим, чем больше энергия (чем больше номер $n$ в списке разрешенных энергий), тем более разнообразна (в целом вообще-то скучноватая) жизнь электрона в атоме. Растущее число возможностей проиллюстрировано на рис. 10.9. Но это — все, что уравнение Шрёдингера без дополнительных накруток предоставляет электрону в атоме [214]. Финальное усложнение («с накрутками») еще появится и даже составит отдельную историю чуть дальше на этой прогулке, но общей картины это не меняет. Присутствие целых чисел в основе реальности довольно удивительно в сравнении с привычным миром, где целые числа встречаются только как *количества* предметов, тогда как в разнообразных явлениях, происходящих как рядом с нами, так и далеко во Вселенной, возможны совершенно любые значения скорости, плотности, температуры, энергии, напряженности магнитного поля и всего остального. Нет никакого механизма, в силу которого — например, для плотности —

значение 1 (*точно* единица) было бы предпочтительнее, чем 0,9999836800451061 или 1,000000000000001. Тем не менее именно целые числа (не приближенно, а в точности целые) встроены в самые главные для нас связанные системы — атомы.

| | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| $n = 3$: | $\ell = 2$: | $m = 2$, | $m = 1$, | $m = 0$, | $m = -1$, | $m = -2$ |
| | $\ell = 1$: | | $m = 1$, | $m = 0$, | $m = -1$, | |
| | $\ell = 0$: | | | $m = 0$ | | |
| $n = 2$: | $\ell = 1$: | | $m = 1$, | $m = 0$, | $m = -1$, | |
| | $\ell = 0$: | | | $m = 0$ | | |
| $n = 1$: | $\ell = 0$: | | | $m = 0$ | | |

**Рис. 10.9.** Как нумеруются возможные состояния электрона в атоме. При заданном номере уровня $n$ у электрона есть возможность выбрать целое число $\ell$ в интервале от 0 до $n - 1$, а после выбора $\ell$ — еще одно целое число, $m$, в интервале от $-\ell$ до $\ell$. Схему можно продолжить вверх

## *Появление целых чисел часто называют «квантованием»*

Про такое появление целых чисел часто говорят как про нечто «квантованное», результат «квантования» или просто «квантовое». Этот слегка расплывчатый способ изъясняться указывает на колоссальное сужение возможностей по сравнению с тем, что наивно могло бы иметь место. Сами числа тоже иногда называют квантовыми, но это обычные целые числа (такие как 5 или 8); квантовым же является тот факт, что они определяют дискретные значения каких-либо величин [215]. Происхождение некоторых целых чисел оказывается не так просто объяснить, когда они возникают в системах, намного более сложных, чем один атом, но и там базовая причина — существование в условиях неустранимой вражды между некоторыми парами величин.

*****

**Напряженное существование.** Мир, где властвует принцип неопределенности, казалось бы, должен выглядеть размытым и неточным, но в действительности все наоборот: мир оказывается чрезвычайно жестким и строгим, а потому *точным* в отношении тех значений величин, которые все-таки доступны существующим там явлениям. Это характерно для всех связанных систем — тех, составные части которых не разлетаются в стороны, а тем или иным образом удерживаются вместе (самый главный пример — атом). Попарная вражда одних величин с другими держит существование множества вещей на грани возможного: «еще бы чуть-чуть» — и решения уравнения Шрёдингера для пространственно ограниченного движения исчезли бы вовсе.

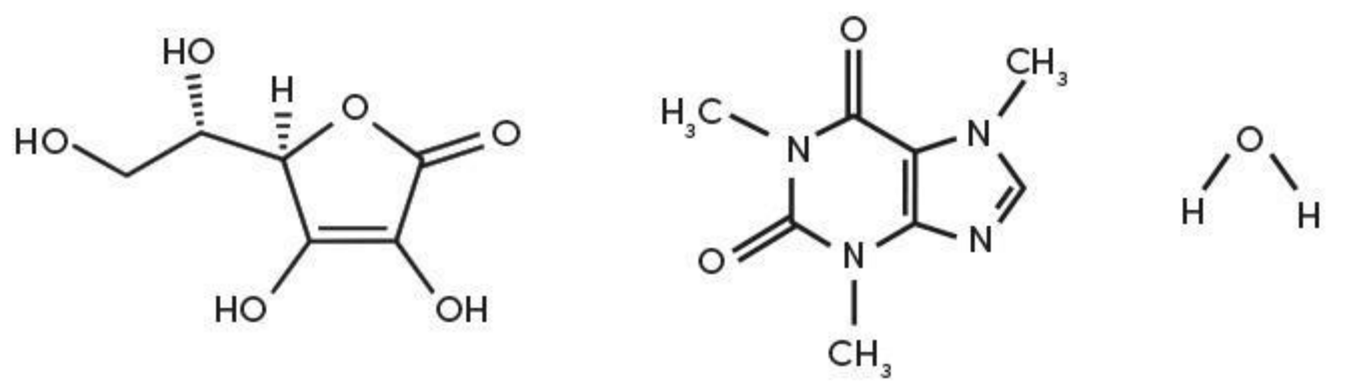


**Рис. 10.10.** Структурные формулы молекул. В молекулах нет никаких соединительных «палочек», будь то одинарные, двойные или пунктирные (они представляют собой условные обозначения), и молекулы не являются плоскими образованиями. Но структурные формулы имеют смысл, потому что каждая молекула с данной формулой собирается единственным или одним из нескольких способов. *Слева:* структурная формула молекулы аскорбиновой кислоты (витамина C). *В центре:* структурная формула молекулы кофеина. *Справа:* структурная формула молекулы воды

Тот факт, что связанные системы существуют в некотором роде «с большим трудом», только в определенных дискретных состояниях, оставляет им мало разнообразия; собственно говоря, вообще не оставляет разнообразия для состояния с наименьшей энергией, из-за чего все атомы одного типа и получаются совершенно одинаковыми. И не только атомы. Жесткость, встроенная в квантовую природу мира, проявляет себя и в других случаях сборки нескольких частей вместе: они соединяются не как попало, а некоторым дискретным числом способов, и часто — вообще одним-единственным способом. Если я буду лепить модели молекулы воды из пластилина, то все они окажутся у меня немного разными: угол между двумя атомами водорода будет зависеть от каких-то случайностей и неизбежных неточностей. Настоящие же молекулы воды себе такого позволить не могут: они все организованы одинаково именно потому, что такая организация выражает собой решение уравнения Шрёдингера, причем чаще всего единственное

[216]. В частности, структурные формулы молекул в подавляющем большинстве случаев *определяют*, каким именно образом «собирается» молекула (рис. 10.10); именно поэтому достаточно условные структурные формулы и имеют смысл.

Не так легко представить себе, как был бы устроен мир вокруг нас, если бы жесткие условия сборки молекул не определяли результат практически единственным образом — скажем, если бы уже в молекулах воды угол между двумя атомами водорода мог плавно меняться от молекулы к молекуле. Например, способность «воды» к замерзанию тогда сложно зависела бы от процентного содержания молекул разных типов. В более сложных случаях молекулы то вступали бы между собой в реакцию, то нет или вступали бы с разными результатами, в зависимости от своей «версии». По счастью, ничего этого среди простых молекул не случается: жесткие правила игры держат молекулы «в форме» — причем в единственной, с точностью до дискретных преобразований. Дело опять в том, что уравнение Шрёдингера для связанных систем *почти невыполнимо*, а именно невыполнимо для всех случаев, кроме особых, которые можно пересчитать. Без этого мир не собрался бы таким структурированным образом.

*****

**Почему Менделеев был прав.** Целые числа, описывающие «пойманное» движение, видны не только в спектрах атомов; они присутствуют и на рис. 5.8 — «за кадром», но от этого не менее веско: они *определяют форму* Периодической таблицы элементов. Для удобства она воспроизведена еще раз на рис. 10.11. Каждая ее строка называется периодом; химические свойства элементов «плавно меняются» от начала к концу периода и в разных периодах делают это сходным образом. В этом и заключается причина называть таблицу периодической. В разных периодах количество элементов неодинаково, из-за чего таблицу и рисуют с разрывами сверху; а чтобы не делать эти разрывы неприемлемо большими по типографским соображениям, части самых длинных периодов, наоборот, выносят в отдельные строки. И вот факт, выведенный Менделеевым из наблюдений над природой, но в то время необъяснимый: в первом периоде 2 элемента; во втором и третьем — 8; в четвертом и пятом — 18; в шестом и седьмом — 32. Сейчас мы (почти) воспроизведем эти числа, просто глядя на рис. 10.9! Надо только вспомнить, что порядковый номер элемента в таблице определяет количество электронов в атоме [217].

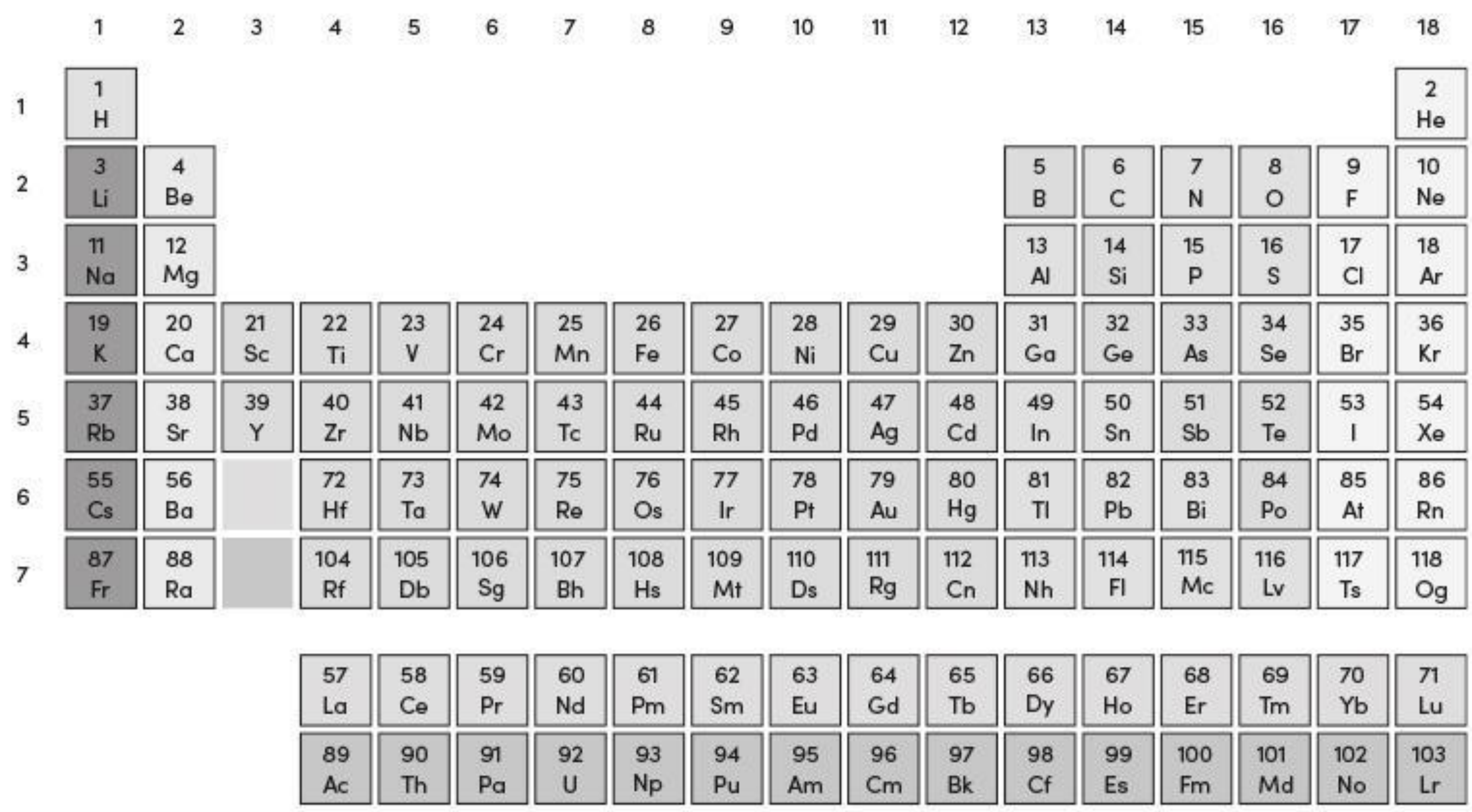



**Рис. 10.11.** Периодическая таблица элементов. Каждая строка — период, на протяжении которого химические свойства плавно меняются, в конце периода превращаясь в «противоположные» тем, которые имеются в начале. Длина периодов увеличивается сверху вниз, поэтому первые периоды рисуют с разрывами, а из последующих, наоборот, некоторую часть выносят в отдельные строки

Совместное существование нескольких/многих электронов в одном атоме вообще-то отличается от жизни электрона в одиночестве: они расталкивают друг друга, но вынуждены делить между собой весь тот скудный комфорт, какой имеется внутри энергетической ямы, созданной положительно заряженным ядром. Тем не менее организация атома со многими электронами сохраняет преемственность со списком вариантов, которые доступны единственному электрону, живущему в свое удовольствие в атоме водорода, вот в каком смысле. Взяв, например, атом элемента номер три — лития — и оторвав от него один электрон, мы получим ион, общий электрический заряд которого складывается из заряда ядра, равного +3, и зарядов двух оставшихся электронов, каждый по –1, итого +3 – 1 – 1 = +1. Это такой же заряд, как у ядра атома водорода. Когда мы вернем изувеченному атому лития оторванный электрон, этот электрон окажется примерно в такой же энергетической яме, как в атоме водорода. Электрон рад бы устроиться в состоянии под номером $n = 1$ в списке, который разрешает строгий Шрёдингер, но его уже заняли два электрона, которые имеются в ионе лития. Все, что остается возвращенному электрону, — это сесть в первое из незанятых состояний, а это одно из состояний при $n = 2$. [218] Его энергия близка к энергии электрона, попавшего в состояние с номером $n = 2$ для атома водорода (но в атоме водорода электрон, оказавшийся в этом состоянии, быстро испустит фотон и снова вернется в состояние с наименьшей энергией, а в литии это невозможно, потому что оно уже занято). В атомах с большим числом электронов картина усложняется, но состояния, последовательно занимаемые электронами, остаются качественно такими же, как те, что мы перечислили в списке возможностей для одного электрона. Этими возможностями управляют те же целые числа, с которыми мы имели дело на рис. 10.9. Сколько же имеется состояний при заданном значении энергии? Как видно из рис. 10.9, на первом энергетическом уровне ($n = 1$) имеется всего одно состояние (не очень удивительно: минимум энергии — минимум возможностей). На следующем уровне $n = 2$ уже четыре состояния, а на уровне $n = 3$ их девять. Аналогично после небольшой возни мы убеждаемся в том, что уровень энергии с номером $n = 4$ допускает 16 состояний.

Появились прекрасные числа 1, 4, 9, 16 (следующее, очевидно, 25). Умножив каждое из них на два, получим числа 2, 8, 18, 32. Как мы только что видели, они же — длины периодов в Периодической таблице (2, 8, 8, 18, 18, 32, 32). Но почему умножение на двойку? Дело выглядит так, как будто возможных состояний для электронов в два раза больше, чем мы смогли найти до сих пор. Откуда они берутся? Если мы надеемся объяснить Периодическую таблицу элементов исходя из устройства атома, этот вопрос надо как-то решить. Решим, но сначала немного отдохнем от атомов.

*****

**Неугомонные колебания.** Несколько неожиданное, но вообще-то почти очевидное следствие из принципа неопределенности состоит в том, что невозможен покой. Покоя не бывает просто потому, что он означал бы определенное положение при определенном количестве движения (а именно нулевом).

Невозможность покоя порождает особый вид «движения», который нельзя отобрать у системы; оно входит в способ ее существования. Такое положение дел особенно выразительно проявляется во всем, что способно совершать колебания («дрожания», или «шатания», или «качания» туда-сюда). А способность эта распространена чрезвычайно широко, потому что присуща всем устойчивым образованиям. Сама идея устойчивости в том и состоит, что система возвращается в прежнее состояние, когда на нее воздействует что-то не слишком разрушительное: в макромире высокие здания (не говоря уже о деревьях) *качаются* на ветру; то же самое делают крылья самолета в полете; пол, по которому вы ходите, в *некоторой* степени поддается давлению, а потом возвращается в прежнее состояние (а если не возвращается, то вы, похоже, сильно затянули с ремонтом); в мире малого атомы, соединенные в молекулы, испытывают воздействие соседей, которые вообще-то могли бы эту молекулу разрушить, но в подходящем диапазоне условий молекула себя сохраняет, несмотря на получаемые извне «пинки». Показательный пример колебательных систем — молекулы, образованные из двух атомов [219]. Отличительная черта колебательных систем — энергетическая яма вроде показанных на рис. 10.12: ее края не выполаживаются, как в атоме, а, наоборот, уходят неопределенно высоко вверх. Для молекул и других подобных образований такая картина является идеализацией: в реальности стенки имеют конечную высоту и, скажем, разрушение молекулы можно интерпретировать как преодоление стенок посредством переползания через край. И тем не менее такие идеализированные энергетические ямы находят широчайшее применение при описании природы.

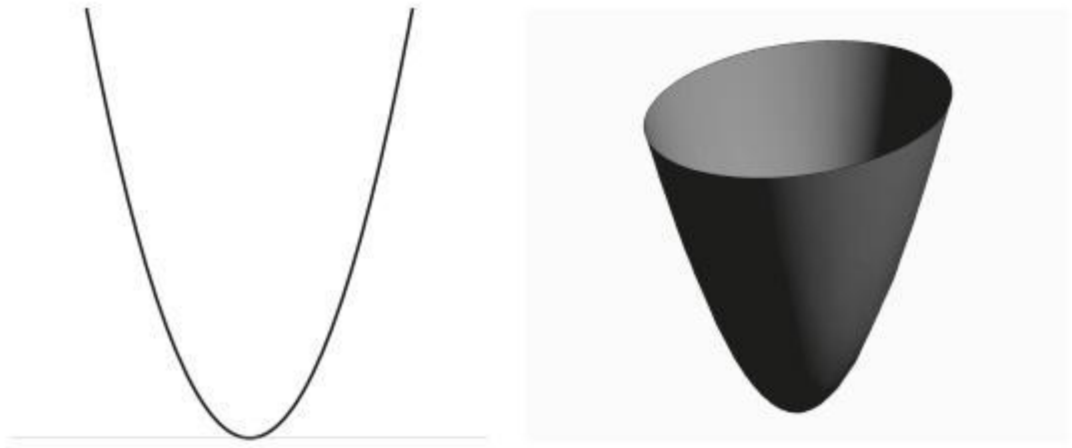


**Рис. 10.12.** Энергетические ямы, определяющие идеальные колебательные системы. *Слева:* колебания происходят в одном измерении. *Справа:* колебания происходят в двух измерениях. Вертикальное направление выражает энергию, а горизонтальные — координаты: вдоль одной прямой слева и на плоскости справа

### *Нулевые колебания — неустранимое движение*

В каждой квантовой системе, определяемой энергетической ямой подобного вида, имеется низший уровень движения *вместо* покоя. Аналогов в привычном нам описании движения у этого явления нет. Этот неустранимый остаток называется *нулевыми колебаниями*. В слове «нулевые» можно при желании увидеть легкую насмешку над смыслом, потому что эти колебания несут в себе пусть крохотную, но ненулевую энергию. А вообще, колебательным системам живется почти так же тяжело, как атомам, — по сходным причинам, связанным с конфликтом между ограниченным в пространстве движением и принципом неопределенности. Они тоже существуют только при специальных значениях энергии, из своего собственного списка. Для определенности будем говорить о колебаниях, происходящих вдоль одной прямой (чему отвечает энергетическая яма на рис. 10.12 слева). Если перед вами такая колебательная система, а вы желаете ее «взбодрить», передав ей дополнительную энергию, то принимать она сможет только дискретные порции. Картина даже проще, чем в атоме: состояние под номером один в списке (первые «настоящие» колебания, не считая нулевых) требует энергии, которая превосходит энергию нулевых колебаний на удвоенную энергию этих нулевых колебаний. Следующее (второе в списке) возможное состояние колебательной системы требует еще одну порцию энергии величиной с удвоенную энергию нулевых колебаний, следующее — еще одну и т.д. Все энергии в списке идут с постоянным шагом, интервал между двумя соседними энергиями всегда один и тот же. Величина этого энергетического интервала — свойство каждой колебательной системы, «лично» ее характеризующее. Поделив этот интервал на постоянную Планка, мы получаем величину, которая определяет колебательную систему в классическом (неквантовом) мире, — собственную частоту ее колебаний. Конечно, со связью возможных значений энергии и частоты мы уже встречались на предыдущей прогулке: именно на эту идею (энергия) = $h \cdot$ (частота) и набрел Планк в 1900 г. Это правило, как мы теперь видим, выражает собой глубокую природу вещей: тот факт, что колебательные системы существуют только при дискретных значениях энергии.

Мы, разумеется, радуемся дискретности: молекула, способная совершать колебания, поглощает и излучает свет на строго определенных длинах волн, а это дает способ выявлять наличие определенных молекул на сколь угодно большом удалении от наблюдателя, если только он обзавелся хорошими оптическими инструментами. Дискретные линии в спектрах играют роль «цифровой подписи» и атомов, и молекул, выдавая их присутствие. Правда, дискретность в мире молекул становится малозаметной, когда характерные переданные им энергии велики по сравнению с интервалом между разрешенными значениями энергии — что происходит при «высоких» (точнее, «не сверхнизких») температурах. Квантовые эффекты тогда «пропадают», примерно как отдельные песчинки перестают иметь значение при отгрузке песка в промышленном масштабе, когда песок «течет» как непрерывная среда. Зато при по-настоящему низких температурах квантовые свойства проявляют себя в полной мере, что открывает невиданные ранее возможности измерения тонких эффектов, связанных с квантовой дискретностью [220].

Колебания, которые *нельзя* совсем остановить, а можно только перевести в некоторый «нулевой» режим (с ненулевой, однако, энергией), не могут выглядеть как колебания шариков на пружинке. Чтобы это подчеркнуть, иногда говорят «квантованные колебания» или «квантовые колебания», но я буду чаще всего говорить просто «колебания», лишь время от времени напоминая, что они не без странностей. За следующим поворотом на этой прогулке они буквально обрушатся на нас, потому что невозможность покоя и квантовое устройство колебаний — явления, проявляющие себя не только для молекул, но и как фундаментальный эффект, лежащий буквально в основании мира. Но чтобы обсуждать его, нам потребуется еще одно рассуждение, которое соединяет принцип неопределенности с Самой знаменитой формулой и буквально открывает бездну.

*****

**Квантовая первооснова.** Принципы организации природы действуют не в изоляции друг от друга, а составляют единую картину — уже по той одной причине, что работают в одной и той же Вселенной. Ситуации, в которых нам непонятно, как два разных принципа совмещаются, представляют собой движущую силу прогресса или по крайней мере постоянное напоминание, что прогресс (был бы) желателен; дежурный пример — квантовая гравитация, т.е. соединение идеи искривленного пространства-времени с квантовыми концепциями; непонятно, как они работают вместе. На этой «квантовой» прогулке мы деликатно не будем даже вспоминать про общую теорию относительности. Зато со специальной теорией относительности все совсем неплохо: за два с небольшим десятилетия после создания квантовой механики, с перерывом на Вторую мировую войну, было достигнуто понимание, как совместить квантовые принципы с принципом относительности. Это понимание с тех пор углублялось по мере своего распространения на новые аспекты реальности, открываемые в экспериментах. Содержательная часть тут довольно сложна, но для наших целей достаточно взгляда с высоты птичьего полета.

Проникновение в субатомный мир открыло элементарные частицы в качестве самого простого, что там есть. Название «частица» несколько сбивает, потому что им нельзя приписать ряд свойств, которыми мы наделяем обычные частицы, из-за чего они не очень-то и «частицы», но название давно установилось. В статусе их существования, как бы то ни было, обнаруживается дополнительная странность, связанная с Самой знаменитой формулой $E = mc^2$, которая говорит, что энергия и масса суть одно и то же. Для заданной массы частицы имеется характерная длина $\hbar/(mc)$, симптоматично определяемая с помощью двух мировых констант: постоянная Планка отвечает за квантовые эффекты, а скорость света — за эффекты, связанные с относительностью (структурой пространства-времени). Выберем для определенности электрон; тогда $m$ — это его масса, а указанная длина составляет $2{,}4 \times 10^{-10}$ см, т.е. тысячные доли нанометра. На этих и меньших расстояниях картина реальности несколько «расползается» вот каким образом: неопределенность в количестве движения электрона оказывается столь велика, что соответствующая ей неопределенность в значении энергии движения может превышать $2mc^2$. Но если энергия определена только с такой «погрешностью», то и число частиц больше не определено точно! Каждая «неточность» указанного размера имеет в качестве своего носителя пару, состоящую из электрона и его античастицы, позитрона (пара необходима, чтобы суммарный электрический заряд оставался равным нулю). Мы приходим к выводу, что из-за совместного действия квантовых законов и теории относительности *количество* имеющихся частиц невозможно точно фиксировать на малых расстояниях; *электрон перестает быть одним электроном*. Принцип неопределенности в сочетании с теорией относительности настигает, казалось бы, незыблемое — «количество предметов», в данном случае элементарных частиц. Если выражаться фигурально, на малых масштабах об электроне оказывается невозможным говорить без «ряби в глазах».

*Принцип неопределенности распространяется на количество частиц в малом объеме*

Развитие этой идеи привело к выводу, что электрон (как и любая элементарная частица) — не самый фундаментальный объект, а представляет собой проявление чего-то более фундаментального, что уже *совсем* не похоже на частицы. Оно, это более фундаментальное, само распоряжается появлением и исчезновением электронов и позитронов, следя при этом за выполнением и законов сохранения, и принципа относительности, и квантовых принципов, включая и принцип неопределенности. Теоретическая конструкция, в рамках которой удалось совместно реализовать набор непростых требований, получилась несколько вычурной математически, но с этим приходится мириться, потому что более простой придумать не удается, а эта, кроме того, продемонстрировала феноменальную — не превзойденную нигде в науке — степень согласия теоретических предсказаний с наблюдениями. На фундаментальном уровне, согласно этим идеям, мир состоит из *квантовых полей* — распределенных в пространстве сущностей, которые способны нести энергию, но содержат в своей природе непримиримость, инспирированную постоянной Планка $\hbar$.

Квантовое поле представляет собой сваленные в кучу квантовые колебательные системы — такие, где есть нулевые колебания, а все другие уровни энергии разделены одинаковыми интервалами. «Куча» эта колоссальна: колебательные системы существуют при каждом возможном значении количества движения. Выберите любое количество движения (три числа) — для него есть своя колебательная система. Ее пространственное положение не определено, и можно сказать, что квантовое поле заполняет все пространство. Колебательные системы, которые все вместе составляют поле, — это *возможности* для того, чтобы в них происходили колебания: если угодно, это «ниши», которые могут заполняться передаваемой полю энергией. Когда колебания на первом уровне энергии возникают в колебательной системе, отвечающей выбранному количеству движения, в природе появляется электрон (или, в зависимости от некоторых дополнительных подробностей, позитрон) с данным количеством движения. А взаимоотношение всех этих колебательных систем с пространством-временем таково, что никакие сигналы не передаются быстрее скорости света и вообще выполнены все требования специальной теории относительности. Теоретическая конструкция, которая обеспечивает все это, называется квантовой теорией поля.

Резюме, важное нам для дальнейшего: каждая элементарная частица представляет собой проявление более глубокой сущности — является, как говорят, квантом поля. Электрон — квант электрон-позитронного поля, а фотон — квант электромагнитного поля [221]. И вообще, каждая элементарная частица — квант соответствующего поля, его *элементарное*, т.е. самое простое, возбуждение; это минимальный способ, которым поле может нести энергию, превосходящую энергию нулевых колебаний. «Напряженность» квантового существования при этом снова в действии: строгая дискретность квантовых колебаний поддерживает все электроны во Вселенной совершенно одинаковыми.

Фундаментальных полей в природе несколько, их надо представлять себе существующими повсюду и совместно — «наложенными» друг на друга в пространстве. Часть из них при этом не замечают друг друга, но некоторые замечают — могут обмениваться энергией между собой; про такие поля говорят, что они взаимодействуют друг с другом. Картину взаимодействующих полей можно в известной степени перевести на язык их квантов. Правда, для этого требуются не просто кванты, а очень на них похожий, но несколько иной способ организации поля. Собственно кванты (например, электрон и фотон) — это возбуждения поля, способные к постоянному и «независимому» существованию, как, например, электрон в атоме, или электрон, работающий в телевизоре образца XX в., или фотон, летящий от светящегося тела. Но поле в целом устроено сложнее, чем набор таких возбуждений, и оно может порождать еще и некоторые «временные» (может быть, лучше говорить «промежуточные») состояния. Эти состояния — возбуждения поля, которые похожи на полноценные кванты всем, кроме одной, довольно радикальной черты: у них нет фиксированной массы, как у всех настоящих квантов (для которых она может быть нулевой, как в случае фотона, или ненулевой, как, например, для электрона, но в любом случае фиксирована, являясь, по существу, свойством поля). Эти «не совсем настоящие кванты» называют виртуальными частицами. Они возникают и исчезают в качестве агентов, которыми обмениваются друг с другом какие-то другие поля. Например, два электрона способны обмениваться такими «временными» возбуждениями электромагнитного поля — виртуальными фотонами; этим и обеспечивается электрическое отталкивание электронов друг от друга. Даже один электрон способен производить, а затем поглощать виртуальные фотоны.

Объясняясь на жаргоне, специалисты часто опускают слово «виртуальный», но помнить про него необходимо; обмен виртуальными фотонами между электроном и протоном мало похож на то, как если бы эти двое «светили друг в друга фонариками». Между протонами в атомном ядре и электронами в этом же атоме *не* летают туда-сюда «частицы света», но тем не менее обмен виртуальными фотонами обеспечивает притяжение электронов к ядру. Каждая виртуальная частица, проскакивающая между квантами каких-либо полей, переносит между ними некоторый набор чисел: заряды, энергию и количество движения. Когда квант какого-нибудь поля испускает виртуальную частицу, он отдает ей часть своих энергии и количества движения (а если она несет заряд, то и заряд), а когда другой квант поглощает виртуальную частицу, он забирает себе все, что она принесла. Энергия, количество движения и заряды сохраняются на каждом этапе, и в этом смысле виртуальные частицы воплощают собой способ бухгалтерского учета всех этих величин, передаваемых от одного поля другому. Какую именно величину энергии и количества движения берет на себя каждая отдельная виртуальная частица, никак при этом не регламентировано. Взаимодействие, которое возникает как результат их посреднической деятельности, представляет собой своего рода сумму вкладов виртуальных частиц со всевозможными значениями энергии и количества движения. (Кстати, если бы у виртуальных частиц была фиксирована определенная масса, они не справились бы с этой ролью: нарушились бы законы сохранения при их испускании и поглощении.) В какой же мере виртуальная частица похожа на настоящий квант? В некоторой: прежде всего тем, что ее порождает то же квантовое поле, которое порождает настоящие кванты; и тем, что она несет все квантовые числа настоящих квантов, кроме массы. Но из-за этого последнего обстоятельства она мало похожа на *частицу*.

Не регламентирована не только энергия, которую переносит каждая виртуальная частица, но и само количество виртуальных частиц, участвующих в процессе обмена. Всякое взаимодействие полей представляет собой обмен не одной виртуальной частицей, а неопределенным — *любым* — их количеством. Здесь, впрочем, видна и некоторая ограниченность идеи виртуальных частиц. Дело в том, что взаимодействуют все-таки поля, а представление этого взаимодействия на языке квантов, в виде дискретного набора возможностей (обмен одной виртуальной частицей, обмен двумя виртуальными частицами, обмен тремя и т.д.) — это до некоторой степени приближение. Оно дает прекрасные результаты в тех случаях, когда обмен второй виртуальной частицей приводит к заметно меньшим эффектам, чем обмен первой, а обмен третьей — меньшим, чем в случае первых двух, и т.д. Тогда последовательный учет все большего числа виртуальных частиц дает все более точную картину взаимодействия. Но если учет каждой следующей виртуальной частицы сильно меняет общий результат, то, значит, полная картина взаимодействия не сводится к дискретным актам обмена виртуальными частицами, а само понятие виртуальной частицы тогда оказывается довольно бесполезным.

Возвращаясь к «настоящим» квантам фундаментальных полей, я предвижу легкое недоумение относительно того, *в чем же* происходят все те колебания, которые составляют каждое из полей, что это за «среда», *что* там колеблется и чем порождается «упругость», требуемая для поддержания колебаний. Ответ оказывается очень коротким, потому что не предполагает объяснений одной вещи через другую (*все* объяснения должны когда-то останавливаться, и сейчас как раз такой момент). Все эти колебания в квантовом исполнении — свойство самих полей. Согласно современным представлениям, эти колебания и есть фундаментальная физическая реальность. Им не нужна никакая среда, они ни из чего не состоят; наоборот, все остальное состоит из них.

*****

**Кипящая пустота.** Из-за нулевых колебаний даже пустота (вакуум) «не совсем пуста». Вообще-то устроить пустоту означает убрать все, что можно убрать, и держать это все где-то еще: освободить помещение от всего, так сказать, движимого имущества. Однако там обнаруживается скрытое «недвижимое» — нечто, лежащее на самом дне, что нельзя «вымести» никакими средствами. Желая создать пустоту в выбранном объеме, мы убираем оттуда все элементарные частицы, какие только попадутся. Таким образом мы освобождаем объем от огромного числа носителей энергии. Но устройство вещей не позволяет забрать нулевые колебания квантовых полей. Они остаются, хотя и не принимают вида наблюдаемых частиц («шепот, который никто не слышит»); при этом они происходят абсолютно везде в том разнообразии и постольку, в каком и поскольку во Вселенной имеются фундаментальные поля *A, B, C*, … — каждое из них имеет свои нулевые колебания. Любое квантовое поле, существование которого заявлено во Вселенной, нельзя удалить *совсем*, его можно только оставить в состоянии с наименьшей энергией — энергией нулевых колебаний. Если вы зарегистрировались в качестве участника на достаточно серьезных соревнованиях, но не стали выходить на игры, то нельзя сказать, что вы совсем не присутствуете, хоть вас и не видно. Вы *заявлены*, и другие участники получают очки за победу над вами из-за вашей неявки. А если случится так, что разным участникам при этом присвоят разное количество очков, ваша «нулевая» роль внезапно окажется заметной. Почти так и происходит с пустотой.

### *Пустота — там, где только нулевые колебания*

*Наверное*, нулевые колебания могли бы тем или иным образом проявлять себя, если бы имелась другая версия пустого пространства, в которой нулевые колебания были бы устроены как-то иначе; тогда, ставя эксперименты и в том, и в другом пространстве, можно было бы прийти к каким-то заключениям о роли нулевых колебаний. Но ведь пространство у нас одно, с фиксированным составом «зарегистрированных» полей, да? Примерно так позднее описывал свои мысли и сомнения Казимир [222], который первым понял, что «другой вариант пространства» можно создать, расположив в вакууме параллельно друг другу две плоские пластины. Если они не заряжены, но идеально проводят электрический ток, то на границах пластин должны быть равны нулю электрическое поле вдоль пластины и магнитное поле поперек нее. Даже нулевые колебания электромагнитного поля, несмотря на то что их «совсем не видно», должны удовлетворять этим условиям. Но поле в зазоре между пластинами подчиняется таким условиям с двух сторон, тогда как во внешнем пространстве ограничение имеется только с одной стороны. Поэтому колебания между пластинами должны удовлетворять большему числу условий — и самих колебаний оказывается в некотором роде меньше. Это распространяется и на нулевые колебания, которые хоть и нулевые, но несут энергию. Недостаток энергии нулевых колебаний между пластинами зависит от расстояния между ними, а в таких случаях всегда возникает сила: пластины притягиваются. На расстоянии микрона их прижимает друг к другу давление, составляющее порядка десятка миллиардных долей ($10^{-8}$) атмосферного. Это не слишком большая величина, но ее можно измерить. И это притяжение довольно чувствительно к расстоянию между пластинами: уменьшение зазора вдвое приводит к увеличению силы притяжения в 16 раз (а в 10 раз ближе — в 10 000 раз сильнее). В реальных опытах наблюдаемая сила меньше из-за неидеальности пластин (в отношении и их проводимости, и шероховатости поверхности; да, и вычисления Казимира относились к абсолютному нулю температуры). Тем не менее она зафиксирована экспериментально [223].

*****

**Один мир — две системы.** Кванты одного поля — элементарные частицы одного вида — одинаковы. Но это не всё! Они *неразличимы*. Если у вас и у вашей приятельницы есть по электрону, которые вы запускаете с разных сторон в пустую коробку и позволяете им взаимодействовать друг с другом, то у вас нет возможности после этого с гарантией отнести домой именно «свой» электрон. Ситуация радикально отличается от обмена шариками марблс, когда вы наверняка сможете найти подходящий фломастер, чтобы предварительно поставить метку на своем шарике; если шарик такой, что на нем совсем ничего не пишет, возьмите тонкое сверло и сделайте маленькую выщербину. На элементарном же объекте «не пишет» никакой фломастер — у него нет никакой структуры, на которую можно было бы нанести отметку или из которой можно было бы выщербить кусок. Вы можете, конечно, постараться не сводить глаз с «вашего» электрона, чтобы потом унести обратно именно его. Но и эта стратегия обречена, потому что у электрона в коробке нет ясной траектории и, когда два электрона взаимодействуют, они «спутывают следы», лишая вас возможности проследить за тем, кто из них в точности что делал [224].

**Рис. 10.13.** Клоны в тесном взаимодействии. В отличие от ситуации в квантовом мире, мы все же в состоянии проследить за каким-то одним из них

### *Кванты одного поля лишены индивидуальности*

Неразличимость — свойство *каждого* вида элементарных частиц. Природа не позволяет приписать им индивидуальность. В этом смысле кванты ближе к битам информации, чем к шарикам марблс. Действительно, если вы пожелаете отличить один бит «0» от другого бита «0», то немедленно окажется, что вы имеете дело уже не с битами — вам пришлось увеличить количество информации, прикрепив к биту еще какой-то различитель. К квантам полей такие внешние различители просто не прикрепляются. Кванты любого выбранного поля массово ведут себя как «агенты Смиты» (рис. 10.13) с дополнительным свойством, которое едва ли под силу показать даже создателям фильма «Матрица», если бы они вдруг пожелали иметь еще и квантовых персонажей: когда такие Смиты набиваются в комнату, нет никакой возможности сфокусироваться ни на одном из них. Из мира удалена информация о том, «какой из них где и что делает». Для настоящих элементарных объектов (и близких к ним простых объектов) этой информации, собственно, никогда и не было; она не существует.

Принципиальная неразличимость отбирает у движения в квантовом мире еще больше наглядности (если таковая оставалась). Тем или иным образом собранные вместе и взаимодействующие электроны движутся — несут энергию и количество движения, а также обмениваются ими, — но делают это труднопредставимым «неиндивидуальным» способом: нет средств решить, что «этот» электрон движется примерно «здесь» или принадлежит именно этому атому в молекуле.

Неразличимы кванты любого поля, однако неразличимость проявляет себя двумя различными способами для двух принципиально разных классов, на которые делятся все квантовые поля в природе в зависимости от способности или неспособности их квантов собираться вместе. Кванты одних полей не терпят себе подобных в том же состоянии, а кванты других совсем не возражают и даже выказывают склонность собираться в одном состоянии. В нашей Вселенной присутствуют поля этих двух видов, и никаких других. Последствия для мироустройства оказываются колоссальными.

Для квантов полей из класса коллективистов нет проблем находиться в одном и том же состоянии. Пригласим агентов Смитов, которые имитируют такое поведение, занимать места в амфитеатре и будем считать, что чем выше ряд, тем большая энергия требуется, чтобы там устроиться. Эти агенты ведут себя полностью противоположно тому, как вы, скорее всего, вели себя, когда в последний раз были в кинотеатре: им очень нравится плюхаться в то кресло, где уже сидит несколько таких же, и чем больше их там, тем охотнее присоединяется еще один. (Правда, есть и противодействующий эффект: мы впустили в зал толпу, находящуюся при некоторой температуре, что означает распределение агентов по энергии: одни едва бредут, а другие, наоборот, бегут. При более высокой температуре больше агентов все-таки устроятся повыше в амфитеатре, хотя многие все равно будут сидеть «друг у друга на головах».) Про коллективизм неразличимых «агентов» говорят, что это поведение Бозе — Эйнштейна (чаще даже не «поведение», а «статистика»). В названии — две фамилии, одна из которых нам определенно более знакома. Любые частицы — элементарные или нет, — которые так себя ведут, называются бозонами (короткая фамилия очень пригодилась, не знаю, как бы они назывались, если бы Бозе в свое время не инициировал теоретическое изучение их свойств). При сверхнизких температурах коллективизм торжествует безоглядно: бозоны переходят в особое, отличное от всего остального состояние вещества, когда огромная, макроскопически большая их часть оказывается в квантовом состоянии с минимальной энергией. Такое состояние вещества носит сложное название «бозе-эйнштейновский конденсат». Его можно наблюдать в природе или, во всяком случае, в лаборатории [225].

### *Бозоны — отчаянные коллективисты*

Подведем промежуточный итог: бозоны вообще склонны «кучковаться», а при сверхнизких температурах даже имеют тенденцию «выпадать» все в одно состояние. В обычной жизни бозоны окружают нас в избытке, особенно в светлое время суток: таковы фотоны. (Но, как мы уже не раз видели, у света свои особенности; в частности, в бозе-эйнштейновский конденсат фотоны не собираются.)

### *Фермионы радикально нетерпимы к себе подобным*

Для квантов полей другого класса *невозможно* находиться в одном и том же состоянии с хотя бы одним себе подобным. Это гораздо ближе нам по духу, надо только помнить, что мы в огромной степени различимы, а «они» — нет; поэтому я бы назвал их манеру себя вести не индивидуализмом (индивидуальности они лишены), а нетерпимостью к себе подобным. О таких манерах говорят как о статистике Ферми — Дирака, а сами носители этих манер называются фермионами. Благодаря им-то вокруг нас и существует все интересное. И протон, и нейтрон, и электрон — фермионы. Их нетерпимость к клонам самих себя носит «абсолютный» характер: она сильнее всякой силы, которая пытается втиснуть два фермиона в одно и то же состояние. Впервые это свойство сформулировал Паули еще в начале 1925 г. (размышляя над расщеплением линий в спектрах!), и про это явление часто говорят как про принцип Паули, или принцип запрета Паули. Агенты Смиты, ведущие себя как фермионы, будут систематически занимать сиденья в амфитеатре снизу вверх; у них просто нет возможности усесться вдвоем в одно кресло-состояние. Только из-за нелюбви к себе подобным электроны в атоме не сидят все в состоянии с минимальной энергией; в мире, где такое было бы возможным, все атомы имели бы практически одинаковые химические свойства и из них никогда бы не образовалось никаких молекул, даже $H_2O$. Нам в нашей Вселенной «повезло» с тем, что ее основу составляют ненавистники себе подобных. Принцип запрета Паули заставляет материю организовываться *разнообразными* способами, а не одним-единственным, когда все «сваливается» в состояние с минимальной энергией. (Роль бозонов и фермионов в устройстве мира затрагивается также в приложении В.)

*Мир разнообразен благодаря фермионам*

Деление на бозоны и фермионы определяется внутренней природой полей и их квантов — как выяснилось, тем, в каких отношениях они состоят с *вращениями* в занимаемом ими пространстве-времени. За этими отношениями стоит довольно глубокий механизм, но вместе с тем они имеют и на удивление простое численное выражение: *спин*. Вообще спин — визитная карточка квантового мира. Это явление не без труда поддается описанию в наглядных терминах, но совершенно фундаментально для устройства вещей. Спин, помимо прочего, «спасает» Периодическую таблицу элементов, которую мы оставили в «недообъясненном» состоянии, не зная, откуда взять лишнее удвоение; поспешим же на помощь!

*****

**Вращение без движения.** В те начальные времена, когда я интересовался устройством мира совершенно любительски, черпая информацию откуда придется, что в основном означало всяческие словари и энциклопедии, начиная с Детской, меня неизменно разочаровывало сказанное там о спине. Спин, мол, это *квантовое число*, внутренне присущее (например) электрону. Дальше обычно прибавлялось, что спин не похож ни на что из того, что я, как читатель тех текстов, был в состоянии себе представить. Я оставался без нового знания, зато с неизменной прибавкой к чувству собственной неполноценности. Моя ближайшая задача на этой прогулке — добиться того, чтобы мои спутники в ответ на вопрос, что такое спин, *немного подумав*, ответили бы, что спин — это, да, некоторое квантовое число; но чтобы к этому можно было добавить больше, чем сказано в тех незадачливых энциклопедиях.

Спин был открыт как «небольшой кусок свободы», которым обладает каждый электрон. Как мы видели, согласно уравнению Шрёдингера стационарные состояния электрона в атоме определяются значениями трех целых чисел ($n, \ell, m$), которые отвечают за разрешенные значения энергии, интенсивности вращения и компоненты количества вращения вдоль одного направления (см. рис. 10.9). Из-за принципа запрета Паули несколько электронов в одно состояние поместить невозможно. Но благодаря спину в одном и том же состоянии, определяемом тройкой целых чисел, могут находиться *два* электрона, потому что они различаются между собой тем, как используют доступную им «внутреннюю свободу» — и таким образом ускользают от действия принципа Паули. Это то удвоение, которого ранее недоставало нам для объяснения Периодической таблицы.

### *Спин выражает внутреннее богатство поля*

Источник спина — ранжирование фундаментальных полей во Вселенной по «внутреннему богатству» возможностей. Богатство или бедность квантового поля определяется количеством колебаний с разными «метками»: у простейшего поля есть один-единственный набор колебаний — бесконечный, но единственный. У более «богатых» полей таких наборов несколько. Суть дела передает нехитрая аналогия: вы приобрели в магазине набор каких-то полезных, как вы думали, предметов, занумерованных числами 1, 2, 3, … (которые продолжаются неограниченно, т.е., честно говоря, набор бесконечный); но дома обнаружилось, что они довольно бесполезны, пока вы не докупите другой набор, занумерованный как 1′, 2′, 3′, …; потом история повторилась и вам пришлось приобрести и третий, 1″, 2″, 3″, …. Предметы 1, 1′ и 1″, взятые вместе, уже составляют нечто цельное и осмысленное, а по отдельности, наоборот, бесполезны; и предметы 2, 2′ и 2″ тоже и т.д. Другими словами, все ваше приобретение целиком надо воспринимать как бесконечный набор (1, 1′, 1″), (2, 2′, 2″), (3, 3′, 3″), …, в котором сгруппированы однотипные предметы, снабженные разными метками (без штриха, с одним штрихом, с двумя штрихами).

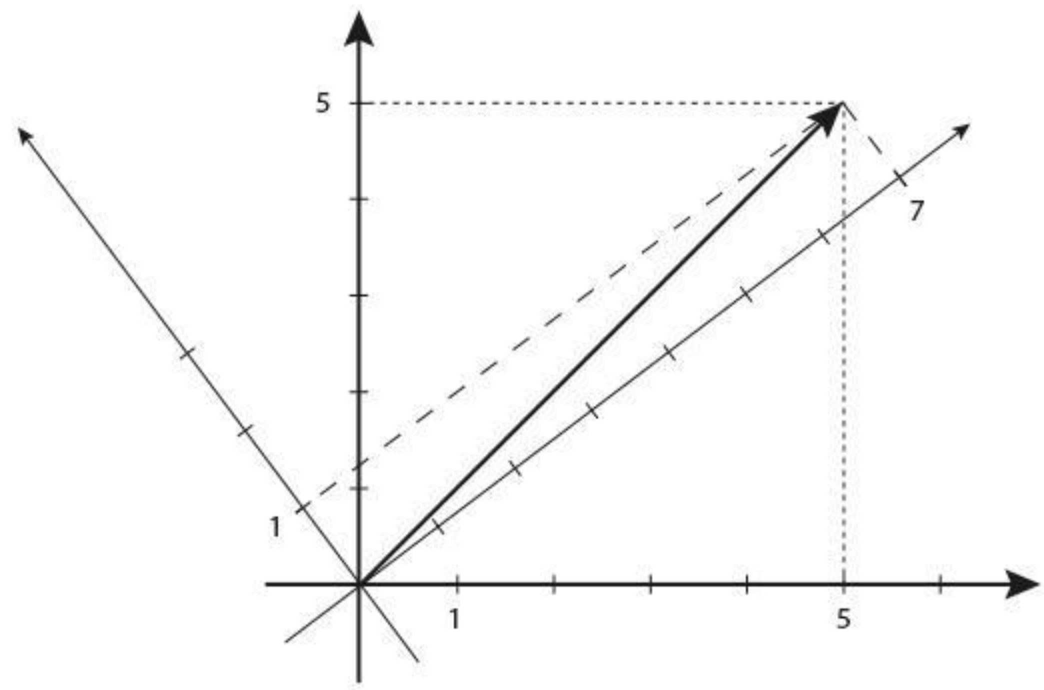



**Рис. 10.14.** Стрелка на плоскости задается двумя своими составляющими вдоль выбранных опорных направлений. Два наблюдателя выбирают свои опорные направления по-разному, из-за этого одну и ту же стрелку представляют разные пары чисел, в выбранном примере — (5, 5) и (7, 1). Тем не менее знание угла поворота (в данном случае — 36,87°) позволяет преобразовать одну пару чисел в другую

В случае полей спин выражает аналогичное размножение количества колебательных систем за счет снабжения их разными метками. Ключевой момент — требование, чтобы группа «одинаковых» колебательных систем, различающихся только метками, составляла нечто цельное и осмысленное. Пример набора чисел, составляющих «нечто цельное и осмысленное», — три компоненты стрелки (вектора) в пространстве. Для простоты на рис. 10.14 изображена стрелка в двумерном пространстве, так что у нее не три, а две компоненты. Два числа — две компоненты каждой стрелки — определяются по отношению к каким-то опорным направлениям. Конечно, стоит только выбрать эти направления иначе, как пара чисел (в трехмерном пространстве — тройка чисел) изменится. Мы к этому готовы. В другом месте мы уже обсуждали, что если я лягу на бок напротив памятника Пушкину, а высотой буду по-прежнему называть направление от моих ног к голове, то ширина памятника Пушкину окажется его высотой; а если мне удастся сохранять положение под углом 45° к горизонту, то исходные высота и ширина как-то перемешаются. При поворотах как на рис. 10.14 пары чисел тоже не остаются неизменными, но меняются («перемешиваются») *вполне* *определенным* образом в зависимости от угла поворота. Про пару (тройку) чисел, описывающих компоненты стрелки, можно сказать, что они определенным образом ведут себя при поворотах. *Это* и имеется в виду под требованием, чтобы группа (пара, тройка, …) чисел составляла «нечто цельное и осмысленное». Остается только вспомнить, что специальная теория относительности говорит нам, что «цельным и осмысленным» является поведение не при поворотах в трехмерном пространстве, а при поворотах в четырехмерном пространстве-времени. Тогда требуются уже не тройки, а четверки чисел; они представляют собой компоненты «четырехмерной стрелки» (четырехмерного вектора).

Оказалось, что я незаметно добрался до квантового поля спина 1. Это такое поле, где каждая колебательная система повторена четыре раза с различными метками; главное же в том, что каждая четверка ведет себя при поворотах так, как ведут себя компоненты четырехмерной стрелки/вектора. Примеры полей со спином 1 в природе есть — скажем, поле *Z*-бозонов [226]. Для сравнения: поле спина 0 — самое простое (ну да, «бедное») квантовое поле, в котором колебательные системы не имеют никаких меток, и ни о каком поведении при поворотах говорить и не приходится. (Известно единственное фундаментальное поле спина 0: поле Хиггса.)

А поле спина 2? Пожалуйста: там не четыре повторения каждой колебательной системы, а целых десять. Организующим принципом является уже не стрелка/вектор в пространстве-времени, а *таблица* типа той, что встречалась нам на прогулке 7, и правило, что все десять элементов таблицы пригодны для определения интервала в пространстве-времени. Это последнее требование и определяет, в каком смысле все десять чисел составляют «нечто цельное и осмысленное», — определяет, как они ведут себя при поворотах в пространстве-времени.

Набор колебательных систем, составляющих поле, — это не независимые поля, а нечто единое, и это единство выразительно проявляет себя на языке квантов. У поля спина

1 или спина 2 не четыре или десять разных квантов, а *один квант с кое-какой внутренней структурой* — и здесь главная неожиданность.

Вообще-то после всего встреченного и пережитого на этой прогулке вполне можно подозревать, что обещанная «структура» сведется к какому-то «квантовому числу», которое несет в себе квант поля. Так, разумеется, и случается; но интересным оказывается смысл этого числа. Оно выражает количество вращения — несмотря на то, что квант поля ни из чего не состоит и вращаться там внутри нечему (собственно говоря, нет никакого «внутри»). Это количество вращения чаще всего и называется спином. Оно представляет собой неотъемлемое свойство элементарной частицы, а не результат попадания ее во «вращательное состояние» в чем-то типа атома. Но это количество вращения без вращения (вообще без частей, которые могли бы вращаться) полностью повторяет неуживчивый характер, которым обладало количество вращения электрона в атоме. Там различные компоненты количества вращения попарно враждовали между собой, а объяснялось это плохой наследственностью: выражение для количества вращения строилось из координат и компонент количества движения, вражда между которыми и наследовалась. Спин же — это «готовое» количество вращения, которым обзавелся каждый квант сам по себе и которое ни из чего более простого не построено, и поэтому ниоткуда свои свойства не наследует. Тем не менее компоненты спина враждуют между собой в точности по тем же правилам и с теми же последствиями: никакие две компоненты спина не могут иметь определенные значения одновременно, а величина, которую мы раньше называли интенсивностью вращения, все-таки может иметь определенное значение одновременно с любой компонентой спина. Для всех квантов данного поля эта «интенсивность вращения» строго фиксирована, и выражающее ее число часто тоже называют спином: когда мы говорим, что поле имеет спин, равный единице, $s = 1$, имеется в виду, что «внутренняя» интенсивность вращения каждого кванта этого поля равна $1 \cdot 2\,\hbar^2$. В общем случае произвольного спина $s$ она равна $s\,(s + 1)\,\hbar^2$. [227] При этом компонента спина вдоль какого-то направления может иметь значения, определяемые целыми числами в интервале от $-s$ до $s$, что для спина 1 превращается в три числа –1, 0, 1, т.е. три возможных значения компоненты спина: $-\hbar$, 0, $\hbar$. *Это и есть та внутренняя свобода*, которой обладают кванты поля со спином 1. У каждого *Z*-бозона есть небольшой кусочек личной жизни — в пределах выбора из трех чисел.

*Если бы* «в какой-то другой Вселенной» спин электрона был равен единице (но невероятным образом продолжал бы действовать принцип Паули), то этот кусочек свободы позволял бы помещать в каждое состояние $(n, \ell, m)$ в атоме *три* электрона: один с компонентой спина $-\hbar$, другой 0 и третий $\hbar$; принцип запрета Паули не может ничего запретить тем, у кого различны компоненты спина. Тогда и Периодическую таблицу пришлось бы перекроить: длины периодов получались бы из чисел 1, 4, 9, 16, которые считываются из рис. 10.9, умножением не на 2, а на 3. Но нет, спин электрона не равен единице, и нам придется еще немного подождать с разрешением «загадки удвоения».

### *Свет — безмассовое поле спина 1*

Еще один пример поля спина 1 постоянно находится у нас перед глазами — постоянно, пока в глаза попадает хотя бы самая малая частица света. Электромагнитное поле («свет») имеет спин 1, его кванты — фотоны. Но со светом, как всегда, что-нибудь не так, как у всех. Из-за того что фотоны распространяются с максимальной в нашей Вселенной скоростью, они *безмассовые*. После математической обработки этого факта с использованием свойств пространства-времени оказывается, что фотон несколько обделен богатством внутреннего мира по сравнению со своим массивным собратом *Z*-бозоном: его компонента спина может иметь только два различных значения. Вместо трех остается два. (Это свойство света можно наблюдать в виде наличия *двух* базовых плоскостей поляризации.) Но это удвоение не годится для разрешения «загадки удвоения» в

Периодической таблице, потому что электроны не летают со скоростью света.

А каждый квант поля спина 2 имеет внутреннее изобилие в виде *пяти* возможных значений компоненты спина: $-2\hbar$, $-\hbar$, 0, $\hbar$, $2\hbar$ (здесь участвуют целые числа в интервале от $-s$ до $s$, когда $s = 2$). В природе такие фундаментальные поля нам, впрочем, неизвестны. Богатство заметно сокращается, если поле спина 2 безмассовое: тогда у его квантов есть только два возможных значения компоненты спина. (Снова двойка! Увы, снова не для электронов.) Такое поле известно широко и простирается далеко: это гравитационное поле — Агент, неотступно сопровождавший нас на прогулке 7. Правда, полной квантовой теории для него нет; если бы была, то это была бы теория безмассового квантового поля спина 2. И для полноты: кванты поля спина 0 лишены возможностей для внутренней самореализации. Если $s = 0$, то кванту не из чего выбирать. Синоним для обозначения этой скукотищи — скалярное поле, и его пример мы уже упоминали — поле Хиггса. Его квант — *бозон* Хиггса. Жизнь, как видим, не балует его разнообразием.

Но что же электрон? Малые целые числа в качестве значения спина ($s = 0$, $s = 1$ и $s = 2$) исчерпаны, более высокие заведомо не подходят, никаких возможностей на долю электрона не осталось?!

*****

**Спин электрона, наконец-то!** Спин электрона равен 1/2. Это бросает некоторый вызов правилам целочисленности, к которым мы только-только привыкли на этой прогулке. Отчасти из-за дробности ситуация со спином электрона прояснилась не сразу. Зато когда прояснилась, обнаружились связи с довольно тонкими свойствами пространства. В Институте теоретической физики в Копенгагене (теснейшим образом связанном с рождением квантовой механики) при участии Дирака изобрели даже детскую головоломку для иллюстрации этих свойств. В простейшем варианте, который я сделал из подручных средств минут за пять, требуется, скажем, кусок плотного картона или даже дощечка, если вы в состоянии проделать в ней три небольших отверстия (рис.

10.15). В эти отверстия вставляются три нити такой толщины, чтобы с ними было легко обращаться. Все нити выходят в одну сторону, и в «официальном» варианте головоломки противоположные их концы закреплены на второй дощечке; с равным успехом их можно привязать к стулу, и я так и сделал. Дощечка, из которой выходят три нити, остается у вас в руках. Все это устройство называется «танглоид» — это слово произведено от корня *tangle*, означающего путаницу, переплетения, иногда хитросплетения. Большой хитрости, впрочем, нет: вы поворачиваете дощечку на два полных оборота, т.е. на 720°, и после этого следите за тем, чтобы она больше не поворачивалась. Нити, естественно, перекручиваются. Задача же в том, чтобы их распутать, не поворачивая дощечку. Для этого разрешается заводить любую нить за дощечку и обносить вокруг нее. Головоломка несложная: даже действуя, в общем, наугад, решение удается найти с первой или второй попытки. Но только если вы повернули дощечку на 720°: если на 360°, т.е. на один полный оборот, то решения нет и нити остаются запутанными.

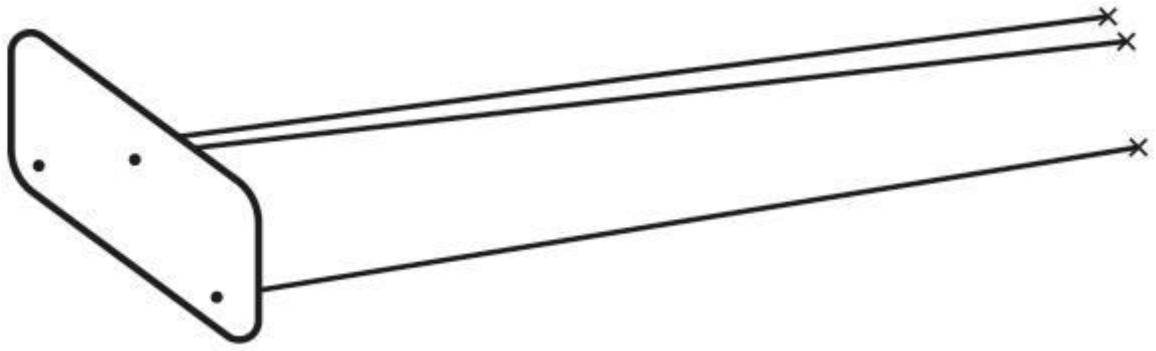


**Рис. 10.15.** Танглоид. Дальние концы трех нитей привязаны к чему-то неподвижному. Дощечку или картонку, сквозь которую продеты нити, поворачивают вокруг оси, идущей параллельно нитям, на один или несколько полных оборотов (360°, 720° и т.д.). Перекрученные в результате нити требуется распутать, обводя их по очереди вокруг дощечки, но не поворачивая ее саму. Задача легко решается при закручивании на четное число полных оборотов и не имеет решения для нечетного

В одном полном повороте есть что-то, что пропадает в двух полных поворотах.

Поле со спином 1/2 — это тоже наборы из нескольких «одинаковых» колебательных систем, снабженных различными метками. Но из-за специфики полуцелого значения требуется, чтобы они складывались в такое «цельное и осмысленное», которое ведет себя при поворотах похоже на дощечку-танглоид: меняется при произвольных поворотах так, что *не* остается неизменным при одном полном повороте на 360° вокруг любой оси, но не меняется при двух полных поворотах. Только это должны быть не дощечки с нитками, а какие-то наборы чисел — если такие найдутся, то их поведение при поворотах и определит, как ведут себя при поворотах колебательные системы поля с различными метками.

Но что за объекты, построенные из чисел, могут быть чувствительны к разнице между одним и двумя полными поворотами? Скажем, компоненты стрелки/вектора для этого совершенно не годятся: после одного полного поворота вектор остается таким же, каким был, и никаких отличий двух поворотов от одного он почувствовать не в состоянии. Тем не менее существуют математические объекты, которые можно научить вести себя при поворотах так, чтобы они возвращались в исходное состояние *только* после двух полных оборотов (а после одного полного — нет). Их можно придумать и для нашего трехмерного пространства, и для четырехмерного пространства, и для четырехмерного пространства-времени [228]. Они называются *спинорами*. Каждый спинор — это, конечно, тоже набор чисел, но их преобразование при поворотах таково, что поворот на 360° не возвращает их в исходное состояние, а приводит к умножению их на минус единицу. Требуется изящная математика, чтобы выяснить, набор из скольких чисел можно обучить таким изысканным манерам. Не вдаваясь в полуторастепенные детали, можно пользоваться следующим правилом: если сами повороты выполняются в пространстве размерности $d$ и это число $d$ четное, то спинор составлен из $2^{d/2}$ чисел. В четырехмерном пространстве, или пространстве-времени, т.е. при $d = 4$, это дает $2^2 = 4$ числа. Получается столько же чисел, сколько составляют вектор в четырехмерном пространстве, но это *совсем другие* четверки чисел: при поворотах они изменяются по иным законам. Если размерность пространства нечетна, то способ вычисления слегка меняется: спинор состоит из $2^{(d-1)/2}$ чисел. Для трехмерного пространства это дает $2^1 = 2$. Это значит, что пары чисел можно сделать чувствительными к поворотам в трехмерном пространстве таким образом, чтобы любой поворот на 360° приводил к умножению на минус единицу.

Итак, в четырехмерном пространстве-времени поле спина 1/2 имеет четыре компоненты. Каждая колебательная система в этом поле повторена четыре раза и копии снабжены такими метками, что вся четверка меняется при поворотах в пространстве-времени так, как это делают спиноры; в этом смысле четверки и составляют «цельное и осмысленное». Кванты этого поля — электроны и их античастицы (позитроны). Они делят между собой четыре составляющие спинора: две сообщают об электронах, а две другие — о позитронах. Сообщают же они, что каждый электрон несет внутри себя количество вращения, никак не связанное с пребыванием в атоме или где бы то ни было еще, а определяемое самим фактом его, электрона, существования. Интенсивность вращения при этом однозначно фиксирована и для электронов, и для позитронов: она (вспоминая общее правило) равна $s(s+1)\hbar^2$, где сейчас надо взять $s = 1/2$.

*Спин электрона равен 1/2*

Одну вторую из последнего равенства и называют спином электрона. Спин электрона — это *квантовое число, задающее его внутреннее количество вращения и равное* 1/2. Теперь понятно, как обстоит дело с внутренней свободой электрона: для компоненты спина, как всегда, возможны значения из интервала от $-s$ до $s$ с шагом 1, но сейчас интервал этот получается не слишком большим: он включает только сами числа –1/2 и 1/2 (расстояние между ними как раз равно единице). Таким разнообразием внутренней жизни и может похвастаться электрон: демонстрировать компоненту спина $-1/2\,\hbar$ или $1/2\,\hbar$ вдоль любого выбранного направления.

Это и решает «загадку удвоения» числа состояний для электронов в атомах. Периодическая таблица элементов спасена. Как именно организация ее клеток в периоды определяется свойствами состояний ($n, \ell, m$) «от Шрёдингера» и спином, несколько подробнее обсуждается в добавлениях к этой прогулке.

Спин электрона проявляет себя каждый раз, когда электрон оказывается в магнитном поле. Из-за наличия и спина, и заряда электрон реагирует на магнитное поле так же, как реагировал бы магнит: стремится ориентироваться вдоль магнитного поля. Такой магнит всегда одинаково сильный, ведь значение $s$ фиксировано числом 1/2. А когда электрон находится в атоме, он, кроме того, проявляет свойства магнита во всех случаях, когда устраивается там в состоянии с ненулевым количеством вращения (это означает, что буква $\ell$ равна не нулю, а одному из значений 1, 2, 3, …). Это уже похоже на факт из обычной жизни: когда электрические заряды вращаются — в обычном, а не ускользающем «квантовом» смысле, — они создают магнит. Электрон в атоме не вращается вокруг атомного ядра точно в том же смысле, но его способ пребывания в атоме с любым $\ell$, кроме нуля, тоже создает магнит — тем более сильный, чем больше это число $\ell$. Таким образом, у электрона в атоме есть два способа проявить себя в качестве магнита: за счет интенсивности вращения $\ell$, относящейся к состоянию в атоме, и за счет собственного спина, никак с атомом не связанного. По причинам, которые спрятаны довольно глубоко, спин электрона создает магнит в два раза эффективнее, чем количество вращения электрона в атоме. Это выражается в том, что формулы, по которым значение буквы $s$ (да, равное 1/2) и значение буквы $\ell$ (уж какое случится) определяют силу получающегося магнита, практически одинаковы, но в случае спина там неожиданно появляется лишний множитель 2, усиливающий эффект спина в создании магнита.

В магнитном поле энергия электрона в атоме меняется, причем в зависимости от имеющихся у электрона квантовых чисел: интенсивности вращения $\ell$ и компоненты количества вращения вдоль магнитного поля $m$, а также компоненты спина вдоль магнитного поля (она часто обозначается $sz$). Без магнитного поля состояния с разными $\ell$, $m$ и $sz$ имели одну и ту же энергию, но теперь их энергии различаются. Длина волны света, который излучается или поглощается атомом, определяется разностью энергий в состояниях «до» и «после», и поэтому свет, испускаемый атомами в магнитном поле, несет на себе следы этого магнитного поля, причем очень ясные. Спектральные линии *расщепляются*: вместо одной линии, говорящей об излучении на одной длине волны, в спектре появляется несколько близких линий [229].

Исторически спин электрона был, собственно говоря, *открыт* в попытке разобраться, что за ерунда происходит с расщеплением некоторых линий в магнитном поле: они вели себя не так, как полагалось бы только из-за зависимости энергии от $m$ и (не очень простой) зависимости от $\ell$. Да и сама картина с числами $\ell$ и $m$ в тот момент не получила еще окончательной ясности, хотя многое было уже угадано. И уж конечно, в момент открытия спина электрона глубина всей истории про спиноры никак не осознавалась. Ростки будущего знания пробивали себе дорогу с первой половины 1920-х гг., участники событий двигались на ощупь, проявляя недюжинную наблюдательность и остроту ума.

> О чем забывают историки — да и физики тоже — это что в открытиях в физике очень, очень большую роль играет случай, удача. Конечно, мы не всегда это признаем. Если кто-то богат, он говорит: «Да, я был умным, поэтому я и богат». И то же самое говорят про тех, кто сделал нечто в физике: «Да, действительно умный парень…» Надо, конечно, признать, что есть и такие случаи, как Гайзенберг, Дирак и Эйнштейн, — исключения случаются. Но для большинства из нас удача играет очень важную роль, и об этом не надо забывать.
>
> А все это имеет отношение к делу, потому что, когда я прибыл в Лейден, я в конце концов попал к Эренфесту.

Это воспоминания Гаудсмита — одного из двух первооткрывателей спина электрона. Эренфест, который руководил работой 23-летнего Гаудсмита, занимался не только «теорией спектров», которая выросла в квантовую механику, но и в течение многих лет развивал науку об энтропии, продолжая дело Больцмана, — и в конце концов повторил его судьбу. Он же и придумал слово «спиноры». Насколько я могу судить, Эренфест был в тот период быстрого создания нового знания такой фигурой, что его присутствие и вовлеченность немало способствовали прогрессу. Именно он летом 1925 г. определил Гаудсмита работать совместно с 24-летним Уленбеком, как раз

приехавшим из Рима после некоторого перерыва в занятиях наукой из-за того, что он обучал детей голландского посла в Италии. Несколько северо-восточнее в июле того же года Гайзенберг, спасаясь от сенной лихорадки на острове в Северном море, придумал первую полноценную версию квантовой механики. До появления уравнения Шрёдингера остается примерно полгода; все заняты угадыванием структуры атомов исходя прежде всего из спектров.
Гаудсмит продолжает:

Поскольку [Уленбек] ничего не знал, но так хорошо соображал, он задавал всякие вопросы, которые сам я никогда не формулировал, и из этих совместных усилий по прояснению вещей возникло несколько, как мы теперь понимаем, важных результатов. Одним из первых таких результатов стала новая интерпретация спектра водорода.

Некоторые из линий, наблюдаемых в спектрах в магнитном поле, находились согласно имевшимся представлениям не на месте, а некоторых и вовсе не должно было быть.
Упоминаемые далее Ланде и Пашен фигурируют в рассказе, потому что они были авторитетными источниками знания о спектрах.

Забавно, что поскольку я знал все эти правила для интенсивностей и все такое, я уже додумался до правильных формул. В этом и был мой вклад — в том, что я знал, какие формулы надо брать. Надо было взять классическое выражение и вместо целых квантовых чисел подставить полуцелые квантовые числа и еще кое-что поменять. Это было похоже на волшебство, однако все точно сходилось, и что я, поверите ли, находил особенно восхитительным, так это что «запрещенная» линия, которую наблюдал Пашен, оказалась уже не запрещенной, а естественной спектральной линией, которая должна была присутствовать, и это меня необычайно радовало.
<…> Настал день, когда мне пришлось рассказать Уленбеку про принцип Паули — разумеется, используя при этом мои собственные квантовые числа, а Уленбек сказал мне: «Ну ты же видишь, что отсюда следует? Это значит, что у электрона имеется четвертое квантовое число. Оно выражает то, что у электрона есть вращение, что он вращается». И еще я могу точно вам сказать, где пролегала грань между мной и Уленбеком как физиками. В течение всего того лета, когда я рассказывал Уленбеку о Ланде и Гайзенберге, например, или о Пашене, он спрашивал: «А кто это?» Странно, но он никогда раньше о них не слышал. А когда он сказал: «Это означает четвертую степень свободы», я в ответ спросил его: «А что такое степень свободы?» В любом случае, когда Уленбек высказал свое наблюдение, везение состояло в том, что я знал все эти штуки про спектры…

Гаудсмит и дальше, не без голландской (само)иронии, поддерживает впечатление легкости. Однако не надо забывать, что они предлагали нечто, явным образом противоречившее установленной картине мира. Упоминаемый ниже Лоренц — авторитет из авторитетов за свое глубокое и всестороннее понимание (и вклад в создание) этой картины мира.

Вот и все — получился спин. Так его и открыли, таким вот образом. <…> В строгую физику, стоявшую за всем этим, я глубоко не погружался. Но Уленбек, который был хорошим физиком, начал раздумывать об этом… «Заряд, который вращается?»… Он говорит, что отправился тогда к Лоренцу, а тот сказал: «Да, тут большие сложности, потому что собственная энергия электрона получается тогда неправильной». <…> Мы как раз написали короткую статью на немецком и отдали ее Эренфесту, который хотел послать ее в *Naturwissenschaften*. Тогда, как сейчас рассказывают, Уленбек испугался, пошел к Эренфесту и сказал: «Не отправляйте статью, потому что, весьма вероятно, она неправильная. Всего этого не может быть, электрон не может вращаться с такой высокой скоростью и иметь правильный момент».

### *Конечно, электрон не вращается*

Как же все просто, когда ответ известен; конечно, электрон и не вращается. Но что следовало думать первооткрывателям?

А Эренфест ответил: «Поздно, я ее уже отправил». <…> Я помню, как Эренфест сказал мне: «Знаете, это отличная идея, хотя может оказаться и неправильной. Но у вас еще нет репутации, поэтому вам терять нечего». <…>

Наша заметка была отослана и опубликована. Прямо на следующий день я получил письмо от Гайзенберга, где он пишет про нашу mutige Note (смелую заметку). Я и не знал, что требовалась смелость, чтобы такое опубликовать. Никаким храбрецом я не был. Я думаю, письмо Гайзенберга у меня сохранилось. Он там пишет формулу… Я в ней не понял ну совсем ничего. А потом он где-то спрашивает: «А что вы сделали с множителем 2?» Каким еще множителем?

Ситуация с множителем 2 утряслась через некоторое время уже с участием других людей и привлечением дополнительных идей из специальной теории относительности. В самом начале 1926 г. появилось уравнение Шрёдингера, а весной Паули придумал спиноры для трехмерного пространства. Как мы теперь хорошо знаем, такой спинор — это пара чисел; правила игры таковы, что одно число выражает потенциальную возможность для электрона иметь компоненту спина $1/2\ \hbar$, а другое — компоненту $-1/2\ \hbar$.

В начале 1928 г., когда уравнение Шрёдингера уже работало вовсю и его даже уже «скрестили» со спинорами, Дирак всерьез озадачился проблемой, которой за два года до того не стал заниматься Шрёдингер: его, Шрёдингера, уравнение ничего не знало про скорость света и принцип относительности. Как все-таки можно систематически соединить идеи квантового описания мира с требованиями специальной теории относительности? *Получилось* так, что Дирак решил эту задачу для частиц со спином 1/2, т.е. для электронов. Исходно он и не подозревал о математических тонкостях с одним и двумя полными поворотами, но, как бы то ни было, ему пришлось изобрести спиноры для четырехмерного пространства-времени. Это, как он открыл для себя и для всей физики XX в., четверки чисел, которые, однако, совсем не похожи своим поведением при поворотах в пространстве-времени на «обычные» четверки чисел, связанные с пространством-временем, т.е. векторы. (Внутри математики, как затем оказалось, все идеологическое обеспечение было уже лет пятнадцать как готово, не было только знания, что появившиеся там довольно абстрактные и сами по себе не слишком заметные спиноры — часть реального мира.) Уравнение Дирака, которое его создатель записал как уравнение для электрона, «не хотело» описывать одни только электроны: в комплекте с ними оно буквально навязывало еще какую-то другую частицу с тем же спином 1/2 — «навязывало» в точности из-за того, что спиноры в четырехмерном пространстве-времени имеют *четыре* компоненты, из которых только две требовались для описания электрона, а две другие, определенным образом с ними связанные, должны были описывать что-то еще. После нескольких неудачных попыток объяснения, что это такое, пришлось постулировать существование в природе новой, доселе неизвестной частицы, к тому же являющейся античастицей к электрону — в смысле, который тогда и начал постепенно выясняться. Эта частица, названная позитроном, была обнаружена экспериментально несколько лет спустя [230].

Уравнение Дирака не только знало о спинорах и позитронах (и полностью разрешило ситуацию с «лишним множителем 2»), но и позволило уточнить сдвиг уровней энергии в атоме водорода из-за тонких эффектов, связанных со спином. И тем не менее оно приводило к странным выводам о поведении электрона на очень малых расстояниях порядка $\hbar/(mc)$. Мы уже встречались с этими расстояниями на нашей прогулке, но тогда забежали вперед — спрямив все сложности исторического развития, перепрыгнули к современному пониманию квантового мира в терминах квантовых полей. Отмеченные странности, собственно, и подтолкнули развитие полевого описания. Уравнение Дирака, обобщавшее уравнение Шрёдингера с учетом специальной теории относительности, оказалось только частью более фундаментальной истории про квантовые поля.

*****

**Лишняя половина, и такая разница.** Довольно удивительно, но разделение всех полей и их квантов на бозоны (коллективистов) и фермионы (ненавистников себе подобных) управляется спином, причем вот каким изящным образом: все поля с полуцелыми спинами (1/2, с которым мы встречались; не так уж сложно описать и поле со спином 3/2) — ненавистники, а все поля с целыми спинами (0, 1, 2) — коллективисты. Едва ли где-либо еще столь радикальные качественные различия в свойствах определяются различием на одну вторую в одном числе. Этот факт не просто выражает результат наблюдений, но и скрывает в себе *теорему*. Массовое поведение частиц непосредственно не записано в свойствах их полей, но, опираясь на самые общие положения, которые, как мы считаем, приложимы ко всему во Вселенной, можно *вывести* (доказать), что частицы с целым спином — бозоны, а частицы с полуцелым спином — фермионы. Среди этих общих положений — принцип относительности (собственно, вся специальная теория относительности) и причинность; есть требования и более технические, но тоже необходимые, по нашим представлениям, для осмысленности мира. Поэтому понятия «частицы/поля с целочисленным спином» и «бозоны» (т.е. коллективисты) обычно употребляются как синонимы. Аналогичным образом все привыкли фактически отождествлять понятия «частицы/поля с полуцелым спином» (что есть всего лишь утверждение о спине) и «фермионы» (заявление о нетерпимости к себе подобным). Одно из первых доказательств теоремы о связи двух понятий (спина и статистики) предложил в 1940 г. Паули.

*Спин определяет тип массового поведения*

Нехитрый математический факт состоит в том, что сумма и разность двух полуцелых чисел всегда дают целое число: 1/2 + 1/2 = 1, 1/2 – 1/2 = 0, 3/2 – 1/2 = 0 и т.д. Его проявления в природе неожиданно глубоки: два фермиона *могут* собраться в бозон, а создав бозон, в корне изменить характер своего поведения (такое явление лежит в основе эффекта квантовой природы, но макроскопического масштаба — сверхпроводимости). Но сделать фермион, имея только бозоны, уже невозможно. Ситуация до некоторой степени сродни тому факту, что из двух отрицательных чисел можно сделать положительное, перемножив их, но перемножение положительных чисел дает только положительные. Фермионы — явление более «тонкое», чем бозоны, недаром один полный поворот не оставляет их в прежнем состоянии.

*****

**Про что же уравнение?** Уравнение Шрёдингера установило главное: связанные системы, т.е. системы с «пойманным», пространственно ограниченным движением, могут существовать лишь в довольно исключительных случаях, прежде всего — при строго определенных значениях энергии. Но что именно подчиняется уравнению Шрёдингера?

## Добавления к прогулке 10

**Резерфорд и его опыт.** Родившийся в Новой Зеландии Резерфорд в 1899–1900 гг. работал в Монреале, где и открыл «альфа-лучи» как одно из проявлений радиоактивности; ему также удалось измерить их заряд в отношении к их массе, откуда напрашивался вывод, что альфа-частицы — это ионы гелия. Опытами по пробиванию альфа-частицами золотой фольги он руководил уже в Манчестере (1908–1913). Как раз заканчивалась эпоха массового увлечения «икс-лучами» (открыты Рентгеном в 1895 г.), радиоактивностью (открыта Беккерелем в 1896 г.) и опиоидами (до 1910 г. героин позиционировали как средство от кашля у детей).

Вскоре после опытов Резерфорда выяснился и смысл атомного номера — порядкового номера элемента в Периодической таблице (см. рис. 10.11): он оказался в точности зарядом ядра. Поучительный нюанс, напоминающий, в какой гуще незнания часто действовали те, кто закладывал основу дальнейшего знания: сам Резерфорд *не* сделал такого вывода. Зато в 1917 г. он установил, что ядро атома водорода присутствует в ядрах других атомов; поскольку ядро атома водорода — это один протон, тем самым был открыт протон как составляющая часть атомных ядер.

«Опыт Резерфорда» на другом уровне и в другом исполнении — но тоже с использованием движения для изучения структуры — сыграл большую роль в понимании природы материи и спустя полвека. В начале 1960-х гг. похожим образом удалось «потыкать» внутри протона — что означало уменьшение масштаба еще на три порядка (в тысячу раз) по сравнению с размером атомного ядра, которое Резерфорд обнаружил как крохотную часть атома. На этот раз в качестве «иглы» использовались электроны. Делу помогало отсутствие какой-либо внутренней структуры у самих электронов, из-за чего характер их разлетания после столкновения с протонами целиком определялся именно содержимым протонов. В протонах в результате обнаружились крайне малые (снова!) точечные центры. Занятным образом незадолго перед тем ожидалось нечто противоположное: что внутренность протона представляет собой что-то вроде упругой струны, т.е. что энергия распределена там относительно равномерно («как в атоме Томсона», если довести эту историческую параллель до предела). Сейчас мы гораздо больше знаем о том, как протон собран из трех кварков (см. Приложение В). Последний из уже построенных инструментов для организации движения в тонкую «иглу» показан на рис. 5.6; следующий обсуждаемый шаг — найти финансирование, которое позволит обеспечить еще более быстрое и точное движение. Это, в общем, единственный способ прощупывания структуры мира «там внутри».

**Ленивое горение Солнца.** В центре Солнца один протон ждет слияния с другим в среднем около $10^{11}$ (ста миллиардов) лет. Это, конечно, больше возраста Вселенной, но всего в семь раз; и это *среднее* время ожидания, тогда как с некоторыми протонами такое редкое событие случается намного раньше — из-за чего Солнце, с одной стороны, *все-таки* горит, а с другой стороны, растягивает удовольствие надолго. «Увеличенное время ожидания» возникает из-за того, что и после туннелирования сквозь барьер взаимного отталкивания не наступает идиллия единения протонов: там неожиданно подводит ядерное взаимодействие. Оно устроено довольно сложно и зависит от ориентации спинов двух участвующих частиц (а спин протона, как и нейтрона, равен 1/2); шанс ухватиться друг за друга покрепче есть только в случае, когда компонента спина у обеих частиц направлена в одну и ту же сторону (это один из двух возможных вариантов для спина 1/2; другой вариант — противоположные направления). Однако соединению протонов с одинаково направленными компонентами спинов мешает их нетерпимость к себе подобным: они не сходятся вместе из-за принципа запрета Паули. Запрет, правда, не действует, если компоненты спинов направлены в противоположные стороны, но *тогда* ядерное взаимодействие оказывается недостаточно сильным! В результате два протона не могут удерживаться вместе сколько-нибудь заметное время. Из-за этого, несмотря на (и так довольно скромные) успехи в деле прохождения сквозь стену, в большинстве случаев никакого слияния не получается и протоны снова разлетаются в стороны. Но *иногда* (случайным образом) один из протонов превращается в нейтрон как раз в течение крайне короткого времени, пока два протона находятся по одну сторону стенки; точнее, вместо протона возникают нейтрон, позитрон и нейтрино — превращение, возможное из-за наличия *другого* взаимодействия, так называемого слабого ядерного. Вот тогда ситуация на Солнце идет на поправку, потому что никакой принцип Паули не может помешать ядерным силам соединить протон и нейтрон. В результате два особо удачливых протона выбирают жизненный путь

протон + протон ⟶ дейтрон + позитрон + нейтрино.

Главное здесь — дейтрон, относительно прочная конструкция из протона и нейтрона, а все остальное можно воспринимать как накладные расходы. После еще двух этапов превращений два дейтрона наконец соединяются в альфа-частицу, испуская при этом фотон (т.е. свет) [231].

Таким образом (задействуя заодно еще некоторые процессы) Солнце и множество других водородно-гелиевых звезд все-таки светят (Солнце — в течение последних 4,6 млрд лет), хотя и делают это довольно «неохотно», я бы даже сказал «едва-едва»: в одном килограмме Солнца за секунду выделяется примерно столько же энергии, сколько в одном килограмме *преющих листьев*. Обычные звезды берут не «качеством», а массой (то ли дело сверхновые!).

*Солнце горит очень неохотно*

**Туннелирование из атомных ядер.** Радиоактивный альфа-распад — результат туннелирования, т.е. преодоления классического запрета на движение. От «солидности» стен, ограничивающих энергетическую яму, зависит вероятность распада в единицу времени. Вместо нее, впрочем, оказывается удобнее говорить об отрезке времени, в течение которого вероятность распада достигает 50%; в скоплении одинаковых ядер за это время распадется примерно половина, и это время называется периодом полураспада. Для различных радиоактивных ядер периоды полураспада лежат в интервале от миллиардов лет до крошечных долей секунды. Через время, вдвое большее периода полураспада, распадется половина из еще не распавшихся и останется четверть от исходных атомов [232]. Через время, равное десяти периодам полураспада, лишь около одной тысячной исходных атомов сохранится в неизменном виде. Но любое отдельное атомное ядро не имеет никаких обязательств распасться раньше или позже. Например, полоний-218 превращается в свинец-214 с периодом полураспада 3,1 мин; при этом любой выбранный атом полония может распасться через секунду или через четверть часа, и это непредсказуемо. Даже если перед вами два атома полония-218, один из которых вы создали только что, а другой кто-то принес вам в подарок перед обедом и он еще не распался, у этого подаренного нет никаких преимуществ в распаде: неизвестно, который из них распадется раньше. Радиоактивный атом не стареет, т.е. не увеличивает свою склонность к радиоактивному превращению с течением времени. (Все ядра с одним и тем же числом протонов и одним и тем же числом нейтронов одинаковы; графа «возраст» там просто не предусмотрена.) И тем не менее взятые в достаточном количестве атомы полония-218 уполовиниваются в своем числе каждые 3,1 мин. Доля атомов, которые останутся через четыре часа, равна $4{,}9 \times 10^{-24}$; это означает, что от характерного макроскопического количества — уже встречавшегося нам числа атомов порядка $10^{23}$ — не останется ничего. Совсем иная картина с другим изотопом того же элемента, полонием-210: период его полураспада составляет 140 дней.

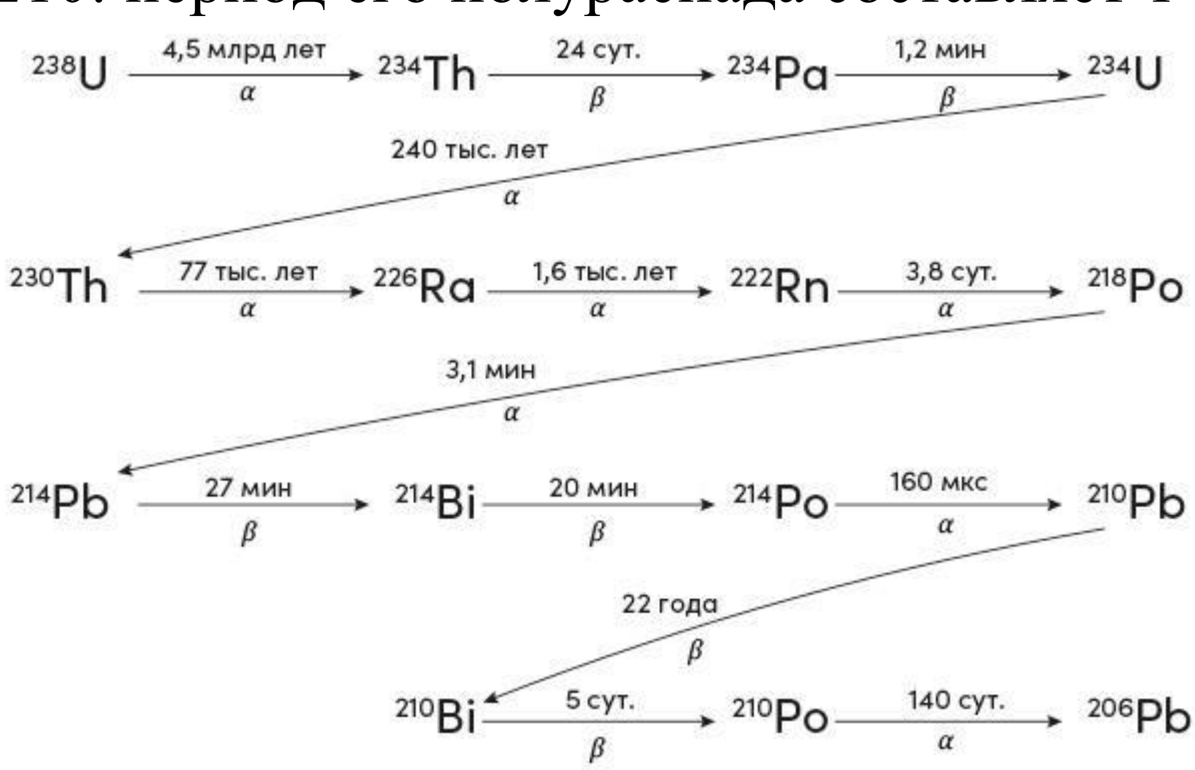



**Рис. 10.16.** Радиоактивный распад урана-238. Участвующие элементы: уран U (вовлечены два его изотопа), торий Th (два изотопа), протактиний Pa, радий Ra, радон Rn, полоний Po (три изотопа), свинец Pb (три изотопа, один из которых стабильный) и висмут Bi (два изотопа). Подписи над и под стрелками указывают период полураспада и тип радиоактивного

распада. Сокращение «мкс» обозначает микросекунды (миллионные доли секунды)

На рис. 10.16 приведена цепочка ядерных превращений, начинающаяся с довольно стабильного (но все же не абсолютно стабильного) изотопа урана и включающая восемь эпизодов туннелирования. Указанные над стрелками периоды полураспада (как видно, очень различные) позволяют судить о сравнительной «надежности» стен для разных ядер. Число слева вверху около каждого символа элемента показывает суммарное количество протонов и нейтронов в ядре; на жаргоне оно называется атомной массой. Каждый альфа-распад — стрелка с буквой α — это туннелирование одной альфа-частицы; при этом, разумеется, атомная масса уменьшается на 4 (например, 238→234). Буквой β обозначены превращения другого вида, вызванные тем, что один из нейтронов в ядре превращается в протон (испуская электрон и антинейтрино, которые покидают ядро; агентом радиоактивности в данном случае являются электроны; здесь нет эффекта прохождения сквозь стену). Свинец, появляющийся в конце цепочки, разумеется, всем известный в быту элемент, но едва ли многие с ходу скажут, что его стабильный изотоп имеет атомную массу 206; в сравнении с этим начальное звено цепочки, уран-238, пожалуй, в большей степени на слуху [233].

**Периодическая таблица элементов.** Основа разнообразия химических свойств элементов — дискретные значения возможной энергии электронов в атоме *и принцип запрета Паули*, который не позволяет электронам, несмотря на притяжение к ядру, накапливаться в состоянии с минимальной энергией, а вынуждает их занимать состояния со все большей энергией. Состояние с минимальной энергией, как мы помним, идет первым в списке разрешенных энергий под номером $n = 1$, а тогда числа, связанные с количеством вращения, с необходимостью равны нулю: $\ell = 0$ и $m = 0$. В запасе у электрона имеется четвертое квантовое число: компонента спина вдоль какого-то направления. Возможностей здесь две: +1/2 ħ и –1/2 ħ. Про

них для краткости говорят «спин вверх» (↑) и «спин вниз» (↓); ничего специального в направлении вверх-вниз нет, но можно, конечно, и выбрать именно его;
электрону *совершенно* все равно. Значит, при минимальной энергии в атоме есть две возможности для электрона: состояние ($n$ = 1, $\ell$ = 0, $m$ = 0, ↑) или состояние ($n$ = 1, $\ell$ = 0, $m$ = 0, ↓). Когда в ядре один-единственный протон, в атоме может поселиться, выбрав одну из этих возможностей, только один электрон — что дает атом водорода. Если в ядре два протона, то появятся два электрона, которые используют обе указанные возможности для расселения, образуя атом гелия. Эти две возможности и исчерпывают первый период Периодической таблицы.

При большем заряде ядра к нему притягиваются дополнительные электроны, которым из-за принципа запрета Паули приходится устраиваться в состояниях со второй по счету энергией, $n$ = 2. Там, конечно, есть состояние с нулевым количеством вращения $\ell$ = 0 (то, что химики обозначают буквой s); но из-за наличия спина электрона оно опять превращается в две возможности для электронов: ($n$ = 2, $\ell$ = 0, $m$ = 0, ↑) и ($n$ = 2, $\ell$ = 0, $m$ = 0, ↓). Когда использована только одна возможность (поселился один электрон), мы имеем литий, когда обе (два электрона) — бериллий. Но при $n$ = 2 разрешены еще состояния с ненулевым количеством вращения — с интенсивностью вращения, определяемой числом $\ell$ = 1 (буква p у химиков). Этим открываются три возможности для значения буквы $m$: это –1, 0 и 1 (см. рис. 10.9). Из-за спина число возможностей надо снова умножить на два. Возникающие варианты позволяют расселить электроны в количестве от одного до шести. Последовательно получаем бор, углерод, азот, кислород, фтор и неон. Это второй период Периодической таблицы.

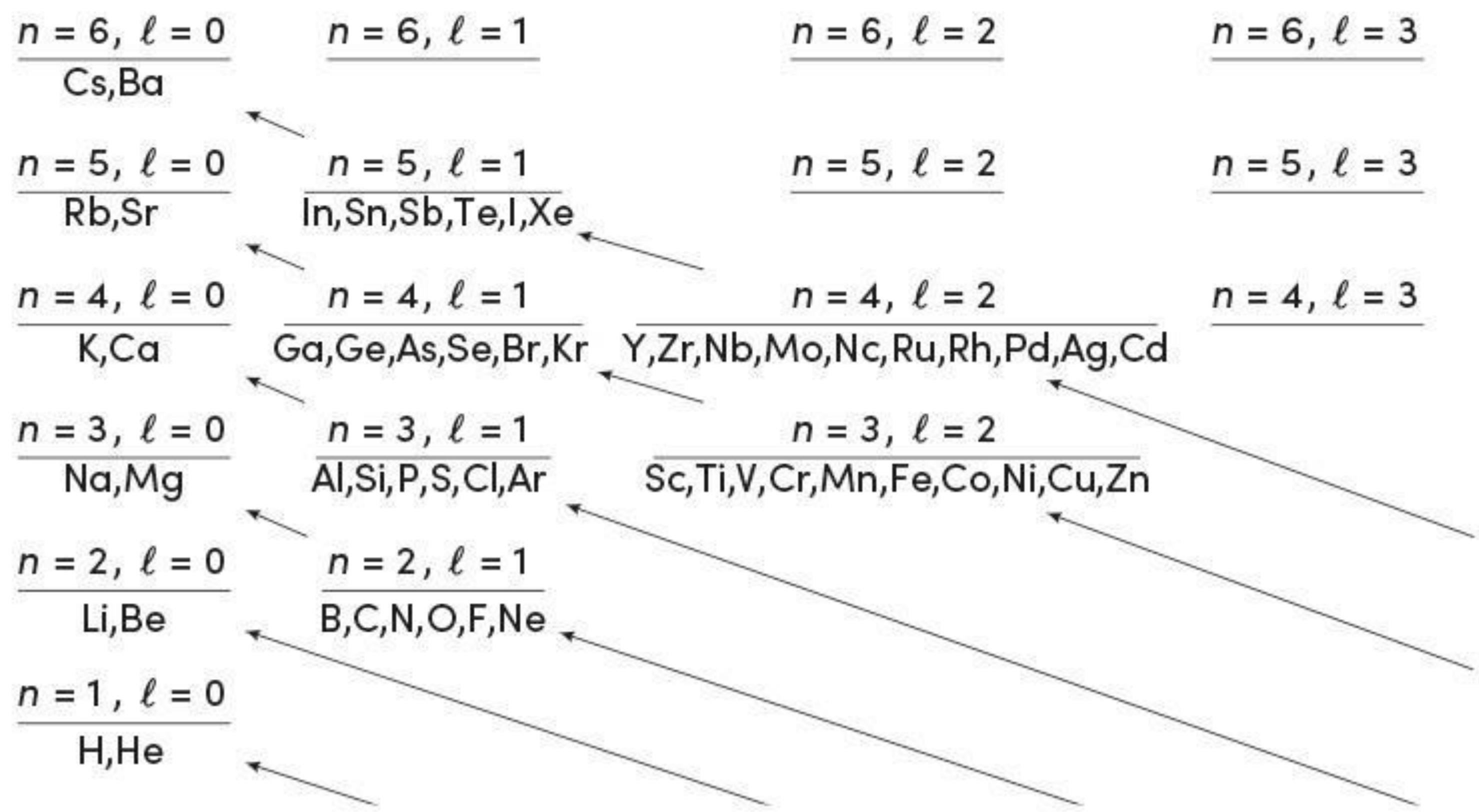



**Рис. 10.17.** Порядок заполнения состояний электронами в атомах. Из-за влияния электронов друг на друга в этой схеме имеются «сбои», когда атом элемента имеет на один электрон в состоянии с$\ell$= 0 меньше, чем ожидалось, и, соответственно, на один электрон в состоянии с$\ell$= 2 больше. Половину таких случаев составляют Cr, Cu, Nb, Mo, Ru, Rh, Pd, Ag, Pt и Au, причем в случае палладия Pd в таком нарушении участвуют даже два электрона

Что происходит дальше, видно из рис. 10.17; это, по существу, рис. 10.9, но с указанием элементов (часть из них я опустил, чтобы не перегружать рисунок, но пустые клетки несложно заполнить, глядя в Периодическую таблицу). Стрелки управляют порядком заполнения состояний: начинать надо с того, куда указывает левая нижняя стрелка, а затем переходить к следующей стрелке справа или выше (из-за влияния электронов друг на друга в этой схеме имеется 20 нарушений).

**Спин, Паули и другие молодые люди.** Гаудсмит говорит о везении, которое в открытиях совсем не лишнее. Везет, разумеется, не всем. За полгода до тех летних месяцев 1925 г., когда Эренфест заставил разговаривать двух молодых людей с дополняющими друг друга знаниями и умениями, — в январе того же года — *двадцати*летний Крониг, обучавшийся до того в США, приехал в немецкий Тюбинген, чтобы поучиться у работавших там признанных лидеров, к числу которых относился и уже упоминавшийся Ланде. Сразу по прибытии Кронига Ланде показал ему только что полученное от Паули письмо с обсуждением идеи четвертого квантового числа, которое необходимо приписать электрону для объяснения спектров. Паули писал даже, что это новое квантовое число должно принимать только два значения. Крониг необычайно воодушевился и тем же вечером изобрел концепцию спина электрона. Картина включала (а как можно было обойтись без этого?) представление о вращающемся электроне. Часть спектров Кронигу удалось объяснить на основе этих идей (с включением в схему того самого множителя 2), но в части явлений его теория давала ровно вдвое большее предсказание, чем наблюдалось в экспериментах. Крониг, однако, не падал духом, тем более что на следующий день ожидался приезд самого Паули. Тот действительно приехал. Идеи Кронига показались ему остроумными, но не имеющими отношения к реальности по двум причинам: чехарды с множителем 2 и той проблемы, что по всем мыслимым оценкам поверхность вращающегося электрона обладала бы скоростью во много — в сотни — раз больше скорости света [234]. Через несколько недель Крониг добрался до Бора и Гайзенберга в Копенгагене; оставались считаные месяцы до открытия Гайзенбергом первой полностью рабочей версии квантовой механики [235]. Бор и Гайзенберг встретили идеи Кронига прохладно, выдвинув примерно те же возражения, что и Паули. Разочарованный Крониг оставил свою теорию спина. Когда в ноябре вышла та самая статья Уленбека и Гаудсмита, которую Эренфест не стал отзывать из печати, Гайзенберг и Бор задумались о спине всерьез. В самом начале следующего, 1926 года появилось уравнение Шрёдингера (вторая полностью рабочая версия квантовой механики), а в феврале Томас (23 года), приехавший в Копенгаген из Лондона на имевшийся у него грант для путешествий, придумал, как применить специальную теорию относительности, чтобы поправить дело с множителем 2. Только после этого, в марте 1926-го, Паули признал идею спина — через 14 месяцев после неприятия идей Кронига. Гаудсмит и здесь прекрасен: в связи с юбилеем научной деятельности Лоренца, продолжает он,

…Бор, Эйнштейн и многие другие великие ученые съехались в Лейден. Бор к тому времени уже видел нашу заметку и проявил большой интерес. Каждый день мы встречались — у нас были посиделки с Бором, Эйнштейном и Эренфестом дома у Эренфеста по проблеме спина и всего прочего. Там мы много всего узнали. <…> Когда Бор и Эйнштейн разговаривали друг с другом у Эренфестов, я не понимал ни слова.

## *У электрона нет поверхности*

Настоящая эпоха Sturm und Drang в изучении устройства материи!

Как бы то ни было, Бор совершил одну ошибку. Вместо Уленбека он пригласил в Копенгаген меня, чтобы посмотреть, смогу ли я там что-нибудь выучить. Из этого, разумеется, ничего не получилось, и через шесть недель он вручил мне билет первого класса на поезд обратно в Гаагу. Но в Копенгагене был молодой человек, Томас, который глубоко знал теорию относительности. Пока я еще был там, он разобрался с этим гайзенберговым множителем 2 … и все оказалось в порядке.

А вот кто никак не желал признавать спин, так это Паули. Бор тогда сказал: «По дороге домой сделайте остановку в Гамбурге и объясните Паули про множитель 2». Я попробовал так и сделать, но, поскольку сам я этого по-настоящему не понимал, я, естественно, не смог ничего объяснить Паули. <…> Когда я вернулся, Эйнштейн все еще был в Лейдене, и мне пришлось объяснять и ему тоже, что вышло даже еще хуже. У меня ничего не получилось; но позже мне пришла открытка от Паули, что он прочел работу Томаса и теперь в нее верит.

В течение года после этого не кто иной, как Паули, разработал теорию спиноров для трехмерного пространства (сейчас всех учат фигурирующим там матрицам Паули); спиноры удалось внедрить в уравнение Шрёдингера, и теория спина электрона получила достаточно солидную основу, хотя все еще соединяла различные понятия несколько эклектически. Более последовательный и более точный взгляд на вещи возник после того, как в начале 1928 г. появилось уравнение 25-летнего на тот момент Дирака.

Как мне кажется, возражения людей, внесших определяющий вклад в создание квантовой механики, против попыток ввести спин электрона были не в последнюю очередь вызваны их общим настроем на то, чтобы отвергать всякую наглядность как часть объяснения, потому что наглядность уже столько раз заводила в тупик; первые же представления о спине так или иначе были связаны с вращающимся электроном. Квантовую механику удалось создать, отбросив все «очевидные» соображения. В конце концов она включила в свой формализм и спин, но только не как вращение, а как нечто, связанное со спинорами.

## Признания и литературные комментарии

Принцип неопределенности в качестве фундаментального высказывания об устройстве мира вообще-то требует пояснений относительно того, *в каком смысле неопределенность*. Этот не самый простой вопрос имеет разнообразные аспекты, которые время от времени обсуждаются и поныне; я позволил себе обойтись интуитивным пониманием неопределенности. Говоря, что спиноры — это наборы, состоящие из указанного количества чисел, я обошел молчанием тот факт, что это комплексные числа. Обозначение $\hbar$, появившееся в книге [11], не сопровождалось там пояснениями; Дирак вообще не отличался склонностью к пространным рассуждениям. Из-за этого, в частности, его «Воспоминания о необычайной эпохе» [12] читаются без лишних эмоций, но зато точно передают размышления автора о пути, приведшем его к фундаментально важным достижениям.

Книга Пономарева [22] — настоящая энциклопедия полезных сведений об истории квантовой механики, а также о ее приложениях к описанию конкретных систем. Кроме этого, мне кажутся ценными и мысли автора о науке, продвигающейся вперед в условиях потери наглядности. Я дорожу экземпляром четвертого, дополненного издания этой книги, подаренным мне автором. (Неоспоримых достоинств книги не умаляют спорадические неточности в отношении персоналий.) Взгляд на квантовые свойства, представленный на этой и следующей прогулках, как мне кажется, имеет лишь небольшое пересечение с (значительно более полным и разнообразным) изложением Пономарева. Его книгу можно читать и выборочно, например интересуясь только историей и биографическими подробностями, которым он уделяет немалое внимание. Я же, наоборот, не смог упомянуть множество ученых; среди очевидных поводов для сожаления — Джордж (Георгий Антонович) Гамов. Он первым всерьез занялся вопросом о том, что происходило с материей, когда Вселенная начала расширяться по Фридману; он же понял, что альфа-распад атомных ядер управляется туннельным эффектом и что тот же эффект работает в звездах. Это далеко не все, но я вынужден остановиться. Роль квантовых эффектов в эволюции Вселенной затрагивается также в книге [36].

Изображение Солнца, приведенное на рис. 10.4, сделано NASA's Solar Dynamics Observatory https://sdo.gsfc.nasa.gov/. Некоторые подробности, включая исторические, по поводу эффекта Казимира собраны в [67], а его собственные воспоминания включены в [53]. Детали истории открытия спина частично взяты из работы [60]. Воспоминания Гаудсмита [75] — перевод с голландского (в моем переводе с английского) его устного выступления на торжественном собрании Голландского физического общества в 1971 г. Там много других восхитительных подробностей, для которых, увы, здесь совсем не осталось места. Эренфест — член-корреспондент Академии наук СССР с 1924 г. Его жена, урожденная Афанасьева, преподавала математику на Высших женских курсах в Санкт-Петербурге. Осенью 1907 г. пара переехала в Санкт-Петербург, где они прожили пять лет; в 1912-м по приглашению Лоренца Эренфест получил работу в Лейдене.

…несомненно, что Россия могла бы стать моей родиной в самом глубоком значении этого слова, если бы я получил здесь постоянную преподавательскую работу где бы то ни было. Несмотря на мое недостаточное владение языком, я не ощущаю себя чужим в кругу здешних людей (исключая политических чиновников).

Из письма Эренфеста Лоренцу, 1912 г.

И я говорю «Гайзенберг», а не «Гейзенберг» или «Хайзенберг», следуя старой физической традиции.

## Движение на прогулке 10

Движение постоянно присутствует в квантовом «околоатомном» и субатомном мире, поскольку части этого мира обмениваются энергией и количеством движения. Но происходящее там лишено наглядности, на которой основаны наши обычные представления о движении. Визуальной картины нет: нельзя говорить о траектории в пространстве, нельзя определить ось вращения. Законы этого непредставимого движения в ряде случаев оказываются необычайно жесткими: движение, «пойманное» в пределах ограниченной области в пространстве, оказывается возможным только при дискретных значениях энергии. Из-за этого простым составным системам доступны лишь дискретные возможности их устройства; сборка атомов и молекул из заданного числа деталей оказывается возможной в единственном или почти единственном варианте. В результате мир на фундаментальном уровне построен не из плавно переходящих друг в друга неконтролируемых образований, а из ограниченного числа одинаковых частей с дискретно меняющимися свойствами. При этом наименьшее возможное значение энергии определяет основное состояние связанных систем, из которого нельзя забрать энергию движения, не разрушив систему. Покой невозможен даже в колебательных системах — там нельзя полностью выключить колебания.

В состояниях с определенной энергией объекты не имеют свойства занимать определенное положение в пространстве в определенный момент времени. Отсутствие локализации в ряде случаев приводит к туннелированию сквозь стены — преодолению областей, движение в которых запрещено в соответствии с классическими представлениями. Квантовое преодоление таких запретов происходит случайным образом, и лучшее возможное описание этих процессов — вероятностное.

Преемственность с привычной нам картиной движения поддерживают универсальные атрибуты движения, такие как энергия, количество движения и количество вращения. Однако в квантовом мире обращение с ними требует аккуратности. Не все эти величины определены одновременно для одного объекта, а те, которые определены, часто ограничены сериями значений, которыми управляют наборы целых чисел. Элементарные частицы, являющиеся бесструктурными образованиями, несут еще более абстрактные атрибуты «внутреннего» (спинового) количества вращения. На самом фундаментальном уровне квантовых полей передача энергии и количества движения от одних квантов полей к другим осуществляется в актах обмена виртуальными частицами.

При этом движение остается связующим звеном между привычным нам макроскопическим восприятием мира и тем, что происходит в субатомном мире: мы используем движение, которым можем управлять и результаты которого можем наблюдать, для «прощупывания» структуры мира на сверхмалых масштабах.

## Прогулка 11

# В поисках утраченного движения

**Маршрут:** *От величины к высказыванию. — Как же о них думать. — Урок демократии. — Дискретное и непрерывное. Уединение и вдохновение. — Движение и энергия на вершине абстракций. — Уравнение Шрёдингера. — Волновая функция в поисках реальности. — Правило Борна. — Главная тайна квантовой механики. — Реальны все! — Часть и целое. — Ловушка Белла. — Основные подозреваемые. — Лоцманы спасают реализм. — Вспышки в пустоте. — Реализм по выбору. — Ускользающая реальность.*

**Главный герой:** *пси-функция*

---

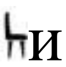
**От величины к высказыванию.** Уравнение Шрёдингера — главное уравнение квантовой механики — призвано ответить на вопрос, что будет, если известно, что имеет место сейчас. В этом качестве оно заменяет собой уравнения движения, но, как оказалось, требует существенных уточнений в понимании того, что значит «имеет место» (а отчасти и того, что значит «будет»). Вообще-то способность делать предсказания на основе подходящих уравнений и начальных условий мы обычно и принимаем за исчерпывающее понимание природы вещей. При этом, как правило, подразумевается нечто «совершенно очевидное»: описываемые явления происходят в пространстве, причем происходят с объектами, которые существуют во всей своей полноте и «сами по себе». В этой картине достаточно малые тела *находятся* в определенных точках пространства и *обладают* определенными скоростями и другими присущими им свойствами, которые все, вместе взятые, и определяют состояние каждого тела. Но уравнение Шрёдингера ни с чем таким дела иметь не собирается. Оно вообще оперирует абстракциями такого уровня, который до сих пор нам не встречался. С ними пришлось примириться под давлением обстоятельств — ради того, чтобы описать происходящее с атомами, электронами и т.д. Среди этих абстракций можно искать фрагменты наших обычных представлений о движении и даже некоторые находить, но в целом в квантовой *механике* осталось не так много «механического» в привычном смысле. Сложности, дающие о себе знать практически сразу, вызваны попарной враждой среди величин, которые вроде бы необходимы для описания мира (для описания каждого его состояния), но которые не могут одновременно принимать числовые значения. А как можно предсказывать будущее поведение, если разрешается говорить *или* о положении, *или* о количестве движения? Из-за попарной вражды оказывается, что *не* враждующих между собой величин — половина от общего числа, поэтому дело выглядит так, как будто мы остаемся с каким-то ущербным, заведомо неполноценным описанием природы. Как вообще описывать мир, когда из переменных, которые *должны бы* его описывать, про половину предлагается забыть?

Чтобы разрешить эту «загадку половины», надо было, как оказалось, не пробиваться напролом, что невозможно, а выбрать обходную дорогу. Она довольно необычна. Да, в наших руках одновременно может находиться только «половина мира» — половина от привычного набора величин. Но с этими величинами происходит довольно беспрецедентная метаморфоза; я не перестаю удивляться, как до этого вообще удалось додуматься.

### *Потребляйте абстракции ответственно*

*Предупреждение*. На этой прогулке встречаются абстракции в количестве, в несколько раз превышающем естественный фон. Проявляйте осторожность, если вы обладаете повышенной чувствительностью к абстракциям [236].

«Метаморфоза» случается вот каким образом. Вместо координат надо рассматривать нечто, что я некоторое время буду называть *высказываниями* о координатах. А когда дело дойдет до количества движения, мы будем иметь дело с высказываниями о количестве движения. Слово «высказывание» очень условно, ни в коей мере не является общеупотребительным, да и сам я от него откажусь в подходящий момент, но сейчас оно нужно мне как метафора: если «вещи» — это нечто конкретное, то «высказывания» — абстрактное. Из-за того что слово будет использоваться в придуманном мною значении, следовало бы каждый раз писать его в кавычках, но я не буду слишком строго за этим следить [237].

Высказывание о какой-либо вещи — это определенно *не* сама вещь, в том числе и потому, что с высказыванием можно делать намного больше всякого разного, включая и то, что в применении к самой вещи невозможно или бессмысленно. Обычное, настоящее высказывание можно передать по телефону; поставить в ряд с другими высказываниями по признаку, который в самой вещи не содержится (например, все, что начинается на букву Ф); скопировать неограниченное число раз и т.д. Есть очевидные различия между  и словом «стол»: да, вокруг  можно расставить несколько  и совершить с ним еще немалое количество действий, но слово «стол» может фигурировать в неограниченном числе *предложений* самого разного рода, соединяясь там, при соблюдении правил грамматики, с любыми другими словами — например, с теми, которые выражают несуществующие понятия. Слово «стол» может рифмоваться с другими словами — возможность, которой вещи лишены начисто. В русском языке слово «стол» может склоняться, приобретая разные окончания. Сам по себе  ничего про это не знает. С «высказываниями» в кавычках тоже можно делать то, что бессмысленно делать с «вещами», — применять к ним арифметические операции.

Роль «вещей» для нас будут играть координаты или любые другие величины, относящиеся к какому-либо объекту или системе; если при этом мы берем набор из нескольких величин, то требуется, чтобы они не враждовали между собой. Для определенности продолжим говорить о координатах. Конечно, я *помню*, что координаты — это вообще-то числа, а не «вещи». Тем не менее три координаты определяют *точку в пространстве* — тоже, конечно, не совсем «вещь», но я прошу сделать шаг мне навстречу: эта точка «живет здесь», в нашем физическом пространстве. Да, понятие математической точки включает в себя некоторую степень абстракции, но это ничто по сравнению с уровнем абстракции, который нам сейчас предстоит, поэтому точки и числа, выражающие привычные свойства и отношения, остаются для нас на стороне вещей.

Для «высказываний» понадобятся обозначения.

«Высказывание» о координате $q$ обозначается как $|q\rangle$. Обозначение это придумал Дирак, примерно одновременно с перечеркиванием в букве $\hbar$; и то и другое оказалось очень популярным. Если речь идет об одном электроне в трехмерном пространстве, то буква $q$ выражает тройку чисел — значения трех координат, о которых удобно думать как о точке в пространстве. Тогда «высказывание» $|q\rangle$ передает (очень нестрого! уточнения впереди) идею присутствия электрона в точке $q$. [238]

И вот ключевой момент: что такое «высказывания», определяется тем, что с ними можно делать. Нельзя сказать, «чем они являются» в каких-то обыденных терминах, потому что это не привычные вещи, а абстракции; но с ними можно выполнять два основных действия.

1. Два «высказывания» $|r\rangle$ и $|s\rangle$ можно сложить. Получится снова некоторое «высказывание» $|r\rangle + |s\rangle$.

Как правило, *r* и *s* — «вещи», т.е. какие-то свойства наблюдаемого мира — выражаются числами, но нам встретятся и обобщенные результаты наблюдений, как, например, «пролетел сверху» или «пролетел снизу» — скажем, про электрон. Складываются при этом не свойства, а именно «высказывания» о них. Чтобы не перегружать изложение в этот ответственный момент, будем пока считать, что *r* и *s* — «вещи» одной природы, скажем различные возможные исходы какого-нибудь наблюдения. *Если бы* одним из наблюдаемых в квантовом мире свойств был цвет, то мы могли бы иметь дело с «вещами» типа «красный», «желтый» и «черный», а им отвечали бы абстракции $|\text{красный}\rangle$, $|\text{желтый}\rangle$ и $|\text{черный}\rangle$, с несколько странной возможностью образовать из них $|\text{красный}\rangle + |\text{желтый}\rangle + |\text{черный}\rangle$, и это *не* имело бы отношения к смешению цветов (разрешив складывать два, мы немедленно получаем возможность складывать произвольное число слагаемых).

Со знаком плюс надо просто примириться как со способом соединения высказываний. Возможность такого соединения — одно из главных свойств квантовой механики, и стоящая за ним идея — немного забегая вперед — довольно многообещающая: если высказывание $|q_1\rangle$ выражает идею присутствия электрона в точке $q_1$, а высказывание $|q_2\rangle$ — идею его присутствия в точке $q_2$, то высказывание $|q_1\rangle + |q_2\rangle$ выражает идею пребывания электрона не в одной-единственной точке [239]. Это высказывание про электрон, у которого *нет* однозначно определенного положения. При этом сами $q_1$ и $q_2$ — чем бы они ни были, указаниями «пролетел сверху/снизу» или числами, — никогда не складываются. Здесь есть психологическая сложность, которую стоит осознать, чтобы избежать путаницы. Если, например, речь идет о двух координатах, то коль скоро координаты — это какие-то числа, их *можно*, конечно, сложить друг с другом. Но в этом нет никакого смысла, если мы интересуемся тем, где что-нибудь расположено: например, если вы знаете, что нечто можно наблюдать или в точке с координатой $x_1 = 2$ см, или в точке с координатой $x_2 = 5$ см, то говорить о точке с координатой $x_1 + x_2 = 7$ см довольно бессмысленно, эти 7 см не определяют положение чего бы то ни было. При сложении же «высказываний» $|x_1\rangle + |x_2\rangle$ никакие 7 см не появляются, числа внутри значков $|\ \rangle$ защищены этими значками и сами по себе в арифметические действия не вступают.

*Не следует складывать числа*

Мы на пути к главным чудесам квантовой механики! Вот что можно заметить уже сейчас: «высказываний» оказывается намного больше, чем «вещей», с которых мы начали. Про огромное число «высказываний» — таких как $|q_1\rangle + |q_2\rangle + |q_3\rangle$ — нелегко сказать, какой одной «вещи» высказывание соответствует. Тем не менее в «пространстве высказываний» имеется полная демократия: все они существуют там на равных правах вне зависимости от того, нашли или не нашли мы одну «вещь», отвечающую данному высказыванию. Это не лишено странности, но, как мы совсем скоро увидим, в этом и состоит способ преодоления вражды при описании мира. Сначала, однако, надо закончить с действиями над высказываниями. Сложение — это только одно из двух действий.

2. Любое «высказывание» $|r\rangle$ можно умножить на любое число $a$. Получится снова некоторое «высказывание» $a \cdot |r\rangle$.

«Высказывание» $a \cdot |r\rangle$ не имеет *никакого* отношения к попытке умножить на $a$ саму величину $r$ (координату, компоненту количества движения, энергию или еще что-то в этом роде); в рамках нашей не квантово-механической, но красочной иллюстрации $5 \cdot |\text{желтый}\rangle$ *не* означает «в пять раз более желтый». Но возможность еще и умножения наряду со сложением показывает, подвох какого выдающегося масштаба здесь намечается. Сумма $5 \cdot |\text{желтый}\rangle + |\text{синий}\rangle$ выражает существенно больший шанс встретить желтый, чем синий, а если, отбросив аналогии, мы всерьез говорим об электроне и $q_1$, $q_2$, $q_3$ — точки, то высказывание $10 \cdot |q_1\rangle + |q_2\rangle + 0{,}1 \cdot |q_3\rangle$ выражает идею предпочтительного присутствия электрона в точке $q_1$ и подавленного присутствия в точке $q_3$; при этом я не отказываюсь от своих слов, что он не находится ни в одной конкретной точке [240].

Я слышу все более настойчивый вопрос: *но что же такое* эти $|\ \rangle$ «высказывания»? Я не пытаюсь его игнорировать, просто отвечать особенно нечего. Можно еще раз вспомнить про метафору вещей и слов. Слова — это то, что разрешается соединять друг с другом, следуя правилам грамматики, таким образом, чтобы результат можно было каким-то образом интерпретировать. Про наши «высказывания» можно сказать нечто похожее: это то, что можно умножать на числа и соединять друг с другом с помощью знака «+», а *интерпретацией* того, что получается, мы и будем в основном заняты на этой прогулке. В качестве грамматики же имеется одно ключевое правило. Оно выражается формулой, которую я не просто собираюсь привести, но намерен сделать это с целью *не* потерять половину своих спутников на этой прогулке, вопреки расхожей мудрости, что их количество уменьшается вдвое от каждой формулы.

*Главное правило — раскрытие скобок*

Формула, правда, широко известна. Умножая сумму на число, как в $a \cdot (B + C)$, можно сначала умножить каждое слагаемое, а потом сложить: $a \cdot B + a \cdot C$. Это одно и то же: $a \cdot (B + C) = a \cdot B + a \cdot C$ — вот и вся формула. Если кто-то вспомнил про материал примерно пятого класса под названием «раскрытие скобок», то это оно и есть (чуть более торжественно — *распределительный закон*). «Грамматика», регулирующая правила обращения с «высказываниями», именно такова: всегда должно соблюдаться правило раскрытия скобок $a \cdot (|r\rangle + |s\rangle) = a \cdot |r\rangle + a \cdot |s\rangle$.

Примитивная, ничего не скажешь, грамматика [241]. Тот факт, что она лежит в основе самого точного на сегодняшний день описания природы, кажется мне по-настоящему удивительным.

*****

**Как же о них думать.** И все же. Абстрактные конструкции, какими являются эти «высказывания», бывает полезно хоть как-то себе *представлять*. Есть два типа более осязаемых явлений, на которые они похожи по своим определяющим признакам — каковые только в том и заключаются, что к любым выбранным явлениям можно применить умножение на числа и сложение, в результате чего получаются другие явления того же типа.

Первый тип похожих явлений — волны. Их тоже можно складывать и умножать на числа таким способом, что в результате снова получаются волны. Умножение волны на 2,5 означает, что амплитуда колебаний в каждой точке в 2,5 раза больше — можно сказать, волна «выше» (и одновременно «глубже»). Это показано на рис. 11.1 слева. Идеальный усилитель сигнала, кстати, должен выполнять в точности умножение, не внося в волну больше никаких изменений (например, не сглаживая вершину усиленной — «умноженной» — волны). Умножение на что-нибудь вроде 0,1 дает волну в десять раз «ниже». Несложно разобраться и с умножением волн на отрицательные числа. Умножить на –1 означает инвертировать волну, т.е. перевернуть, как показано на рис. 11.1 справа. Умножение на –42 состоит в том, что волну надо инвертировать *и* умножить на 42. А после умножения волны на 0 получится волна с нулевой амплитудой колебаний во всех точках, т.е. в обычных терминах — отсутствие волны; удобно тем не менее считать отсутствие волны нулевой волной. Умножение (число) · (волна) отличается от умножения числа на число, потому что включает в себя два объекта разной природы: волны все-таки *не* числа. И волны в этом умножении «главнее», потому что в результате умножения получается именно волна: (число) · (волна) = (другая волна). В точности это мы видели и для «высказываний».

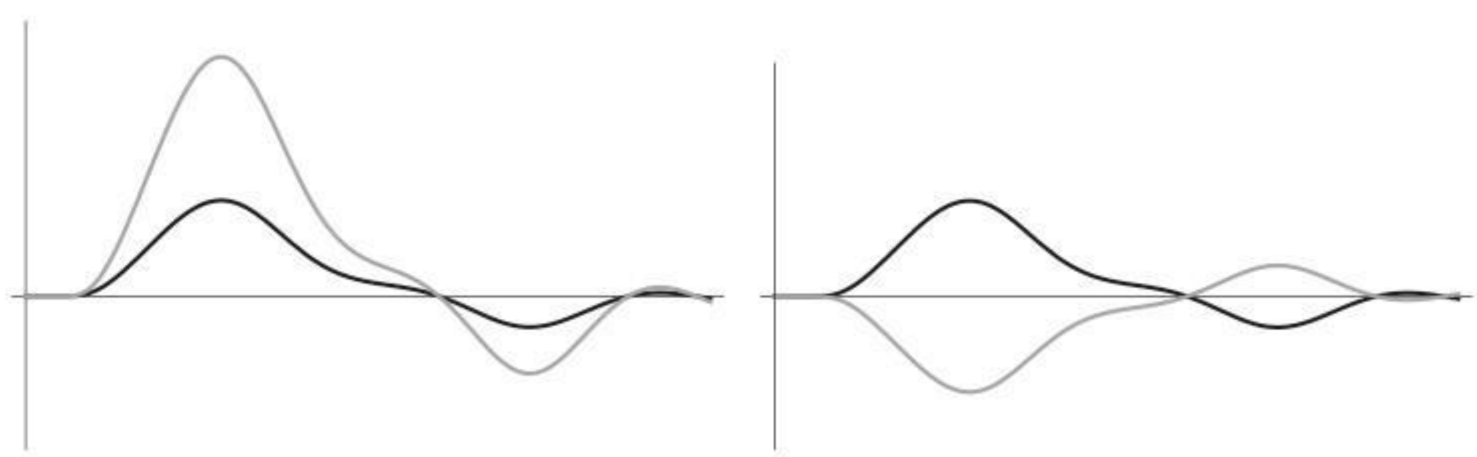


**Рис. 11.1.** Умножение волны на число дает другую волну. *Слева:* более светлый профиль — результат умножения более темного на 2,5. *Справа:* умножение на –1 инвертирует волну

Сложение волн — это просто наложение одной волны на другую. Наглядная иллюстрация — сложение волн на воде: игрушечный кораблик опускается и поднимается в зависимости от того, как именно суммируются колебания в данной точке [242]. В качестве другой иллюстрации: мы практически непрерывно ощущаем сложение волн ушами, потому что вокруг нас, как правило, много источников разнообразных звуковых волн (и еще больше электромагнитных). Кстати, если какую-то волну сначала умножить на –1, а потом сложить с исходной, то получится нулевая волна. Этот принцип используется в системах активного шумоподавления: шум инвертируют, т.е. умножают на –1, а затем складывают с волной, несущей смесь сигнала и шума; шум в результате сокращается по правилу $A + (-1) \cdot A = 0$, но $A$ здесь — не число, а волна.

*Встречаем волновую функцию!*

Из-за того, что таковы же правила обращения с нашими «высказываниями» $|*\rangle$ (где вместо звездочки записано что-нибудь в зависимости от ситуации — значение координаты, количества движения, энергии, компоненты спина, …), эти $|*\rangle$ называют еще волновыми функциями или, обобщенно, *волновой функцией*. Само по себе слово «функция» нам уже встречалось. Оно означает машину по превращению входных данных (например, координат точки, а может быть, цвета заката) в выходные — в некоторые числа. (Пример функции: на входе угол, на выходе его синус; на входе человек, на выходе дата его рождения.)

Каждое наше «высказывание» кодирует в себе информацию о такой машине. Если временно снова прибегнуть к помощи цветовой палитры, то «высказывание» $5 \cdot |\text{красный}\rangle + 3 \cdot |\text{желтый}\rangle - 1 \cdot |\text{фиолетовый}\rangle$ кодирует функцию, которая превращает «красный» в число 5, «желтый» в число 3 и «фиолетовый» в число −1 (числа могут быть совершенно любыми). Можно сказать, что запись в виде суммы «сразу» показывает все варианты входных данных, которые данная функция умеет обрабатывать, причем каждый вариант — вместе с тем значением, которое функция из него производит (*сразу* ведь видно, что фиолетовый отвечает минус единице) [243]. А что насчет оранжевого, экрю и маренго? Они не упомянуты в сумме из трех слагаемых, поэтому их наша машина-функция превращает в нуль. Тот же пример, но лишенный красок, выглядит так: если перед вами сумма $a_1 \cdot |q_1\rangle + a_2 \cdot |q_2\rangle + a_3 \cdot |q_3\rangle + \ldots$, где внутри кетов сидят какие-то точки, то отвечающая ей машина-функция задается простым правилом. Какое значение имеет эта функция в точке $q_1$? — значение $a_1$; в точке $q_2$? — значение $a_2$ и т.д. [244] Волновые функции можно, конечно, обозначать любыми буквами, но чаще всего используется $\psi$ или $\Psi$ (пси). Запись $\psi(q)$, где под $q$ понимаются какие-либо величины, показывает, входные данные какого типа она умеет обрабатывать (выражаясь чуть формальнее: от каких переменных она зависит). Волновую функцию *иногда* называют также пси-функцией.

Объекты другого типа, по формальным признакам тоже похожие на наши абстрактные $|\ \rangle$, имеют более геометрический характер: это векторы, т.е. стрелки, проведенные из выбранной точки в пространстве. Если пространство двумерно или трехмерно, то векторы вполне наглядны; для пространств более высокой размерности предлагается думать, что это «как в трехмерном пространстве, только не в трехмерном, а в многомерном» (что, надо признать, само по себе несколько абстрактно). Каждый вектор можно умножить на любое число; в результате получится растянутый вектор, если число больше единицы, сжатый вектор, если число меньше единицы, но положительно, и вектор, смотрящий в противоположную сторону, если число отрицательно. Складываются же векторы по правилу сложения перемещений: чтобы найти сумму двух векторов $\vec{a}+\vec{b}$, рисуем вектор $\vec{a}$, а *из его конца* проводим $\vec{b}$ и затем рисуем стрелку, соединяющую начальную точку, откуда растет $\vec{a}$, с полученной точкой. Можно действовать и наоборот, сначала нарисовать $\vec{b}$, проведя стрелку из выбранной точки, а из ее конца провести $\vec{a}$: получится то же самое, потому что не имеет значения, по каким сторонам параллелограмма добираться из одной вершины в противоположную. При этом выполняется несколько «очевидных», но важных правил типа $\vec{a} + (-1)\cdot\vec{a} = 0$. Написанное равенство означает смещение на вектор $\vec{a}$, за которым следует в точности противоположное ему смещение. Кстати, нуль в правой части надо было бы записывать как $\vec{0}$, потому что это нулевой вектор. Он выражает отсутствие всякого смещения и, строго говоря, является единственным из всех векторов, который *не* представляется наглядно стрелкой (у него вообще нет направления). Этот нулевой вектор ведет себя как нуль при сложении с другими векторами: $\vec{a} + \vec{0} = \vec{a}$ (то же самое имеет место и для нулевой волны при сложении с любой другой волной).

И волны, и векторы — примеры, показывающие, что объекты некоторого класса можно складывать и умножать на числа таким образом, что получаются другие объекты того же класса и при этом выполнены «очевидные» правила, включая правило раскрытия скобок. Таковы же и волновые функции [245].

Мне не избежать некоторого дублирования терминов. Можно сказать «система описывается таким-то состоянием», а можно — «система описывается такой-то волновой функцией». «Волновая функция» и «состояние» — это синонимы, но в некоторых контекстах мне проще говорить о состояниях, а в некоторых других — о волновой функции. Возможно, это наследие того, по каким книгам я учился, но, так или иначе, я буду употреблять оба названия. Нестандартное же название «высказывания» было нужно мне только для того, чтобы подчеркнуть их абстрактный характер, и так их никто не называет.

Волновыми функциями и управляет уравнение Шрёдингера, к которому мы движемся. Но прежде чем мы увидим, как оно это делает, нелишне будет узнать, чем же волновые функции оказались прекрасны: благодаря тому, что выглядит как их избыточность, они «снимают» вражду между непримиримыми величинами.

*****

**Урок демократии.** Поначалу трудно отделаться от ощущения, что среди «высказываний» (правильно: состояний) есть более фундаментальные, имеющие вид $|q\rangle$ для каких-то понятных «вещей» $q$, и более искусственные, получаемые всеми этими сложениями с умножениями. Другими словами, может показаться, что если $q$ и $r$ — «вещи», то $|q\rangle$ и $|r\rangle$ — что-то вроде слов, тогда как $a \cdot |q\rangle + b \cdot |r\rangle$ — фразы, из них составленные; и отдельные слова в некотором роде более «настоящие», чем фразы. Поучительный пример, показывающий, как в действительности обстоят дела в этом «языке», — система, где «вещей» всего две: это два значения компоненты спина электрона. Как мы помним со времени предыдущей прогулки, компоненту спина можно измерять только вдоль какого-то одного направления, и для электрона она может оказаться равной только одному из двух значений, $1/2\ \hbar$ и $-1/2\ \hbar$. Направление обычно выбирают вертикальным (что само по себе никакого значения не имеет, но важна определенность) и обозначают буквой $z$, как на рис. 11.2 слева. Два возможных значения компоненты спина противоположны друг другу, и с учетом того, как мы выбрали направление, удобными оказываются сокращенные (и наконец-то общепринятые) обозначения: стрелка вверх ↑ вместо 1/2 $\hbar$ и стрелка вниз ↓ вместо –1/2 $\hbar$. *Обычно* мы не заменяем числа специальными значками типа стрелки или смайлика, потому что в большинстве случаев это неудобно; но ничто и не запрещает нам так делать, а в данном случае обозначения оказываются очень подходящими к ситуации. Каждой из двух «вещей» ↑ и ↓ (двум возможностям для компоненты спина вдоль $z$) отвечает свое состояние, $|\uparrow\rangle$ и $|\downarrow\rangle$. Пока ничего не произошло, мы всего лишь ввели обозначения. Но как нам при этом относиться, скажем, к состоянию $|\uparrow\rangle + |\downarrow\rangle$? И вообще ко всем $a \cdot |\uparrow\rangle + b \cdot |\downarrow\rangle$ — это какие-то искусственные образования, «ничему не соответствующие»? Ничего подобного, очень даже соответствующие. Здесь-то и чудо.

*Значки ↑ и ↓ просто заменяют числа. Это еще не состояния*

На предыдущей прогулке мы говорили, что спин электрона описывается парой чисел, называемых спинорами. Это и есть числа $a$ и $b$ в записи состояния $a \cdot |\uparrow\rangle + b \cdot |\downarrow\rangle$. И спиноры, как мы тоже обсуждали, ведут себя по строго определенным правилам при поворотах в пространстве. Эти правила говорят, что при повороте на 90° от направления $z$ к направлению $x$ (см. рис. 11.2) состояние $|\uparrow\rangle$ переходит в сумму $|\uparrow\rangle + |\downarrow\rangle$. Внимание: состояния $|\uparrow\rangle$ и $|\downarrow\rangle$ не живут в трехмерном пространстве, но реагируют на повороты в нем так, как им велит это делать математика спиноров (те самые правила поведения при поворотах, которые делают спиноры спинорами; технически за это отвечает формализм, который придумал Паули). В результате описываемого поворота на 90° «простое высказывание» $|\uparrow\rangle$ о компоненте спина вдоль $z$ превращается в «составное высказывание» $|\uparrow\rangle + |\downarrow\rangle$. Но ведь в пространстве мы просто «положили на бок» прибор, который измеряет компоненту спина; прибор по-прежнему сообщает нам, что компонента спина каждого данного электрона имеет одно из двух возможных значений, а поскольку он лежит на боку, это теперь компонента вдоль направления *x*. Мы делаем вывод, что сумма состояний $|\uparrow\rangle + |\downarrow\rangle$ описывает состояние электрона с компонентой спина «вперед» по направлению *x*. То, что выглядело как «составное высказывание», оказалось таким же «элементарным высказыванием», как и $|\uparrow\rangle$ и $|\downarrow\rangle$, с которых мы начали, но с «повернутой точки зрения» [246]. Глядя на то, как *изображено* направление *x* на рис. 11.2, можно *обозначить* состояние с компонентой спина «вперед» вдоль направления *x* как $|\swarrow\rangle$. Итак, $|\uparrow\rangle + |\downarrow\rangle = |\swarrow\rangle$.

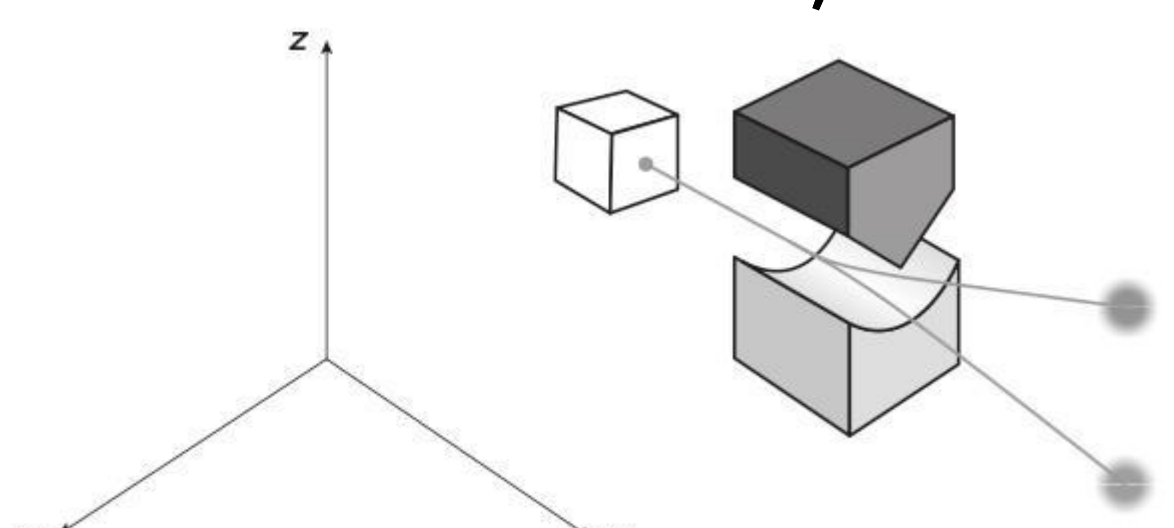



**Рис. 11.2.** Измерение спина электрона. Компонента спина может иметь определенное значение только вдоль какого-то одного направления в пространстве, например *z*. Измерение осуществляется за счет того, что электроны с двумя возможными значениями компоненты спина отклоняются магнитами в противоположные стороны

Это важное место стоит пройти еще раз. Мы соединили знаком плюс два состояния $|\uparrow\rangle$ и $|\downarrow\rangle$. Первое из них — это состояние электрона с компонентой спина вдоль направления *z*, равной 1/2 $\hbar$, а второе — состояние с компонентой спина вдоль *z*, равной –1/2 $\hbar$. Это самые элементарные высказывания о компоненте спина; их соединение, казалось бы, должно породить что-то более сложное, но в действительности оказывается таким же элементарным «высказыванием»: компонента спина электрона вдоль другого направления, а именно *x*, равна 1/2 $\hbar$. Аналогичным образом разность $|\uparrow\rangle - |\downarrow\rangle$ (которую, разумеется, мы получаем, беря сумму $|\uparrow\rangle + (-1) \cdot |\downarrow\rangle$) оказывается состоянием электрона, компонента спина которого вдоль *x* равна –1/2 $\hbar$, т.е. противоположна направлению оси *x*; напрашивается обозначение $|\nearrow\rangle$ для этого состояния. Снова получается, что $|\uparrow\rangle - |\downarrow\rangle = |\nearrow\rangle$: составное высказывание в терминах компоненты спина вдоль *z* оказывается простейшим высказыванием о компоненте спина вдоль *x*.

### *Арифметике абстрактных состояний отвечают повороты в пространстве*

Если мы думали, что сумма или разность «слов» — уже не «слова», а «фразы», то теперь видим, что в этом странном языке нашлись «слова», целиком выражающие эти «фразы». «Фразы» и «слова» — одно и то же. А если бы мы исходно выбрали направление *x*, чтобы определять значения компоненты спина, то простейшими нам казались бы состояния $|\nearrow\rangle$ и $|\swarrow\rangle$, а их сумма и разность выглядели бы как что-то сложносочиненное. Но их сумма — это состояние электрона с компонентой спина, направленной вверх по *z*, а их разность — состояние с компонентой спина вниз по *z*. [247] И это частный случай общей ситуации, применимой к описанию не только спина, но и разнообразных других свойств квантовых объектов: в зависимости от того, какие состояния системы нам более интересны по тем или иным причинам (например, в силу постановки эксперимента), может оказаться предпочтительным тот или иной набор «вещей»; им будет тогда соответствовать набор особо «любимых» состояний системы. Но другой выбор «вещей» приведет к другому набору «любимых» состояний, и каждый из двух наборов выражается через другой с помощью подходящих сумм с умножениями. Ни один из наборов с принципиальной точки зрения не лучше и не хуже другого.

Внезапно открываются довольно захватывающие перспективы, прежде всего — по преодолению вражды. Компоненты спина вдоль любых двух различных направлений враждуют. Но простая арифметика позволяет взять оба возможных состояния с определенным значением компоненты спина вдоль направления *z* и сконструировать из них состояние с компонентой спина «вперед» или «назад» не только вдоль оси *x*, но и вдоль *любого* выбранного направления в пространстве, просто выбирая числа $a$ и $b$ в состоянии $a \cdot |\uparrow\rangle + b \cdot |\downarrow\rangle$ (как именно выглядит соответствие между парой чисел и направлением в трехмерном пространстве, снова определяется математически). Полная демократия! Любая «фраза» оказывается «словом» — состоянием, отвечающим определенной компоненте спина вдоль какого-то направления.

Состояния/волновые функции живут где-то отдельно, не вместе с «вещами», определенно не в физическом трехмерном пространстве. На простом примере спина электрона нам только что приоткрылось происходящее *там у них*. Суммы различных состояний («суммы с умножениями на числа») — тоже полноценные состояния. В результате состояний оказывается очень много, и среди них отыскиваются и те, что отвечают «забытым вещам», от рассмотрения которых мы вроде бы отказались из-за вражды одних величин с другими. Эта идея распространяется не только на спин, но и на все остальное, и она-то и решает «загадку половины». Начав с «любимых» состояний, отвечающих выбранной половине величин, мы можем конструировать из них такие состояния, которые отвечают враждебным величинам (именно враждебным, а не каким-то еще!). Способ конструирования всегда один и тот же — составлять подходящие «суммы с произведениями».

Вот еще один очень часто встречающийся пример построения «враждебных» состояний: из состояний с определенными значениями координаты $x$ можно сконструировать состояние, отвечающее определенному значению враждебной величины — количества движения вдоль $x$, которое мы назовем $px$. Для этого возьмем все возможные значения выбранной координаты — какие-то $x_1$, $x_2$, $x_3$ и т.д. (значений бесконечно много). В соответствии с этим наши любимые состояния сейчас — это $|x_1\rangle$, $|x_2\rangle$, $|x_3\rangle$ и т.д. Чтобы из них сконструировать состояния, отвечающие какому-то возможному количеству движения $px$, надо сложить все эти $|x_1\rangle$, $|x_2\rangle$, $|x_3\rangle$, . . ., предварительно умножив каждое на свое число. Фокус в том, чтобы правильно подобрать эти числа. Фокусник, который умеет ловко находить нужные числа, спрашивает у вас, какое именно значение количества движения *px* вы «загадали». Вы сообщаете ему численное значение (оно имеет размерность: скажем, кг · м/с; ее тоже надо сообщить). Фокусник вводит это число в память своего калькулятора, а потом перебирает значения координаты $x_1$, $x_2$, $x_3$, … одно за одним и с каждым производит вычисление, используя ваше количество движения *px*. Калькулятор каждый раз выдает ему новое число: $a_1$, $a_2$, $a_3$ и т.д. (Эти числа — уже «голые», т.е. лишенные размерности; в заводских настройках калькулятора прошито значение постоянной $\hbar$, с помощью которой из количества движения и координаты можно сделать «голое» число.) Вам остается только взять сумму состояний $a_1 \cdot |x_1\rangle + a_2 \cdot |x_2\rangle + a_3 \cdot |x_3\rangle + \ldots$,

используя именно те числа, которые нашел для вас фокусник. Получается (длинное-предлинное в такой записи) состояние, которое — вот же фокус так фокус! — как раз и отвечает точно заданному количеству движения $p_x$, которое вы задумали. Впечатлившись, вы задумываете другое значение количества движения и просите фокусника повторить представление. Он делает те же вычисления с вашим новым значением, в результате вместо тех $a_1, a_2, a_3$ и т.д. получаются какие-то *другие* числа. Если их точно так же использовать для построения «длинной» суммы, то она и будет состоянием, которое отвечает вновь задуманному количеству движения.

Теперь, между прочим, яснее видно, как работает принцип неопределенности. Ни одно из чисел, которые нашел фокусник, не равно нулю, поэтому состояние с определенным значением количества движения $p_x$ сконструировано как «длинная сумма с умножениями» из *всех* состояний $|x_1\rangle, |x_2\rangle, |x_3\rangle, \ldots$, отвечающих возможным значениям координаты. Поэтому у электрона в построенном состоянии с определенным количеством движения $p_x$ нет определенного значения координаты $x$. И даже более того: числа, полученные фокусником, таковы, что ни одно из состояний $|x_1\rangle, |x_2\rangle, |x_3\rangle, \ldots$ в длинной сумме не является более предпочтительным или менее предпочтительным. Поэтому никакие значения координаты $x$ вообще никак не выделены, а это значит, что о значении координаты в этом состоянии сказать вообще нечего, оно оказывается максимально неопределенным. Точное значение одной величины — полная неопределенность другой, ей враждебной. Мы знали это с предыдущей прогулки, но теперь, благодаря конструированию одних состояний через другие, мы видим, как эта неопределенность возникает на языке состояний.

### *Обеспечительный механизм принципа неопределенности — выражение состояний через «враждебные»*

Тот же фокусник, надо сказать, умеет показывать и обратный фокус. В другой день вы решили начать описание мира, выбрав в качестве половины величин компоненты количества движения и вынужденно отбросив враждебные им координаты. Для каждого из возможных значений количества движения (как всегда, вдоль некоторого направления) у вас есть отвечающее ему состояние — именно они в этот день являются вашими «любимыми» состояниями. Как построить из них состояние, отвечающее определенному значению координаты вдоль того же направления? Фокусник спрашивает вас, чему равно это значение координаты. Если, например, это $x_{222}$ = 0,031 нм, то вы говорите ему: «31 тысячная нанометра», и он с помощью этого числа производит в своем калькуляторе вычисления с каждым из возможных значений количества движения по очереди и сообщает вам набор чисел. Получив эти числа, вы благодарите мастера и используете их, чтобы построить «длинную сумму с умножениями» из всех ваших любимых состояний на этот день. Эта длинная сумма и будет состоянием $|x_{222}\rangle$. [248]

Сейчас, пожалуй, подходящий (а может быть, даже запоздалый) момент для пояснения того, какие «вещи» $q$, $r$, $s$ (и так далее) с самого начала годятся, чтобы составлять суммы состояний типа $a \cdot |q\rangle + b \cdot |r\rangle + c \cdot |s\rangle$.

Каждая из букв $q$, $r$, $s$ должна полностью описывать возможные хотя бы в принципе значения величин из дружественного набора. Например, если речь идет о двух электронах, то под буквой $q$ могут пониматься координаты и спины обоих электронов; указать координаты только одного электрона или как-то иначе уменьшить объем данных означало бы сознательно обречь себя на неполноту описания. «Возможные хотя бы в принципе» означает, что не исключен вариант, когда значения координат отвечают положению электрона, скажем, на Луне (со спином же большого разнообразия, как всегда, нет: только одна из двух возможностей относительно одного выбранного направления в пространстве для каждого электрона). То же верно в отношении букв $r$ и $s$: они выражают какие-то другие значения величин из того же набора (электроны в каких-то других местах, с как-то ориентированными спинами). А если, скажем, $q$ и $r$ выбраны указанным образом, то можно ли в качестве $s$ взять значения не координат, а количества движения для одного или даже двух электронов (заодно с компонентами спина, которые прямо сейчас нас меньше интересуют)? Можно, но в этом случае $|s\rangle$ будет иметь вид «длинной суммы с умножениями», которую, в случае затруднения с нашей стороны, помогает строить известный на весь мир фокусник. В *основе* конструкции все равно должны быть состояния, отвечающие определенным значениям координат, раз уж мы выбрали координаты, только этих состояний потребуется «очень много», чтобы построить состояние, отвечающее определенному значению количества движения. Резюме: можно складывать друг с другом любые состояния, но они не должны страдать от очевидной неполноты данных и все должны быть выражены через состояния, отвечающие величинам из одного класса дружественности [249].

*****

**Дискретное и непрерывное.** Уединение и вдохновение. В 1925 г. идеи, видимо, витали в воздухе, но как бы то ни было, ключевое уравнение квантовой механики сформулировал Шрёдингер вскоре после Рождества того года, отправившись в самый восточный швейцарский кантон Граубюнден, чтобы немного расслабиться. Он провел рождественские каникулы, захватившие первую неделю января следующего года, на хорошо знакомой ему вилле «Д-р Хервиг» в горнолыжном местечке Ароза. С этого начался период его беспрецедентно плодотворной научной активности: он придумал квантовую механику («волновую механику», как он сам ее называл) на основе найденного им уравнения, в течение нескольких месяцев решил с его помощью ряд задач, а также, неожиданно для всех, установил взаимосвязь своей теории с «другой» квантовой механикой.

Первая полноценная версия квантовой механики («матричная механика») была создана за полгода до творческого взлета Шрёдингера и не содержала никакой волновой функции. В первой половине июня 1925 г. Гайзенберг понял, как описывать происходящее в атоме, оперируя только тем, что извлекается из экспериментов, и подавляя в себе желание наделять электроны какими-либо привычными свойствами. Главным экспериментальным фактом была дискретность — дискретность энергий, про которую еще с 1913 г. было понятно, что именно она должна отвечать за наблюдаемые спектральные линии. Гайзенберг смог правильно угадать, *что* в условиях этой дискретности играет роль координаты, а что — количества движения. Для каждой из этих величин ему понадобились бесконечные наборы чисел, порождаемые по определенным правилам и организованные в огромные (тоже бесконечные) таблицы. Правила обращения с числами, расположенными в таблицах, и определили то, что стали называть матричной механикой; это и была первая «настоящая» квантовая механика. Дискретность там совершенно очевидна: строки и столбцы таблиц нумеруются целыми числами, этим архетипом дискретности.

### *Квантовая механика Гайзенберга — операции с дискретными данными*

Гайзенберг придумал свой формализм, тоже уехав в глушь, хотя и по другому поводу, чем Шрёдингер, — на остров

Гельголанд в Северном море, ища там избавления от сенной лихорадки. Он, по-видимому, был там в одиночестве:

…я все больше сосредоточивал свои усилия на вопросе о соблюдении закона сохранения энергии и как-то вечером продвинулся настолько далеко, что сумел с помощью довольно-таки громоздких, по теперешним масштабам, вычислений определить отдельные члены энергетической таблицы... <…> Когда относительно первых членов закон сохранения энергии действительно подтвердился, мною овладело такое возбуждение, что в последующих вычислениях я постоянно делал ошибки. Было поэтому уже три часа ночи, когда передо мной лежал окончательный результат расчетов. <…> В первый момент я до глубины души испугался. У меня было ощущение, что я гляжу сквозь поверхность атомных явлений на лежащее глубоко под нею основание поразительной внутренней красоты, и у меня почти кружилась голова от мысли, что я могу теперь проследить всю полноту математических структур, которые там, в глубине, развернула передо мной природа. Я был так взволнован, что не мог и думать о сне. Поэтому я вышел в уже начинавшихся рассветных сумерках из дома и направился к южной оконечности острова, где одиноко выступающая в море скала-башня всегда дразнила во мне охоту взобраться на нее. Мне удалось это сделать без особых трудностей, и я дождался на ее вершине восхода солнца.

В. Гайзенберг. «*Часть и целое*» [250]

Матричная механика стала настоящим прорывом.

Уравнение Шрёдингера на первый взгляд не обещало никакой дискретности: оно имело дело с непрерывной функцией, плавно зависящей, скажем, от положения точек в пространстве. Определяющий успех Шрёдингера, собственно, и ставший оправданием его идеи, состоял в том, что (несколько помучавшись с математикой) он смог получить из уравнения дискретные значения энергии для электрона в атоме водорода (причем из самого метода было ясно, что область его применения очень широка). Многие сразу высоко оценили это достижение; впрочем, Гайзенберг публично высказывался об идеях Шрёдингера без большого восторга, а в частных письмах не скрывал сильнейшего неодобрения. Поскольку взгляды самого Шрёдингера на «смысл» его уравнения находились в состоянии становления, отвечать на критику Гайзенберга ему было непросто; кроме того, вопросы часто упирались в философские по существу представления о том, из чего состоит мир. Критику усилил своим логико-философским напором присоединившийся к Гайзенбергу Бор. Оба они видели фундаментальные элементы мира дискретными и в немалой мере «спрятанными» (даже несуществующими), пока тот или иной эксперимент не «выхватывал» какое-то одно число из тех, что были распределены по гайзенберговским таблицам. Шрёдингер же, глядя на свое уравнение, был вынужден говорить о непрерывном распределении *чего-то*, что было даже не так-то легко конкретизировать. Первоначально он пытался объяснить все содержание мира через волновую функцию: представить почти точечные частицы как «сгустки волн», описываемых волновой функцией, — так называемые волновые пакеты. Однако ему быстро стало ясно, что из этого ничего не получится, потому что развитие событий во времени в соответствии с его же уравнением приводит к тому, что эти волновые пакеты неизбежно расползаются, делаясь все шире, чего в природе заведомо не происходит, скажем, с электронами и протонами [251]. В только что возникшей волновой механике *было* что критиковать. Тем не менее в течение считаных месяцев, продолжавших период его феноменальной активности, Шрёдингер сумел показать, что вся матричная механика Гайзенберга *содержится* в его собственном подходе, основанном на волновой функции: некоторое математическое преобразование (из числа тех, которые пришлись бы по духу Фурье) производит из волновой функции те самые гайзенберговские таблицы и правила обращения с ними.

Начав работу на вилле, Шрёдингер вполне отдавал себе отчет в масштабе замысла: уже 27 декабря он писал Вину, что «сражается с новой атомной теорией», сетуя при этом на недостаточное знание математики, но выражая оптимизм, что все-таки сможет с ней справиться и результат окажется совершенно замечательным. Он видел перед собой четкую цель и путь к ней: получить уровни энергии атома водорода, обойдясь при этом без серии искусственных предположений, а опираясь только на уравнение, которое в скрытой форме должно было содержать все необходимое знание. Но, планируя свою поездку в горы, он определенно не собирался находиться там в полном уединении.

Как и смуглая леди, вдохновлявшая шекспировские сонеты, леди из Арозы может навеки остаться загадкой. Про ее имя мы знаем, что это не Лотте и не Айрин. По всей вероятности, она не звалась и Фелисией; муж ее потерял свое состояние в период послевоенной инфляции и уехал в Бразилию, оставив ее с маленькой дочерью на руках. Кто бы ни была его вдохновительница, Эрвин испытал впечатляющий подъем сил, и с этого начался двенадцатимесячный период его неослабевающей творческой активности, остающийся единственным в своем роде в истории науки. Когда его захватывала важная задача, ему удавалось добиться глубокой и абсолютной концентрации, задействуя при этом весь свой выдающийся математический потенциал.

У. Дж. Мур. «Шрёдингер: жизнь и идеи»

*****

**Движение и энергия на вершине абстракций.** Уравнение Шрёдингера определяет, как волновая функция меняется со временем, и поэтому говорит о том, каким будет будущее, исходя из известного настоящего. Чтобы описать, *как* оно это делает, надо подняться еще на пару ступенек вверх по лестнице абстракций [252]. Завязка этого сюжета, впрочем, обманчиво проста: энергия. Мы уже отмечали мимоходом на прогулке 10, что уравнение Шрёдингера готово произвести знание о будущем исходя не из устройства сил в системе, а из устройства там энергии. Вообще-то все то, что делают для нас законы Ньютона, тоже можно получить, имея дело только с энергией. После Ньютона развитие знания не стояло на месте, и к середине XIX в. полностью сформировалось понимание, как «энергия правит миром» — каким образом эволюция во времени определяется энергией системы, а точнее, зависимостью энергии от положений и количеств движения всех частей. (Как правило, через количества движения выражается энергия движения, а через координаты — энергия притяжения или отталкивания.)

«Опознавательным знаком» здесь служит фамилия человека, больше всего сделавшего для описания движения под управлением энергии, — это Гамильтон. Он скончался в 1865 г. и не мог даже в принципе иметь отношения к какой бы то ни было квантовой теории, но придумал настолько превосходный способ описания движения, что у него нашлись аналоги и в квантовом мире.

*Энергия определяет эволюцию*

Уравнение Шрёдингера оставляет за энергией «руководство» эволюцией во времени. Эволюционирует же, собственно говоря, волновая функция. Но, чтобы «руководить», энергия должна превратиться в *инструмент воздействия* на волновые функции. В этом новом качестве энергия получает специальное название — гамильтониан (в честь, разумеется, ничего не подозревавшего Гамильтона). Не сильно кривя душой, можно сказать так:

Гамильтониан говорит волновой функции,
как ей изменяться во времени.

*Это тизер уравнения Шрёдингера*

Подробности (еще раз спасибо Уилеру за идею высказываться выразительно, но неясно) скрыты, разумеется, в слове «говорит» — в том, что именно гамильтониан делает с волновыми функциями. Он представляет собой *предписание*, согласно которому из любой волновой функции производится какая-то другая.

Целый класс предписаний по изменению волновых функций и составляет верхний (по крайней мере на этой прогулке) уровень лестницы абстракций, и мы очень скоро сможем оглядеть весь пейзаж с небывалой высоты. От всех предписаний по превращению одних волновых функций в другие требуется соблюдение одного фундаментального условия, по существу представляющего собой (снова!) правило раскрытии скобок: применить данное предписание к сумме $a_1 \cdot |q_1\rangle + a_2 \cdot |q_2\rangle$ — это то же самое, что сначала применить его к $|q_1\rangle$ и $|q_2\rangle$ по отдельности, а потом умножить возникшие новые волновые функции на числа $a_1$ и $a_2$ и все получившееся сложить (все происходит, как и при умножении числа на сумму, но только для более сложной операции, чем умножение) [253].

И вот главное: «сырьем» для производства таких предписаний оказываются привычные нам величины, такие как координаты и компоненты количества движения. Они получают новую жизнь в виде уже не обычных величин, принимающих те или иные числовые значения, а абстрактных явлений, распоряжающихся волновыми функциями. Превратим, например, координату *x* в такое предписание. В качестве обозначений часто используются буквы со шляпками: предписание, «прародителем» которого была координата *x*, можно обозначить как $\hat{x}$. Итог его «разговора» с любой волновой функцией $|q\rangle$ записывают просто как $\hat{x}|q\rangle$ — это *не* умножение, а результат воздействия, какая-то новая волновая функция, которую предписание $\hat{x}$ производит из попавшейся ему под руку волновой функции (состояния). Как же конкретно оно, это $\hat{x}$, действует на встречаемые им волновые функции? Рецепт прост, но эффективен. Сначала перечислим все возможные значения координаты $x_1$, $x_2$, $x_3$, … (см. примечание 8 выше) и отвечающие им состояния $|x_1\rangle$, $|x_2\rangle$, $|x_3\rangle$, … . Как мы хорошо помним, каждое такое состояние, например $|x_{222}\rangle$, — это абстрактная конструкция; но при этом с каждым состоянием связано свое число (скажем, $x_{222}$ = 0,031 нм в мимолетном примере выше). Предписание $\hat{x}$ говорит, что состояние $|x_{222}\rangle$ следует просто *умножить* на число $x_{222}$ (да, 0,031 нм в данном случае). Таким же точно образом надо поступить и в остальных случаях: состояние $|x_1\rangle$ следует умножить на отвечающее ему число $x_1$, состояние $|x_2\rangle$ умножить на свое $x_2$ и т.д. Это так и записывается: $\hat{x}|x_1\rangle = x_1 \cdot |x_1\rangle$, и аналогично $\hat{x}|x_2\rangle = x_2 \cdot |x_2\rangle$ и т.д. Казалось бы, ничего интересного, почти казуистика: чтобы узнать, как действует икс-со-шляпкой, смотрим на значение координаты, которое прячется внутри состояния, и умножаем состояние на это значение; стоило ли ради этого изобретать этот икс-со-шляпкой? Стоило, потому что он в действительности может намного большее: он *уже* знает, как применить себя ко *всем остальным* состояниям! Дело в том, что любое состояние можно записать в виде «длинной суммы с произведениями» $a_1 \cdot |x_1\rangle + a_2 \cdot |x_2\rangle + a_3 \cdot |x_3\rangle + \ldots$ с какими-то числами $a_1$, $a_2$, $a_3$ и т.д., а мы договорились, что каждое наше предписание снабжено рецептом раскрытия скобок: видя перед собой сумму волновых функций, оно набрасывается на каждое слагаемое по отдельности (а все получившееся следует потом сложить).

## *По-прежнему первостепенно важное правило — раскрытие скобок*

Правило раскрытия скобок, простое само по себе, оказалось на удивление мощным средством; это, по существу, главное свойство квантовой механики, и оно не в последний раз заявляет о себе на этой прогулке. При этом из каждой «длинной суммы» под действием предписания $\hat{x}$ получается состояние, ничем не похожее на исходное: да, каждое слагаемое в сумме всего лишь умножается на некоторое число, но каждое — на *свое* число! Если вы укоротили все ножки табуретки на трех ногах в одно и то же количество раз, то на ней по-прежнему можно сидеть, она просто станет более низкой, но если одну ножку вы укоротили в полтора раза, другую в два, а третью вообще удлинили на 10% от ее первоначальной длины, то табуретку не так легко будет использовать по назначению. В «длинных суммах» число слагаемых существенно больше трех, и различные изменения в каждом из них изменяют всю сумму неузнаваемо.

Та же идея работает не только для *x*, но и для других координат, а равным образом и для количества движения вдоль любого из направлений: каждая из этих величин порождает предписание, по-своему изменяющее волновые функции. Как относиться к этой новой жизни привычных понятий? Координаты и компоненты количества движения на наших глазах сделали впечатляющую карьеру от скромных величин, которые в доквантовом мире всегда имели определенные численные значения, до «абстракций над абстракциями»: они стали правилами, предписывающими, во что превратить любую волновую функцию. В этом качестве они больше не выражаются числами, но в некотором роде они «представительствуют» от имени *всех* значений «своей» величины: наше $\hat{x}$, например, несет в себе знание о всех возможных значениях координаты. В разнообразных ситуациях может так оказаться, что и само $\hat{x}$ задано некоторым сложным образом (скажем, «собрано» из других предписаний), да и состояния построены таким способом, что их свойства сразу не видны; и тем не менее если известно, что предписание $\hat{x}$ отвечает координате $x$, то из него можно извлечь знание обо всех состояниях $|x_1\rangle$, $|x_2\rangle$, $|x_3\rangle$, . . ., применяя это $\hat{x}$ к произвольно выбранным состояниям. Почти всегда в результате будет получаться какое-то «совсем» другое состояние, но в редких случаях применение предписания приводит к самому безобидному из возможных изменению состояния: всего лишь к умножению его на число. А произойти это может только с теми самыми $|x_1\rangle$, $|x_2\rangle$, $|x_3\rangle$, . . . — состояниями, отвечающими определенным значениям координаты, насколько бы замысловатая конструкция ни маскировала их природу. Про них говорят (пример удачной терминологии), что это *собственные* состояния нашего предписания $\hat{x}$. При этом у нас достаточно информации, чтобы выяснить, какое именно состояние из $|x_1\rangle$, $|x_2\rangle$, $|x_3\rangle$, . . . нам встретилось: об этом сообщает то число, на которое состояние умножилось! Оно непременно равно одному из $x_1$, $x_2$, $x_3$, … — с каким из них совпадет, такое, значит, и состояние. Продолжая мой пример чуть выше: если, например, число равно 0,031 нм, то, значит, мы наткнулись на собственное состояние $|x_{222}\rangle$.

Если вы сейчас спросите меня, а не таким же ли образом мы находим стационарные состояния и уровни энергии в атоме, то я вынужден буду разрушить всю оставшуюся интригу: да, применяя на этот раз *гамильтониан* (тоже предписание по изменению волновых функций, только отвечающее не координате и не компоненте количества движения, а энергии) ко всем волновым функциям, мы ищем среди них те, которые изменяются самым безобидным образом, т.е. всего лишь умножаются на число. Этим среди прочего и занимался Шрёдингер на вилле «Д-р Хервиг», попутно сетуя на свое *недостаточное* знание математики. Числа, которые возникают при этом в качестве множителей, и составляют список дискретных значений энергии. Эти собственные числа гамильтониана определяют те самые исключительные случаи, в которых электрон все-таки может стационарно существовать в атоме, — знание, которым мы пользовались в долг на прогулке 10.

### *Энергия превращается в гамильтониан*

Но мы слегка забежали вперед. Все-таки мы еще не полностью построили гамильтониан. Сейчас исправим это упущение. Во-первых, с координатами *y* и *z* мы поступаем точно так же, как с координатой *x*, и превращаем их в предписания $\hat{y}$ и $\hat{z}$. Во-вторых, надо еще надеть шляпу на количество движения — точнее, на каждую его компоненту [254]. А затем, задавшись какой-нибудь системой (например, десять электронов и ядро в атоме неона), мы выражаем энергию через координаты и количества движения, а потом в этом безобидном выражении заменяем все упоминания координаты *x* на предписания $\hat{x}$ и аналогично поступаем с двумя другими координатами *y* и *z*. И сделать это надо для каждого участника событий, поэтому появятся свои предписания $\hat{x}$, $\hat{y}$ и $\hat{z}$ для каждого электрона. То же самое делается с количеством движения: для каждого электрона три компоненты количества движения превращаются в три предписания. После того как все обычные величины в выражении для энергии заменены на свои «продвинутые» версии со шляпками, перед нами оказывается предписание для изменения состояний/волновых функций. Оно чаще всего обозначается $\hat{H}$(по первой букве фамилии Hamilton), и это и есть гамильтониан — «новая жизнь» энергии в виде предписания по изменению волновых функций.

Никто, правда, не говорит «предписание по изменению волновой функции». Говорят «оператор» или (что правильнее, но длиннее) «линейный оператор». Слово «оператор» указывает на того, кто действует, управляет: в квантовой механике операторы *действуют* на волновые функции, изменяя их; вполне подходящее название. Технический термин «линейный» связан с *линией* довольно опосредованным образом и означает не «выстроенный в линию», а «всегда действующий по правилу раскрытия скобок и проходящий сквозь умножение на числа» (см. примечание 18 выше).

Пожалуй, стоит задуматься и признать, что перед нами — новый взгляд на природу вообще и движение в частности. Вместо привычных нам величин и их значений на первый план выходят отвечающие им операторы, предназначение которых — действовать на волновые функции (превращать одни в другие). Сами по себе операторы ни в какой мере не выражаются числовыми значениями. Но каждый оператор способен задавать волновой функции (состоянию) вопрос: не случилось ли так, что в данном состоянии определенная величина все-таки выражается числом? Состояний, для которых это случается, в определенном смысле «мало»; это *собственные* состояния данного оператора — те, которые под его воздействием претерпевают всего лишь умножение на число. У каждого предписания свой набор собственных состояний, которые так себя ведут, и набор *собственных* чисел, которые при этом появляются в качестве множителей. Эти числа (круг замкнулся!) и представляют собой все возможные значения данной величины — той, на которую мы и надели шляпу, чтобы получить данное предписание. Для гамильтониана это значения энергии, для оператора $\hat{p}_x$ отвечающего количеству движения вдоль *x*, это возможные значения количества движения вдоль этого направления. То, что здесь происходит, называется *квантованием*: привычные величины превращаются в операторы и приобретают в этом качестве самостоятельное существование, а возможные численные значения каждой величины в конкретной системе возникают как продукт взаимоотношений этих операторов с некоторыми специально устроенными (*собственными*) волновыми функциями, уж какие найдутся. Это вершина нашего восхождения к абстракциям. Осталось только собрать их в уравнение Шрёдингера.

*Кульминация! Вот как работает квантование*

*****

**Уравнение Шрёдингера.** Самый главный среди операторов — гамильтониан («переделанная энергия»), потому что, согласно уравнению Шрёдингера, он определяет, как волновая функция изменяется с течением времени. Применение гамильтониана к (любой) волновой функции Ψ производит из нее какую-то «совсем другую» волновую функцию $\hat{\mathcal{H}}\Psi$ (какая она получится, зависит и от того, каков гамильтониан, и, конечно, от того, на какую волновую функцию он набросился). Уравнение Шрёдингера требует, чтобы волновая функция изменялась во времени так, чтобы темп ее изменения всегда был равен той волновой функции, которая получается после применения гамильтониана. Неформально говоря, скорость изменения волновой функции определяется тем, как гамильтониан «толкает» эту волновую функцию — именно в этом качестве он и управляет эволюцией. В действительности равенство должно иметь место с точностью до умножения на постоянную величину, одну всегда и для всех:

$$(\text{постоянная})\cdot(\text{темп изменения } \Psi) = \hat{\mathcal{H}}\Psi.$$

Этим регулируется изменение во времени любой и каждой волновой функции. С 1926 г. и поныне это уравнение применялось неисчислимое количество раз и продолжает с успехом применяться [255].

В качестве промежуточного итога наших странствий по миру труднопредставимого мы сейчас «получим атом» из уравнения Шрёдингера. Среди возможных зависимостей волновой функции от времени имеется класс простейших и в некотором роде «несущественных», когда темп изменения волновой функции максимально просто выражается через саму волновую функцию: вся левая часть уравнения Шрёдингера, (постоянная) · (темп изменения Ψ), просто равна той же волновой функции, умноженной на число: *E* · Ψ. Такие волновые функции/состояния называются стационарными состояниями; они встречались нам на предыдущей прогулке, это «постоянные-насколько-возможно» состояния [256]. Левую часть уравнения Шрёдингера, равную для них *E* · Ψ, в записи традиционно переставляют местами с правой частью, в результате чего получается уравнение для стационарных состояний

$$\hat{\mathcal{H}}\Psi = E \cdot \Psi.$$

## *Дискретное из непрерывного: все дело в собственных состояниях*

Поскольку гамильтониан получен из выражения для энергии, числа *E* здесь — это значения энергии. Какие? Те самые!! Те, которые может (которые только и может) иметь система с данным гамильтонианом в стационарных состояниях («несущественно» зависящих от времени). Из этого уравнения требуется определить как собственные значения гамильтониана — те значения энергии *E*, при которых найдутся (не равные нулю) решения Ψ, так и сами эти решения, по одному или по нескольку для каждого из найденных значений *E*. Именно так вычисляются дискретные значения энергии, при которых электрон может существовать в атоме. Последнее приведенное уравнение тоже называется уравнением Шрёдингера, но, в отличие от выписанного ранее, — *стационарным* уравнением Шрёдингера. В нем нет зависимости от времени; оно говорит, каким образом атом (молекула, …) может существовать «на постоянной основе», и к нему-то и надо обращаться по всем вопросам о «пойманном» движении (когда части системы не разлетаются прочь) [257].

Окинем еще раз взглядом стратегию квантования: каким же это магическим образом появляются дискретные значения энергии, которыми мы без особых объяснений, взаймы, пользовались на предыдущей прогулке — скажем, для электрона в атоме или для колебательных систем. Стартовые данные — это выражение для энергии: для энергии движения и для формы энергетической ямы (и для энергии взаимодействия между электронами, если их несколько). Пока все непрерывно, нет ни намека на дискретность. Ключевой шаг, и даже не шаг, а скачок, — изобрести волновые функции, а энергию превратить в предписание по изменению волновых функций — гамильтониан. Следующий шаг — найти те волновые функции, которые «максимально устойчивы» под действием гамильтониана, т.е. претерпевают всего лишь умножение на число. Это собственные состояния гамильтониана. Вместе с каждым собственным состоянием мы находим и то число, на которое собственное состояние умножается в результате применения гамильтониана, — это значения энергии *E*, при которых уравнение $\hat{H}\Psi = E\cdot\Psi$ только и имеет ненулевые решения для волновой функции. Математика, через которую пробивался Шрёдингер в самом конце 1925 г., показывает, что для электрона в яме, для колебательной системы и вообще во всех случаях «пойманного» движения таких значений энергии «мало» — они дискретны. Этим задача про дискретные значения энергии и решена: не предполагая никакой дискретности заранее, мы ее получили! Но можно сделать большее: увидеть, как возникает матричная механика Гайзенберга. Вообще любую волновую функцию можно записать в виде «длинной суммы с умножениями», выразив ее через собственные состояния гамильтониана. Но *тогда* всякое другое предписание по изменению волновых функций, например $\hat{p}_x$ отвечающее количеству движения, полностью определяется тем, что оно делает с этими собственными состояниями, — а это в точности описывается гайзенберговской таблицей. Таким образом через область абстрактного и пролегла дорога от непрерывного к дискретному [258].

*Что делает* электрон в атоме? Реализует собственные состояния гамильтониана. А энергия — повышенная, правда, в ранг гамильтониана — и в самом деле правит миром.

*****

**Волновая функция в поисках реальности.** От движения в том виде, как мы его хорошо знаем, среди окруживших нас абстракций осталось не так много. Координата и количество движения перестали быть просто числами и превратились в содержимое гайзенберговских таблиц или, что эквивалентно, в операторы, воздействующие на волновые функции, — какие уж тут *траектории*! Волновые функции — абстрактные сущности, из которых операторы производят другие сущности того же сорта. Комбинация нескольких операторов, называемая гамильтонианом, становится двигателем эволюции — с помощью уравнения Шрёдингера предписывает, как волновым функциям меняться во времени. В такой эволюции волновых функций теперь и предлагается искать ответы на вопросы, которые в наивной форме звучали как «что, куда и как движется?». При этом, без сомнения, воодушевляет тот факт, что из уравнения Шрёдингера можно получать дискретные значения энергии стационарных состояний, которые и наблюдаются в жизни. Но что все-таки *происходит* в реальности? И как установить с ней контакт, если рассуждаем мы в терминах абстрактных волновых функций? От высоких абстракций пора каким-то образом спуститься к реалиям, в терминах которых мы понимаем происходящее в нашем обычном трехмерном пространстве.

Но там движение было и остается для нас главным. Это основной индикатор событий. Мы судим о происходящем в мире по материальным последствиям: какой кусок материи из числа тех, за которыми мы способны следить, где оказался — как, другими словами, двигался. Стрелка прибора — пример такого «куска материи»: мы *видим*, куда она подвинулась; другой распространенный индикатор — затемнение или, наоборот, осветление на экране или фотопластинке, возникающее там, куда попало что-то материальное. И стрелка, и пятно — макроскопические объекты, *даже* если мы разглядываем их в микроскоп: мы все же фиксируем их состояние практически непосредственно. Напротив, самих электронов и их собратьев мы видеть не можем, и говорить о том, что происходит с ними, удается лишь в той мере, в какой мы способны построить цепочку рассуждений, ведущую от абстракции волновой функции к сдвигу индикатора в ходе эксперимента — к наблюдаемому движению/перемещению. Основополагающий пример тут — наблюдение (измерение) компоненты спина электрона. Спин — *не* движение чего-либо в пространстве, а «внутреннее» свойство элементарных частиц, поэтому наш шанс «измерить» спин состоит в том, чтобы каким-то образом «связать» его с движением в пространстве. В парадигмальном приборе, который служит этой цели, электрон отклоняется вверх или вниз в зависимости от того, какова компонента его спина, «вверх» ($1/2\ \hbar$) или «вниз» ($-1/2\ \hbar$). Это выражают фразой «движение электрона *запутывается* с его спиновым состоянием»; говорят еще, что пространственное состояние электрона *запутывается* с его спиновым состоянием. Устройство, которое создает это запутывание, называется прибором Штерна — Герлаха по имени авторов реального эксперимента (первоначально, в 1922 г., поставленного с атомами серебра), который сыграл ключевую роль в исследовании квантового мира [259]. Мимоходом мы уже встречали прибор Штерна — Герлаха на рис. 11.2; помимо своей актуальной физической реализации, он стал неотъемлемой частью многочисленных мысленных экспериментов по прояснению логической структуры наших представлений об устройстве мира.

Электрон, влетающий в этот прибор, описывается, конечно, и своим спиновым состоянием типа $|\uparrow\rangle$ или $|\downarrow\rangle$, и волновой функцией, сообщающей что-то о его локализации в пространстве. Для наших рассуждений достаточно записать пространственную часть его волновой функции в условном виде, как |посередине⟩ — где выражен тот факт, что электрон еще не отклонился ни вверх, ни вниз; остальные подробности нам сейчас не важны. А в качестве спинового состояния электрона сначала возьмем |↑⟩ — состояние со спином вверх [260]. Тогда, собирая вместе и спиновую, и пространственную части волновой функции, получаем состояние электрона |↑⟩ |посередине⟩. Записанные подряд — «перемноженные» — два | ⟩-состояния отвечают за разные степени свободы электрона: одно за спин, другое за локализацию в пространстве. Правила обращения с такими «составными» волновыми функциями/состояниями те же: их можно складывать и умножать на числа и всегда можно раскрывать скобки [261]. Возвращаясь к электрону: в результате взаимодействия с магнитным полем в приборе Штерна — Герлаха он пролетит сверху. Подробности происходящего описываются, разумеется, уравнением Шрёдингера; мы сейчас зафиксируем, что определяемая им эволюция развивается по схеме

$$|\uparrow\rangle\,|\text{посередине}\rangle \longrightarrow |\uparrow\rangle\,|\text{пролетает сверху}\rangle.$$

Если же изначально электрон находился в состоянии $|\downarrow\rangle\,|\text{посередине}\rangle$, то из-за взаимодействия с магнитным полем он в результате пролетит снизу:

$$|\downarrow\rangle\,|\text{посередине}\rangle \longrightarrow |\downarrow\rangle\,|\text{пролетает снизу}\rangle.$$

Это и позволяет нам фактически определить («измерить») спин, пользуясь тем, что взаимодействие гарантирует строгую корреляцию между спиновой и пространственной частями волновой функции.

*Мы судим о внутреннем состоянии, используя его запутанность с движением*

Макроскопические события, по которым мы делаем выводы, случаются с частями прибора. Изначально прибор находился в нейтральном состоянии $|\square\rangle_{\text{п}}$, означающем, что стрелка никуда еще не отклонилась или никакое пятно не возникло и т.п.

Буква «п» чуть ниже строки напоминает, что речь идет о приборе. Его состояния — сложные волновые функции, «знающие» про все элементарные объекты, из которых прибор состоит, но сейчас для нас важны не подробности, а макроскопические картины. С учетом прибора первый из только что обсуждавшихся случаев эволюции выглядит как

$$|\uparrow\rangle_{э}\,|\text{посередине}\rangle_{э}\,|\square\rangle_{п} \longrightarrow |\uparrow\rangle_{э}\,|\text{пролетает сверху}\rangle_{э}\,|\Uparrow\rangle_{п}.$$

Получилось, возможно, несколько тяжеловесно, но зато информативно. Здесь $|\Uparrow\rangle_{п}$— состояние прибора, в котором стрелка сместилась вверх, а «э» для ясности напоминает об электроне. Аналогично другой вариант эволюции системы «электрон плюс прибор» происходит по схеме

$$|\downarrow\rangle_{э}\,|\text{посередине}\rangle_{э}\,|\square\rangle_{п} \longrightarrow |\downarrow\rangle_{э}\,|\text{пролетает снизу}\rangle_{э}\,|\Downarrow\rangle_{п}.$$

Собственно говоря, по возникшим состояниям прибора $|\Uparrow\rangle_{п}$ и $|\Downarrow\rangle_{п}$ мы и различаем две ситуации — две возможности для спина электрона. Смысл формул понятен, а сами формулы приятно близки к картинкам. Мы даже дополнительно упростим запись, чтобы было легче следить за главным: уберем оттуда пространственную часть состояния электрона. Только что приведенный вариант развития событий тогда будет записываться просто как $|\downarrow\rangle_{э}\,|\square\rangle_{п} \rightarrow |\downarrow\rangle_{э}\,|\Downarrow\rangle_{п}$.Пространственное же положение электрона предлагается просто держать в уме (оно однозначно восстанавливается по состоянию прибора). Это, возможно, не очень благодарно по отношению к движению, которое сыграло здесь роль приводного ремня от спинового состояния электрона к индикации прибора, но простота записи того стоит.

Формулы остаются прозрачными и столь же простыми, но с их «пониманием» возникают немалые проблемы, как только мы направим на вход прибора электрон, приготовленный в состоянии с определенным значением компоненты спина не вдоль вертикального направления *z*, а вдоль направления *x*. [262] В соответствии с тем, как нарисовано направление *x* на рис. 11.2, я продолжаю использовать обозначение $|\swarrow\rangle$ для состояния

СО СПИНОМ ВДОЛЬ *x*. Оно выражается, как мы видели, через два состояния «спин вверх» и «спин вниз» в виде их суммы: $|\swarrow\rangle_{э} = |\uparrow\rangle_{э} + |\downarrow\rangle_{э}$. Вспоминая еще и про прибор и раскрывая скобки, мы получаем начальное состояние полной системы «электрон плюс прибор»: $|\swarrow\rangle_{э}|\square\rangle_{п} = |\uparrow\rangle_{э}|\square\rangle_{п} + |\downarrow\rangle_{э}|\square\rangle_{п}$. Здесь записано, что у электрона нет определенного спинового состояния вдоль направления *z*, а прибор еще не сработал.

И вот главное, оно же максимально странное. Гамильтониан говорит волновой функции, как ей изменяться во времени, а если ему требуется сказать это сумме слагаемых, то он «говорит» с каждым по отдельности, после чего результаты надо сложить. А это значит, что в любой сумме волновых функций/состояний каждое слагаемое эволюционирует во времени независимо от другого или других: эволюция тоже оказывается *суммой*. Поэтому начальное состояние нашей системы «электрон плюс прибор» развивается во времени вот как:

$$|\uparrow\rangle_{э}|\square\rangle_{п} + |\downarrow\rangle_{э}|\square\rangle_{п} \longrightarrow |\uparrow\rangle_{э}|\Uparrow\rangle_{п} + |\downarrow\rangle_{э}|\Downarrow\rangle_{п}.$$

### *Стоп! Как это понимать?*

В результате эволюции, управляемой уравнением Шрёдингера, справа от стрелки спин вверх взял себе в компанию состояние прибора $|\Uparrow\rangle_{п}$, а спин вниз — состояние прибора $|\Downarrow\rangle_{п}$. Возникли два состояния прибора — со стрелкой вверх и со стрелкой вниз, — присутствующие *параллельно* в один и тот же момент времени. Добрались мы до этого описания событий с помощью простых рассуждений, основанных на принципах обращения с волновой функцией, включая уравнение Шрёдингера. Однако, исходя из всего опыта наших наблюдений, такой ситуации — прибора, находящегося в двух состояниях одновременно, — *никогда не случается*.

### *Правило раскрытия скобок приводит к странным выводам*

Уравнение Шрёдингера, несомненно, прекрасная вещь, раз позволяет находить допустимые энергии электронов в атомах и много чего еще. Но, следуя ему и всем сопутствующим правилам, в первую очередь правилу раскрытия скобок, мы получили два различных «сосуществующих» состояния прибора. В отношении электрона мы готовы были согласиться с тем, что он может существовать в состоянии без определенного значения спина вдоль выбранного направления, потому что у нас нет способа увидеть это состояние непосредственно. Но за прибором мы отказываемся признавать такую возможность, потому что прибор — часть нашего макроскопического мира, про который мы на основе опыта знаем, что вещи там всегда находятся в каком-то одном состоянии.

Сам Шрёдингер нашел способ подчеркнуть возникающее здесь недоумение, используя для этого кошку. Соединяя его метод с измерениями спина, которыми мы сейчас заняты, рядом с прибором Штерна — Герлаха следует поместить клетку с подопытным животным, оснащенную устройством, приобретаемым за дополнительную плату. Если электрон влетает в прибор в состоянии со спином вверх, то смещение индикатора вверх вызывает срабатывание устройства, умертвляющего подопытного быстродействующим ядом. Если же на входе в прибор случился электрон в состоянии со спином вниз, то ничего неприятного не происходит и питомец остается целым и невредимым. Вот эти два варианта:

$$|\uparrow\rangle_{\text{э}}\,|\text{спит}\rangle_{\text{к}} \longrightarrow |\uparrow\rangle_{\text{э}}\,|\text{умерла}\rangle_{\text{к}},$$
$$|\downarrow\rangle_{\text{э}}\,|\text{спит}\rangle_{\text{к}} \longrightarrow |\downarrow\rangle_{\text{э}}\,|\text{жива}\rangle_{\text{к}}.$$

Пока нет ничего знаменательного, кроме жестокого обращения с животными; но если на вход поступил электрон в состоянии $|\swarrow\rangle_{\text{э}} = |\uparrow\rangle_{\text{э}} + |\downarrow\rangle_{\text{э}}$, то эволюция по Шрёдингеру есть просто сумма двух только что записанных эволюций:

$$|\swarrow\rangle_{\text{э}}\,|\text{спит}\rangle_{\text{к}} \to |\uparrow\rangle_{\text{э}}\,|\text{умерла}\rangle_{\text{к}} + |\downarrow\rangle_{\text{э}}\,|\text{жива}\rangle_{\text{к}}.$$

*Запутанные кошки в природе не наблюдаются*

В возникшем состоянии нельзя сказать ничего определенного ни про спин электрона, ни про благополучие кошки. Можно сказать только, что ↑ и «умерла» составляют одну ветвь событий, а ↓ и «жива» — другую. (И *нет* комбинаций крест-накрест, таких как ↓ и «умерла».) Спиновое состояние электрона запутывается с состоянием кошки. Проблема в том, что такие запутанные кошки нам не встречаются, но непонятно, как «вычеркнуть» состояния электрона и оставить только какое-то одно состояние подопытного животного. И что вообще с ним происходит?

$$|\swarrow\rangle_{\text{э}}\,|\text{спит}\rangle_{\text{к}} \longrightarrow |\uparrow\rangle_{\text{э}}\,|\text{умерла}\rangle_{\text{к}} + |\downarrow\rangle_{\text{э}}\,|\text{жива}\rangle_{\text{к}}.$$

Реальные опыты с прибором Штерна — Герлаха ставились намного большее число раз, чем эксперименты с кошками. Что же, *согласно опыту*, происходит в приборе Штерна — Герлаха, измеряющем спины вдоль вертикального направления *z*, когда туда влетает электрон, приготовленный в состоянии с определенным спином в направлении *x*? В реальности случается *или* одно, *или* другое:$|\Uparrow\rangle_{\text{п}}$ или $|\Downarrow\rangle_{\text{п}}$,причем при повторении опыта эти два исхода чередуются случайно, а в данном случае — с равной вероятностью, поэтому в достаточно длинной последовательности оба исхода случаются примерно одинаковое число раз, например $\Uparrow, \Downarrow, \Downarrow, \Uparrow, \Downarrow, \Downarrow, \Uparrow, \Downarrow, \Uparrow, \Uparrow, \Downarrow, \Downarrow, \Uparrow, \Downarrow, \Uparrow, \Uparrow, \Downarrow, \Uparrow, \Uparrow, \Downarrow, \Downarrow, \Downarrow, \Downarrow, \Downarrow, \Uparrow, \Uparrow, \Uparrow, \Uparrow, \Uparrow, \Uparrow, \ldots$.Это значит, что каким-то образом *реализуется* или состояние электрона со спином вверх, или состояние со спином вниз. Наблюдения над квантовым миром говорят, что в нем нет детерминизма: одна и та же система при повторных испытаниях ведет себя по-разному. Единичный результат опыта поэтому непредсказуем, но при большом числе реализаций одной и той же ситуации оказывается, что «выпадение» различных исходов регулируется определенными вероятностями. Радиоактивное ядро распадается с некоторой вероятностью в течение заданного времени: в наборе идентичных ядер одни случайным образом распадутся, а другие нет. Случайность встроена в квантовый мир, и *законы* этой случайности проявляют себя в наблюдениях. Описание мира вынужденно ограничивается задачей предсказания вероятностей.

Это значит, что и уравнение Шрёдингера надо каким-то образом соединить с вероятностным описанием мира. Однако уравнение Шрёдингера *ничего про вероятности не знает* — это детерминистское уравнение, оно однозначно определяет волновую функцию в будущем, если известно, какая она сейчас (и, само собой, задан гамильтониан). Кроме того, оно — часть формальной математической схемы и само по себе ничего не говорит о том, что мы можем наблюдать в природе, когда желаем проверить свои теоретические выводы. Мы отмечали, что абстракция волновых функций имеет формальные сходства с таким менее абстрактным явлением, как волны. Но в «настоящих волнах» нет ничего похожего на вероятности. Тот факт, что для соответствия с наблюдаемым миром уравнение Шрёдингера должно каким-то образом вовлекать *вероятности,* — гром среди ясного неба с точки зрения аналогии между волновой функцией и настоящими волнами.

*Уравнение Шрёдингера — это еще не всё. В нем нет вероятностей*

*****

**Правило Борна.** «Добавление» вероятностей к уравнению Шрёдингера известно как правило Борна. Технически оно выглядит несложно; сложнее оказалось понять, что это правило «означает».

Правило Борна — одна из ключевых составляющих квантового описания природы. Я уже пользовался этим правилом несколько раз, надеясь не привлекать к нему слишком большого внимания. Пора сознаться в этом нарушении и представить объяснения. Несколько туманная формулировка, что, находясь в состоянии $10 \cdot |q_1\rangle + 0{,}1 \cdot |q_2\rangle$, электрон «предпочтительно присутствует в точке $q_1$ по сравнению с в точкой $q_2$», в действительности имеет точный смысл. Много раз создавая электрон в таком состоянии и измеряя его положение, мы будем обнаруживать его в точке $q_1$ с относительной вероятностью $10^2$ и в точке $q_2$ с относительной вероятностью $(0{,}1)^2$. Если оставить на время в стороне некоторые тонкости, то правило Борна говорит, что коэффициенты перед различными слагаемыми в волновой функции надо возводить в квадрат, в результате получатся (относительные) вероятности [263]. В уже встречавшемся нам состоянии $|\uparrow\rangle_э |\text{умерла}\rangle_к + |\downarrow\rangle_э |\text{жива}\rangle_к$ коэффициенты перед каждым из двух слагаемых одинаковы, поэтому исходы (жива или умерла) будут встречаться с 50%-ной вероятностью. Если же электрон влетает в прибор в состоянии $\sqrt{3}/2 \cdot |\uparrow\rangle + 1/2 \cdot |\downarrow\rangle$, то эволюция, включающая кошку, приведет к состоянию $\sqrt{3}/2 \cdot |\uparrow\rangle_э |\text{умерла}\rangle_к + 1/2 \cdot |\downarrow\rangle_э |\text{жива}\rangle_к$, согласно которому вероятности оказаться мертвой или живой равны 75% и 25% (два коэффициента в волновой функции уже выбраны так, что их квадраты — настоящие, а не относительные вероятности, равные 3/4 и 1/4).

Отложенная на время тонкость состоит вот в чем. Правило работает так просто, если все исходы взаимоисключающие. Дело так и обстоит, когда исходы — возможные значения какой-либо физической величины, взятые поодиночке, например — чтобы отвлечься от спина — различные значения энергии (которых, как правило, много или бесконечно много). Другой пример взаимоисключающих исходов — электрон в одной из неперекрывающихся областей в пространстве. Если электрон находится в состоянии $a \cdot |\text{в области 1}\rangle + b \cdot |\text{в области 2}\rangle + c \cdot |\text{в области 3}\rangle$, то его можно обнаружить в этих областях с (относительными) вероятностями $a^2$, $b^2$, $c^2$. При этом, например,

вероятность обнаружить его или в области 1, или в области 2 получается простым сложением: она равна $a^2 + b^2$. Две части волновой функции описывают
здесь *взаимоисключающие* события, которые никаким образом друг на друга не влияют, а потому и вероятности их определяются каждой частью волновой функции по отдельности. Но если области 1 и 2 перекрываются, то вероятность, что электрон окажется в любой из них, отражает факт этого перекрытия: она равна $a^2 + b^2 + 2 \cdot (\text{число}) \cdot ab$. По поводу того, как определить появляющееся здесь число, исходя из вида волновой функции, имеются ясные математические указания; они и выражают, насколько значителен эффект перекрытия. Для произвольных состояний $|\text{состояние } 1\rangle$ и $|\text{состояние } 2\rangle$ это число обозначают как $\langle\text{состояние } 2 | \text{состояние } 1\rangle$ и во всех случаях, когда оно не равно нулю, говорят, что эти два состояния *интерферируют*. Интерферирующие части волновой функции не определяют вероятности поодиночке, а дают еще и *совместный* вклад в вероятности. Краткий итог: правило Борна предельно просто в формулировке и применении, когда состояния не интерферируют, и требует кое-какой дополнительной математики, когда интерферируют.

*****

**Главная тайна квантовой механики.** Предложенное Борном в 1926 г. правило «вычислять квадраты» ни разу не подвело на практике. Идея принесла ее автору Нобелевскую премию (в 1954 г.). С тех пор появилось много работ, в которых с разных точек зрения показано, что ничем, кроме квадрата, вероятности определяться и не могут. Однако «все просто» только задним числом. Для начала статью Борна, в которой утверждалась связь волновой функции с вероятностями, не приняли к публикации в журнале, куда она была первоначально направлена. Она вышла в другом журнале, и случившееся промедление сыграло ключевую роль: Борн успел исправить свое первоначальное утверждение. Вывод, сформулированный в статье, состоял в том, что вероятность пропорциональна самой волновой функции. Текст остался без изменения, но при корректуре (т.е. в самый последний момент перед собственно *печатью*) было добавлено примечание, состоящее из одной фразы: «Более тщательный анализ показывает, что вероятность пропорциональна квадрату [волновой функции]».

К правилу Борна надо относиться как к закону природы: это обобщение наблюдений, которое отлично работает. Это вообще-то довольно удивительная привязка волновой функции, управляемой детерминистским уравнением, к вероятностной природе мира. Но это и на редкость непонятный закон природы. Вероятности *чего*? Того, что случится один из возможных результатов. Но вот логическая цепочка, заводящая в странное место. Если волновая функция — это какая-то сумма $a \cdot |q\rangle + b \cdot |r\rangle + c \cdot |s\rangle + \ldots$, а $q$, $r$, $s$ и т.д. — это возможные значения некоторой величины (например, количества движения или энергии), то «случиться» может факт обнаружения (измерения) одного из этих значений, например $q$. *Уже случившееся* перестает быть одной из возможностей — оно становится фактом. Одновременно с этим все остальные возможности $r$, $s$ и т.д. перестают быть возможностями; они не реализовались. Но факт о состоянии мира после измерения должен быть отражен в волновой функции. Та волновая функция, в которой содержались различные потенциальные возможности, больше не имеет отношения к изучаемой системе, а имеет отношение *только* та ее часть, которая соответствует свершившемуся результату, $a \cdot |q\rangle$. Все остальные слагаемые $b \cdot |r\rangle + c \cdot |s\rangle + \ldots$ в волновой функции должны исчезнуть, просто заменившись на нуль.

### *Проблема измерения: чем оно отличается от других процессов?*

А это плохая новость, потому что такое изменение волновой функции — «схлопывание» от суммы к одному слагаемому — *не может описываться уравнением Шрёдингера*. Но сейчас будет еще хуже. «Выпадение» одного варианта из нескольких или многих приводит к отрицанию уравнения Шрёдингера всякий раз, когда… — когда *что*? Когда мы измеряем какую-то величину (компоненту спина; энергию; …), вынуждены заключить мы. Но, внимание, что такое *измерение*? Надо полагать, это нечто, производимое с помощью макроскопического прибора: поскольку сами мы макроскопические, мы можем судить о том, какой исход случился, по положению стрелки прибора, по пятну в определенном месте на фотопластине или по чему-то подобному. Кажется поэтому, что когда электрон вступает во взаимодействие с прибором, по существу становясь его частью, — вот тогда все и «случается»: прибор фиксирует определенное значение измеряемой величины, а волновая функция схлопывается в то состояние, которое отвечает измеренному значению. Однако откуда система из электронов, нейтронов и протонов знает, во-первых, что такая-то их конфигурация делится на исследуемую систему и измерительный прибор и, во-вторых, что именно сейчас, оказывается, *измеряется* компонента спина вдоль конкретного направления? Мы едва ли готовы думать, что обычное взаимодействие между изначально выбранным электроном и прочими электронами и протонами, составляющими прибор, начинает управляться особыми законами, стоит нам только решить, что сейчас происходит измерение. Сделаем еще одну попытку выкрутиться: быть может, какие-то особые законы, отличающиеся от «регулярных» квантово-механических, действуют для «большого» — макроскопического — прибора? Но если так, то где граница, на которой законы квантовой механики теряют силу и заменяются на что-то еще? Основой работы прибора в принципе может быть небольшое число простейших объектов, у которых нет шансов избежать эволюции по Шрёдингеру [264]. Где именно, спрашивается, надо перестать пользоваться уравнением Шрёдингера? (И *чем* тогда пользоваться?!)

Вне квантового мира подобные сложности не возникают, потому что там нет состояний с несколькими возможными значениями какой-либо величины и, соответственно, нет проблемы, как описать *переход* системы в состояние, отвечающее *одному* измеренному значению. Измерение там всего лишь фиксирует свойство, которое система имела и «сама по себе», до измерения. В квантовой же механике измерение сопровождается стягиванием потенциальных возможностей к одной актуальной; это *меняет* состояние системы, но способ, которым система переходит в новое состояние, непонятен. Это непонятное включает в себя и несколько тревожащую нелокальность. Например, электрон, имеющий возможность распространяться из одной точки в другую различными путями — скажем, через несколько отверстий, проделанных в экране, — описывается решением уравнения Шрёдингера, в котором все возможности его распространения присутствуют одновременно, каждая со своим коэффициентом. Измерение же координаты электрона может обнаружить его, например, проходящим через отверстие номер 3. Непосредственно перед измерением имелась вероятность обнаружить его проходящим через любое из отверстий, но одновременно со срабатыванием детектора вблизи отверстия 3 начисто исчезают шансы обнаружить его вблизи отверстий 1 и 2: волновая функция, которая содержала в себе возможности обнаружения электрона в разных местах в пространстве, внезапно изменилась и в той части, которая касается отверстий 1 и 2. Но каким же способом электрон, попавшийся в один из детекторов, передает в окрестности других детекторов (которые могут находиться *далеко*) информацию «в этот раз я точно не у вас»?

Правило Борна тем не менее *работает*: его практическое применение к результатам измерений неизменно сопровождается успехом, несмотря на зияющие логические дыры и, по словам Белла, «непрофессионально расплывчатое и неоднозначное в истолковании» понимание измерений, сопутствующее этому правилу. Со времени создания квантовой механики мы были свидетелями «столетия успеха» (без малого столетия в тот момент, когда я это пишу). Физики при этом в массе своей следовали рецепту «заткнись и вычисляй», что означает «решай уравнение Шрёдингера и применяй правило Борна в *подходящих* случаях, но не задавай уточняющих вопросов». Этот рецепт долго пользовался, да и продолжает пользоваться популярностью отчасти из-за практических обстоятельств, отчасти из-за авторитета Бора (который еще появится за следующим поворот этой прогулки); Бор не приветствовал дискуссий по поводу смысла квантовой механики за пределами близких ему идей (возможно, полагая, что его собственных дискуссий с Эйнштейном на эту тему было достаточно). Рецепт остается полностью пригодным для *применения* квантовой механики, но его массовое внедрение в качестве руководства для *понимания* квантовой механики сыграло свою роль в том, что имеющиеся проблемы не обсуждались, а заметались под ковер и ситуация с пониманием далека от идеала.

### *Волновая функция — не поле в пространстве*

А проблема не одна. Сама волновая функция — это ненаблюдаемый абстрактный объект; более того, она даже не задана в физическом трехмерном пространстве. Например, волновая функция, описывающая атом гелия, зависит от трех точек в пространстве — положений двух электронов и ядра; зависимость от одной из них (положения ядра) можно изгнать несложным математическим трюком, но и после этого остается волновая функция $\Psi(q_1,q_2)$, зависящая от двух точек. Да, она полностью определяется уравнением Шрёдингера, но спрашивать, каково ее значение, можно только указав *две* точки. Решив уравнение Шрёдингера, мы *ничего* не сможем сказать в ответ на вопрос, каково значение этой функции в какой-то выбранной точке $q$. В отличие, скажем, от магнитного поля, у волновой функции просто нет никакого значения ни в какой точке физического пространства [265]. Эту сложность с самого начала полностью осознавал Шрёдингер, и на это же место нажимали и все критики его волновой механики. И не только критики, но и те, кто сразу высоко ее оценил. В феврале 1927 г., т.е. примерно через год после появления уравнения Шрёдингера, Эйнштейн писал Лоренцу:

Квантовая теория подверглась полной шрёдингеризации, из-за чего имеет много практических успехов. Но это тем не менее не может быть описанием реального процесса. Здесь тайна.

*Причина успеха полной шрёдингеризации — тайна*

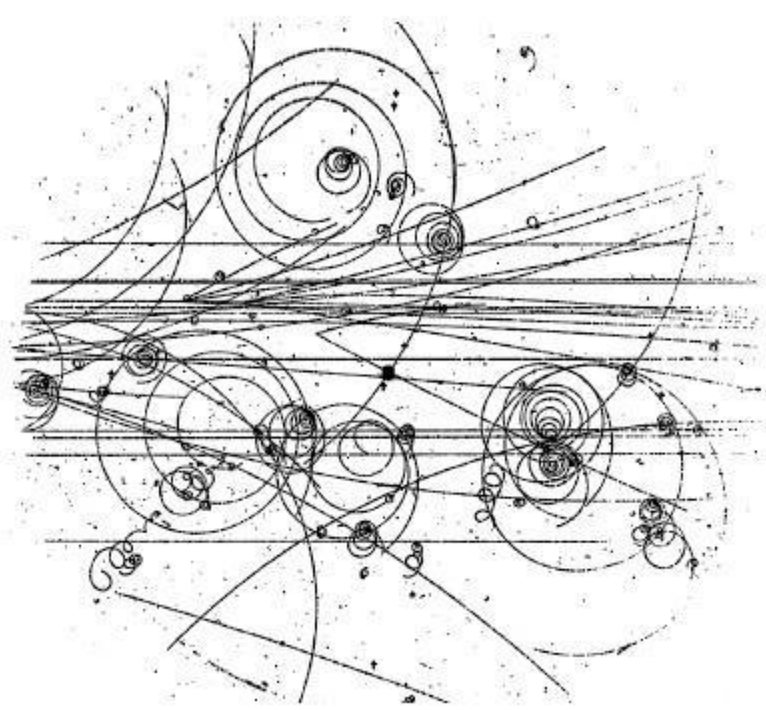


**Рис. 11.3.** Треки элементарных частиц в пузырьковой камере. Пролетающие заряженные частицы вызывают испарение жидкости, предварительно приведенной в метастабильное состояние; возникающие в жидкости микроскопические пузырьки разрастаются до размеров, позволяющих их сфотографировать

Нелегко придать смысл теории, в которой не постулируется совсем ничего, что «населяло» бы наше пространство и допускало бы определенную степень локализации. Мы настаиваем на том, чтобы имело смысл говорить о *локальных* элементах реальности (таких как электроны, протоны, нейтроны, а заодно мюоны и все остальные), относительно самостоятельно существующих в нашем трехмерном пространстве и вступающих в разнообразные взаимодействия друг с другом [266]. Толщина треков элементарных частиц, наблюдаемых в пузырьковых камерах (рис. 11.3), в десятки тысяч раз больше размеров атома, но все же движение каждой частицы — это череда событий в пространстве, очевидным образом отделенных от аналогичных событий, происходящих с другими частицами. Если одновременно с этим мы считаем, что ничего, кроме волновой функции, в самой теории не требуется, то именно из волновой функции должны тем или иным образом следовать утверждения о положении и движении чего-либо в пространстве — где, однако, сама волновая функция не определена. «Понимание» квантовой механики требует мостиков от абстракций к чему-то наблюдаемому, в терминах чего, собственно, мы и собираемся описывать мир. Предложения по организации такого понимания называются *интерпретациями* квантовой механики. Как устроены эти «мостики» и *что имеет место в реальности*? Представителем каких элементов реальности вообще является волновая функция? Это — Главная тайна квантовой механики.

На этом заканчивается абстрактная часть и начинается сложная часть этой квантовой прогулки.

*****

**Реальны все!.**Аспирант Уилера по имени Хью Эверетт III ушел из науки даже не после защиты диссертации, а за некоторое время до (правда, имея на руках написанную диссертацию) и трудоустроился на сверхсекретную аналитическую работу в интересах Пентагона [267]. Черновик же его диссертации Уилер рискнул отвезти весной 1956 г. в Копенгаген, чтобы обсудить там с Бором. Основу работы составляла идея, что никакого схлопывания волновой функции никогда не происходит. Никакие альтернативы, содержащиеся в волновой функции, не отмирают; наоборот, каждая из них одинаково реальна и «равнореально» *происходит*. С волновой функцией вообще ничего экстрашрёдингеровского никогда не случается, она развивается во времени детерминистски и несет в себе все возможности. Просто — всего лишь — Вселенная делится на несколько себе подобных, в зависимости от числа альтернатив. Запутанное состояние электрона и прибора

$|\uparrow\rangle_э|\Uparrow\rangle_п + |\downarrow\rangle_э|\Downarrow\rangle_п$, встречавшееся нам ранее, для Эверетта означает, что прибор поделился на две версии и относительно состояния электрона $|\uparrow\rangle_э$ он находится в состоянии $|\Uparrow\rangle_п$, а относительно состояния $|\downarrow\rangle_э$ — в состоянии $|\Downarrow\rangle_п$. Каждому из слагаемых в сумме, сколько бы их ни было в более сложных случаях, отвечает своя вселенная, со своей версией наблюдателя, которому кажется, что наблюдаемая система перешла в одно из собственных состояний физической величины, которую измеряет прибор. Остальные вселенные *отщепляются*, контакт с ними оказывается затрудненным до степени полной его потери. В зависимости от некоторых деталей такие взгляды называют эвереттовской или многомировой интерпретацией квантовой механики [268].

### *Эверетт: происходит всё, только мы видим одно*

Не очень понятно, на что рассчитывал Уилер: Бор был лидирующей фигурой в формулировании и пропаганде *копенгагенской* интерпретации квантовой механики [269]. Согласно этой системе взглядов, для придания смысла квантовому миру *требуется* мир классический, т.е. измерительные приборы, подчиняющиеся детерминистским, а не вероятностным законам, потому что никаких других приборов у макроскопических нас быть не может. Про свойства квантовой системы вообще можно говорить лишь постольку, поскольку указан экспериментальный метод их выявления. Внимательный анализ показывает, что некоторые методы нельзя применять одновременно; взаимная несовместимость определенных методов отражает несовместимость (на этих прогулках — «вражду») некоторых свойств. Эти наблюдения Бор развил в активно продвигавшуюся им идею *дополнительности*, временами понимаемую очень широко, практически на философском уровне. В экспериментах над природой дополнительность проявляет себя в том, что пользоваться можно только чем-то одним из взаимно дополнительных друг другу инструментов, а потому и говорить о взаимно дополнительных свойствах явлений можно только по очереди. В частности, одни эксперименты, использующие определенные инструменты, показывают, что квантовые объекты проявляют свойства волны, тогда как другие эксперименты с другими приборами свидетельствуют о наличии у тех же объектов свойств локализованных частиц (обстоятельство, выражаемое довольно расплывчатым понятием «корпускулярно-волновой дуализм»); и эти эксперименты мешают друг другу, их нельзя совместить. Есть и еще одна немаловажная подробность, которая прочно ассоциируется с копенгагенским пониманием квантовой механики, несмотря на то что сам Бор избегал ее упоминания: это тезис, что при взаимодействии с макроскопическим прибором волновая функция действительно выходит из подчинения уравнению Шрёдингера и схлопывается («коллапсирует», как это обычно называют) в зависимости от того, что измерил прибор. Поскольку измеряет он значение какой-либо физической величины, процесс измерения корежит волновую функцию так, что она переходит в одно из *собственных* состояний измеряемой величины — в то, которое отвечает именно измеренному значению; и случается это заведомо не по Шрёдингеру, а как-то еще (безжалостная математика запрещает коллапс для волновой функции, подчиняющейся уравнению Шрёдингера).

*Коллапс не может регулироваться уравнением Шрёдингера*

За этими взглядами стоял авторитет Копенгагена как места, связанного с созданием и разработкой квантовой механики, и, конечно, авторитет и активность самого Бора. В ключевом 1925 г. ему было 40 лет (а к моменту путешествия Уилера с диссертацией Эверетта на руках — уже 70), и, хотя он не был соавтором самых основополагающих работ эпохи Sturm und Drang, он во многом являлся вдохновителем и, как бы сейчас сказали, «лицом» построения квантовой механики в духе матричной механики Гайзенберга и проповедником дискретности квантового мира (а также дополнительности во взглядах на происходящее там) [270]. Копенгагенское понимание в значительной мере утвердилось по итогам дискуссий Бора с Эйнштейном о логической непротиворечивости и полноте квантовой теории. И тем не менее в его рамках так и не появилось ясного определения измерения или критерия того, какое взаимодействие считается измерением; не пояснялся и механизм схлопывания волновой функции, когда она временно (!) перестает подчиняться уравнению Шрёдингера. Деление природы на квантовый и классический миры осложнялось очевидной и уже упоминавшейся проблемой: *вообще-то* прибор состоит из того же, из чего квантовые системы, и к нему *вообще-то* надо применять общие для всех квантовые правила — *или же* заявить, что это не общие правила, но тогда провести границу. Как вообще *возникает* мир, где вещи ведут себя классически, если каждая деталь внутри него ведет себя квантово? Фон Вайцзеккеру принадлежит высказывание — сделанное, впрочем, уже на рубеже 1960–1970-х гг. — о том, что копенгагенская интерпретация сама нуждается в интерпретации. Применение логической схемы, не имеющей в своей основе четкого определения, требует умения приводить менее формальные, но убедительные аргументы, и Бору это определенно удавалось.

Идеи Эверетта Бор принял в штыки, потому что они противоречили копенгагенской интерпретации по нескольким ключевым пунктам. Общим, правда, был немаловажный тезис, что волновая функция дает максимально полное описание мира и кроме нее ничего не требуется; вероятно, на этом и основывались надежды Уилера. Но при всех попытках Уилера смягчить позицию Эверетта и представить его идеи как *развитие* копенгагенской интерпретации основное направление его мысли не вызвало у Бора больших иллюзий. Надо сказать, и Эверетт в письме к редактору научного журнала, написанном примерно год спустя, тоже не выбирал выражений:

Копенгагенская интерпретация непоправимо неполна из-за своей изначальной зависимости от классической физики… равно как и из-за своего философского уродства, когда «реальность» признается за макроскопическим миром, но в ней отказывают миру малого. Эверетт предлагал последовательно лишить макроскопические приборы и вообще классический мир статуса подпорки мира квантового; все приборы и наблюдатели систематически описываются у него как часть мира, управляемого квантовой механикой (слова «прибор» и «наблюдатель» следует при этом понимать как примерно одно и то же, во всяком случае, в наиболее распространенных вариантах эвереттовской интерпретации). Нет ничего, кроме эволюции по Шрёдингеру, и, конечно, нет никакого коллапса волновой функции в результате измерения; он объясняется просто как субъективный опыт наблюдателей.

### *В самой ранней Вселенной нет места для классических приборов*

По итогам переписки Уилера и Эверетта — вероятно, не самой приятной для обеих сторон — Эверетт представил к защите радикально сокращенный вариант диссертации. Научную степень он получил, уже работая военным аналитиком, а полный вариант диссертации увидел свет лишь много позднее. К развитию своих идей про делящиеся вселенные Эверетт больше не возвращался [271]. В то время опубликованные им работы прочли очень немногие, и его идеи пребывали в относительной безвестности; на них снова обратили внимание после 1970 г. Вклад в их популярность, с тех пор только набирающую силу, внесло и развитие квантовой космологии. В очень ранней квантовой Вселенной неоткуда взять макроскопические приборы, подчиняющиеся детерминистским законам и *не* являющиеся частью исследуемой квантовой системы; копенгагенское понимание квантовой механики оказывается там неприменимым даже в принципе, независимо от отношения к ее «философскому уродству». Интерес к многомировой интерпретации оживил и Дойч (один из основоположников теории квантовых вычислений), высказавший мнение, что квантовый компьютер *потому* бывает таким эффективным, что вычисления в нем выполняются в нескольких параллельных вселенных (впрочем, в той области знания едва ли найдется заявление сходного размаха, которое не подверглось бы критике со стороны других ученых; одна из написанных в ответ Дойчу статей выразительно называется «Квантовому компьютеру требуется всего одна вселенная»).

Позиция Эверетта выглядит безукоризненно логичной, особенно если принять идею — центральную для эвереттовских подходов в различных вариантах, — что волновая функция *полна* с информационной точки зрения, т.е. дает полное описание происходящего в мире. Если так, то делению волновой функции на несколько частей должно соответствовать и деление мира на столько же частей. На каждое состояние электрона, $|\uparrow\rangle$ или $|\downarrow\rangle$, — по своему «относительному» состоянию прибора, $|\Uparrow\rangle$ или $|\Downarrow\rangle$, и по своей версии наблюдателя, который получил определенный результат и которому при этом кажется, что волновая функция электрона «схлопнулась» в одно определенное состояние, $|\uparrow\rangle$ *или* $|\downarrow\rangle$. (При этом трудно не обратить внимание на количество параллельных миров, которые должны были накопиться с учетом имеющегося возраста Вселенной, — миров, где распался не этот, а вот тот радиоактивный атом, а какой-нибудь электрон, пролетая мимо протона, не привязался к нему, образовав полноценный атом водорода, а улетел прочь, чтобы попытать счастья со следующим протоном, и т.д.)

Но в многомировых подходах требуется показать, каким образом каждый наблюдатель, «блуждающий» по ветвлениям вселенных, приобретает убеждение, что доступный ему мир управляется вероятностными законами, причем вероятности в точности таковы, как если бы применялось правило Борна. Единственная возможность для появления вероятностей в многомировых интерпретациях — субъективный опыт наблюдателя. В памяти каждого наблюдателя фиксируется развитие событий, которое, как стремился показать Эверетт, эквивалентно тому, что описывается коллапсом волновой функции. Но действительно ли этот наблюдатель будет воспринимать мир вероятностным — точно таким, каким его воспринимают все те, кто «просто» применяет правило Борна и убежден, что измерение сопровождается коллапсом волновой функции? Сложности тут можно подчеркнуть мысленным экспериментом, продолжающим традицию жестокого обращения с животными. Наблюдатель поставлен в ситуацию, когда ему предлагается на выбор поместить своего любимого кота в один из двух ящиков, А или Б. Рядом с ящиками по-прежнему расположен прибор, анализирующий компоненту спина электрона. Если окажется, что она направлена вверх, то смертельная доза яда распыляется в ящике А; если вниз — то в ящике Б (рис. 11.4). А теперь (внимание!) на вход прибора поступает электрон в состоянии $|\uparrow\rangle + 2 \cdot |\downarrow\rangle$. Бор, окажись он со своим котом в такой ситуации, поместил бы его в ящик А, без доли сомнения руководствуясь правилом Борна: относительные вероятности, что прибор измерит компоненту спина вверх или вниз, равны $1^2 = 1$ и $2^2 = 4$. Таким образом, питомец, помещенный в ящик А, получит яд с вероятностью в четыре раза меньшей, чем питомец в ящике Б. Конечно, эти вероятности не так много значат, когда один-единственный кот подвергается риску только один раз, и итог одного испытания может оказаться любым, но наблюдатель из г. Копенгаген по крайней мере может утешать себя тем, что руководствовался рациональной доктриной и сделал для благополучия животного все, что было в его силах.

*Вселенная-то делится. А как получить вероятности?*

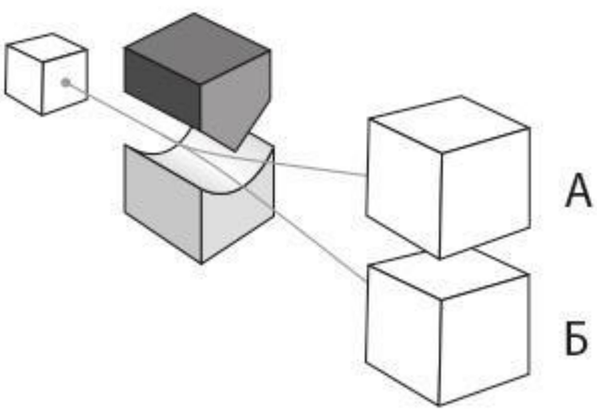



**Рис. 11.4.** Прибор, состоящий из двух магнитов разной формы, создает неоднородное магнитное поле, которое отклоняет электроны вверх или вниз в зависимости от компоненты спина вдоль вертикальной оси

Но для наблюдателя, разделяющего взгляды Эверетта, все ветвящиеся версии развития событий *одинаково реальны* [272]. Ему доподлинно известно, что в результате опыта *непременно возникнут два* кота: один живой и один мертвый; рядом с каждым будет присутствовать и свой вариант наблюдателя: один, возможно, захочет покормить животное, другой же будет озабочен тем, как его похоронить. На основе какого рассуждения тогда предпочтительнее запереть кота в ящике А? Каким вообще образом рационально действующий наблюдатель придет к заключению, что квадраты коэффициентов перед различными частями волновой функции выражают вероятности всех событий, которые будут проходить перед глазами его копий, раз за разом переходящих из очередной родительской вселенной в дочерние? Оказывается, что в подходе, вообще никак не апеллирующем в своей формулировке к вероятностям, для решения такой задачи все равно требуются некоторые дополнительные предположения, более или менее правдоподобные и/или сильнее или слабее замаскированные; из-за этого схема теряет по крайней мере часть того изящества и законченности, на которые она претендовала сначала. Сам Эверетт считал, что вывел правило Борна как руководство, которому должен следовать рациональный наблюдатель в «типичной» вселенной (одной из тех, которых подавляющее большинство и которые не отмечены слишком особенными совпадениями ряда факторов), но его рассуждений в действительности недостаточно. Из одного только математического формализма, имеющего дело с волновой функцией, не могут следовать «мостики» к физическому миру; они должны появляться как дополнения к этому формализму.

Для самого Эверетта реальность всех частей волновой функции, соединенных знаком плюс, выражалась среди прочего в *принципиальной* возможности их взаимной интерференции в будущем. За интерференцию двух волновых функций или двух частей волновой функции $|\text{часть}_1\rangle$ и $|\text{часть}_2\rangle$ отвечает математически определенное число $\langle\text{часть}_1|\text{часть}_2\rangle$, выражающее, если следовать правилу Борна, степень их совместного вклада в производство вероятностей, а в многомировых интерпретациях — степень влияния различных миров друг на друга (в некотором роде — биений между ними). Последователи Эверетта (сторонники большинства вариантов многомирового понимания квантовой механики) считают альтернативные миры полностью отсоединенными друг от друга. Кроме того, у них заметно сократилось количество ситуаций, в которых Вселенная делится. Это происходит только тогда, когда ветви волновой функции не могут снова интерферировать, в том числе и *в будущем*. Точнее говоря, требуется даже не строгое равенство нулю числа $\langle$ветвь

1 | ветвь 2⟩, отвечающего за интерференцию двух ветвей; достаточно, чтобы оно было пренебрежимо малым. Необходимость знать, может ли

Оно оказаться заметно ненулевым когда-нибудь в будущем (что можно в принципе выяснить из уравнения Шрёдингера), несколько усложняет задачу. Расхождению ветвей волновой функции сильно способствует число вовлеченных частиц: для макроскопических объектов (например, кошки) волновая функция зависит от $10^{24}$ или большего числа аргументов (скажем, точек в пространстве), а для интерференции с другой ветвью волновой функции необходимо, чтобы зависимости двух ветвей от каждого аргумента точно соответствовали друг другу. Серьезное препятствие такому соответствию — взаимодействие любой из этих $10^{24}$ частиц с любым другим «внешним» объектом (не кошкой). Произвольные изменения, которые в результате такого взаимодействия случатся в одной ветви волновой функции, радикально уменьшают степень их интерференции; поэтому версии макроскопических объектов и «расходятся» по своим вселенным.

Можно ли *доказать* наличие параллельных вселенных? Дойч высказывал надежду, что это можно сделать на основе наблюдений за работой квантового компьютера. Свежий поворот темы предложил Тегмарк:

Как-то раз вечером, когда я подвозил Джона [Уилера] с работы в… пансионат для престарелых, где он жил, я с воодушевлением принялся рассказывать ему о совершенно безумной идее, которая как раз перед тем пришла мне в голову… Вообще, я много размышлял о том, можно ли придумать эксперимент, который убедил бы вас в реальности эвереттовских параллельных вселенных, и в конце концов его придумал.

Тегмарк предлагает соединить прибор, измеряющий направление спина, с ружьем; если измерение показывает спин вверх, то ружье без промедления стреляет — настолько быстро, что человек не может зафиксировать никакого временного интервала между исходом эксперимента и выстрелом. Если же измерение определяет спин вниз, то механизм срабатывает столь же быстро, но всего лишь издает громкий щелчок; ружье остается взведенным, через секунду на вход поступает новый электрон и все повторяется. Все электроны на входе в прибор приготовлены, разумеется, в состоянии, где нет определенного значения компоненты спина вдоль выбранного направления, скажем $|\uparrow\rangle + |\downarrow\rangle$.

Наблюдатель, следящий за работой такого устройства с безопасного расстояния в пару метров, а точнее, *прислушивающийся* к его работе, будет фиксировать случайную последовательность звуков выстрела и щелчков, вроде «бах, щелк, щелк, щелк, бах, бах, щелк, щелк, бах, щелк, щелк, бах» и т.д. Каждый раз, когда он слышит «бах», другой вариант того же наблюдателя в только что отделившейся вселенной, *как мы теперь знаем*, слышит «щелк», и наоборот. И вот главное в предложении Тегмарка: вы (именно и лично вы, а не помощник или робот, которого вы отправили фиксировать показания) теперь не просто наблюдаете за экспериментом, а приставляете к дулу свою голову. Равнодушная к вам и вашим близким Вселенная ветвится как всегда: в одной (непременно!) происходит «бах» с последствиями, в другой (столь же непременно и столь же реально) «щелк» без больших последствий. В одной, стало быть, вы больше ничего не воспринимаете, а в другой прекрасно себя чувствуете. Воспринимающий вы остаетесь только в одной из ветвей; вы каждый раз существуете в том из двух вариантов вселенной, где случается «щелк». *Там* эксперимент через секунду повторяется, снова возникают две вселенные, и вы снова *продолжаете* воспринимать окружающую действительность только в одной из них. Вашими ушами происходящая последовательность событий воспринимается как «щелк, щелк, щелк, щелк, щелк, щелк, щелк, щелк, щелк, щелк, щелк, щелк» и т.д. Пережив таким образом достаточно длинную серию испытаний, вы, без сомнения, убеждаетесь в реальности эвереттовских параллельных вселенных [273].

*Квантовое бессмертие — доказательство параллельных вселенных?*

В другой раз (видимо, еще до изобретения этого убедительного метода доказательства) Тегмарк спросил Уилера, действительно ли тот верит в квантовые параллельные вселенные. «Я стараюсь найти время, чтобы верить в них по понедельникам, средам и пятницам», — ответил Уилер.

*****

**Часть и целое.** Состояния системы из нескольких частей, которые Эверетт трактует как относительные состояния, чаще называют запутанными; мы возвращаемся к ним, потому что более близкое знакомство с ними того стоит. Слово ввел Шрёдингер в 1935 г.:

Я бы назвал это не просто *каким-то* свойством, но [главным] отличительным свойством квантовой механики, которое вызывает полный разрыв с классическим мышлением. В результате взаимодействия две [волновые функции] становятся запутанными.

В этом слове, ставшем термином, всегда подразумевается «запутанные друг с другом»: речь идет о системе, состоящей из двух или более частей, и «запутываются» волновые функции этих частей. Запутанных состояний страшно много, запутанность в том или ином виде рутинно возникает в результате взаимодействия различных частей системы друг с другом и имеет в своей основе законы сохранения: скажем, если полное количество движения в системе равно нулю, то, как бы ни разошлись ее части, оно остается равным нулю — пока, конечно, не случится взаимодействие с чем-то внешним; тогда в запутанность вовлекаются дополнительные участники, и в реальности за перераспределением запутанности быстро становится невозможно уследить. При обсуждении запутанности и ее свойств, как правило, имеется в виду как раз та ситуация, где взаимодействия с внешним миром не происходит и (две) частицы остаются запутанными только между собой, да еще способом, который мы им назначаем [274].

Запутанность демонстрирует непривычные взаимоотношения части и целого: из максимально полного знания о системе в целом не следует знания о состоянии ее частей — даже если эти части находятся так далеко друг от друга, что давно перестали взаимодействовать, а потому описание системы в целом, казалось бы, должно просто сводиться к описанию ее частей. Своими рассуждениями о запутанности Шрёдингер откликнулся на опубликованную ранее в том же году статью Эйнштейна, Подольского и Розена: они обратили внимание, что две частицы (два «электрона») могут оказаться в таком состоянии, что измерение координаты одной из них — скажем, частицы 2 — однозначно определит, какой результат получится при измерении координаты частицы 1, а если вместо координаты измерить количество движения частицы 2, то станет точно известно количество движения частицы 1; речь при этом идет о *соответствующих* (т.е. враждующих) координате и компоненте количества движения. К моменту, когда проводятся измерения, частицы находятся на сколь угодно большом расстоянии друг от друга и никакими сигналами не обмениваются. Возможность на выбор определить или координату, или количество движения частицы 1, ничем *на нее не воздействуя*, вызывает беспокойство, потому что частица 1 не может одновременно иметь точное положение и точное значение количества движения; но как ей не иметь и того и другого, если при любом варианте действий с частицей 2 — измерять ли ее координату или количество движения — частица 1 демонстрирует точное значение выбранной величины?

## *Электрон что-то утаивает?*

Такие запутанные состояния пары частиц, как и другие на них похожие, с тех пор неизменно называются ЭПР-состояниями, по фамилиям трех авторов первой статьи на эту тему. Современная популярность таких состояний определяется тем, что это основа квантовой телепортации (которую мы обсудим отдельно) и квантовых вычислений, но в середине 1930-х гг., после публикации Эйнштейна с соавторами, едва ли кто-нибудь еще, кроме Шрёдингера, проявил к ним интерес. Характерные интонации звучат в его переписке с Эйнштейном летом того же 1935 г.:

> Я тут забавляюсь тем, что, добираясь до сути ваших аргументов, будоражу самых разных умнейших людей: Лондона, Теллера, Борна, Паули, Сциларда, Вейля. Лучший из всех ответ я получил от Паули, который по крайней мере признает, что использование слова «состояние» для пси-функции — практика довольно сомнительная. Что же касается опубликованных откликов, которые я видел, то они менее выразительные… Картина такая, как если бы один человек сказал: «В Чикаго страшно холодно», а другой ответил: «Это заблуждение! Во Флориде очень жарко».

Цель самих ЭПР (видимо, не очень удачно выраженная в опубликованном тексте и потом пояснявшаяся Эйнштейном в частных сообщениях) состояла в том, чтобы указать на возможную *неполноту* копенгагенской интерпретации квантовой механики — на тот факт, что за кадром вполне могли остаться какие-то элементы описания природы, не охваченные волновой функцией. Если в волновую функцию «не помещаются» координата и количество движения одновременно, но электрон, подобно ученику, отвечающему на заранее неизвестный вопрос на экзамене, способен проявить знание и об одном, и о другом (*хотя и только по отдельности*), то, быть может, существует какой-то другой механизм, не связанный с волновой функцией, который точно определяет и координаты, и количества движения?! Что-то вроде шпаргалки, которую ученик умело скрыл от посторонних глаз, но которой руководствуется в своих ответах? На поставленные ЭПР вопросы взялся отвечать Бор; он так или иначе отбился от критики (хотя и не самым последовательным образом, как потом сам признавал), и обсуждение темы, в общем, заглохло. В 1951 г. к ней вернулся Бом в своей книге по квантовой механике, но и тогда большой вспышки интереса не произошло. По стечению обстоятельств незадолго до того Бом, систематически подозревавшийся в симпатиях к коммунизму, был арестован за отказ давать показания Комиссии по расследованию антиамериканской деятельности; когда он вышел из-под ареста, ему отказали в продлении контракта с Принстонским университетом, что разрушило имевшиеся планы на продолжение его сотрудничества с Эйнштейном. Бому, более того, пришлось уехать из США, а затем даже отказаться от гражданства. Потом все поменялось, но это было *потом*.

Бом перенес доводы ЭПР на случай спина электрона. Рассуждать в терминах спина оказалось проще. Требуются два электрона. Чтобы не путать их состояния, стоит присвоить им номера: $|\,\rangle_1$ и $|\,\rangle_2$. Нас интересуют только *спиновые* части; пространственную часть волновой функции двух электронов снова проще подразумевать, чем выписывать явно. Мы будем подразумевать, кроме того, что электроны разлетелись в разные стороны подальше друг от друга. Среди спиновых состояний двух электронов есть, например, такое: $|\uparrow\rangle_1\,|\nearrow\rangle_2$. *Читаем*, что здесь написано: первый электрон находится в состоянии с компонентой спина вдоль вертикального направления $z$, а второй — в состоянии с компонентой спина в сторону, противоположную направлению $x$ (см. рис. 11.2). Если по каким-то причинам нам хочется выразить происходящее в терминах компонент спина вдоль вертикального направления, то мы запишем это же состояние как $|\uparrow\rangle_1(|\uparrow\rangle_2 - |\downarrow\rangle_2)$, где можно раскрыть скобки, в результате чего получится $|\uparrow\rangle_1\,|\uparrow\rangle_2 - |\uparrow\rangle_1\,|\downarrow\rangle_2$. Перезапись, конечно, ничего не меняет, и вообще это была разминка. Но теперь посмотрим на как будто бы похожую конструкцию

$|\uparrow\rangle_1 |\downarrow\rangle_2 - |\downarrow\rangle_1 |\uparrow\rangle_2$.

Это и есть ЭПР-состояние системы из двух электронов: запутанное состояние, которое само по себе ясно определено, но ни про спин первого, ни про спин второго электрона нельзя сказать ничего определенного! В отличие от только что приведенного «разминочного» состояния, в ЭПР-состоянии *нет* такой вещи, как спиновое состояние электрона 2 (как, разумеется, и электрона 1) относительно какого бы то ни было направления: это и не $|\uparrow\rangle$, и не $|\nearrow\rangle$, и не $a \cdot |\uparrow\rangle + b \cdot |\downarrow\rangle$ (ни с какими числами $a$ и $b$); спиновое состояние одного электрона просто не определено, хотя система в целом находится в ясно определенном состоянии.

*Про спин каждой из запутанных частиц нельзя сказать ничего определенного*

Попытаемся тем не менее выяснить что-нибудь, измерив спин электрона 2. В результате его взаимодействия с прибором вся система из двух электронов и прибора окажется в состоянии $|\uparrow\rangle_1 |\downarrow\rangle_2 |\Downarrow\rangle_{п} - |\downarrow\rangle_1 |\uparrow\rangle_2 |\Uparrow\rangle_{п}$. Независимо от своих предпочтений в понимании квантовой механики — делящиеся вселенные, или коллапс волновой функции, или еще какая-то интерпретация — наблюдатель зафиксирует *один* из двух случаев: $|\uparrow\rangle_1 |\downarrow\rangle_2 |\Downarrow\rangle_{п}$ или $|\downarrow\rangle_1 |\uparrow\rangle_2 |\Uparrow\rangle_{п}$. Первый из них означает, что *измерили* спин электрона 2 и получили результат «вниз», а с электроном 1 ничего не делали, но он как-то «сам собой» безальтернативно оказался в состоянии со спином «вверх». Во втором случае для электрона 2 получили при измерении спин «вверх», и, хотя к электрону 1 никто даже не приближался, он оказался в состоянии со спином «вниз». А ведь до этих действий с электроном 2 про спин электрона 1 нельзя было сказать ничего определенного. По правилу Борна, кстати, вероятность получить каждый из двух вариантов $|\uparrow\rangle_1\,|\downarrow\rangle_2$ и $|\downarrow\rangle_1\,|\uparrow\rangle_2$ равна 50% (потому что квадрат минус единицы равен единице); поэтому до измерений у нас нет совсем никаких прогнозов по поводу спина, который мы измеряем первым, но каким бы он ни оказался в результате измерения, спин другого электрона гарантированно направлен противоположным образом. И это еще не все! Из того, как записано наше ЭПР-состояние, может показаться, что выбранное вертикальное направление играет какую-то существенную роль, — но это только кажется. Дело в том, что, выбрав *любое* направление в пространстве, мы можем выразить состояния «вверх» и «вниз» для каждого электрона через состояния «вперед» и «назад» вдоль этого нового направления. Несложная математика устроена так, что *то же самое* ЭПР-состояние запишется в виде $|\text{вперед}\rangle_1\,|\text{назад}\rangle_2 - |\text{назад}\rangle_1\,|\text{вперед}\rangle_2$, где мы снова видим комбинацию двух противоположно направленных спинов, но теперь для *произвольного* направления в пространстве! А это означает, что, измерив спин электрона 2 вдоль какого-то направления, мы будем уверены, что электрон 1 находится в состоянии с противоположным спином вдоль того же направления. И это — для произвольно выбранного направления!

Здесь и сосредоточен источник беспокойства, аналогичный таковому в исходной формулировке Эйнштейна, Подольского и Розена: электрон 1 не может иметь определенные значения спина вдоль двух различных направлений, но готов демонстрировать *предсказуемое* значение спина вдоль любого направления, стоит нам только измерить спин электрона 2 вдоль этого направления — притом что мы вообще не трогаем электрон 1. Расстояние между двумя электронами *не имеет значения*, оно вообще никак не задействовано в механизме этого фокуса, он происходит «сам собой». Следует ли, выражаясь словами Эйнштейна, видеть тут «нечистую силу, пугающую нас действием на расстоянии» (spooky action at a distance)?

Остановимся коротко на животрепещущем попутном вопросе: если в системе из двух частиц одна немедленно откликается на действие, произведенное над другой, то значит ли это, что мы обошли с фланга теорию относительности и можем посылать сигналы быстрее света? Нет, не можем, потому что спин электрона 2 (как и электрона 1) в ЭПР-состоянии *не определен* и не в нашей власти повлиять на то, получится ли при первом измерении спин «вперед» или «назад». Никакой чудесной передачи информации таким образом не получается (попробуйте-ка передать ответ «да» или «нет», используя клавиатуру, где клавиши и пересылаемые символы *никак* не коррелированы).

### *Обман теории относительности не предусмотрен*

Еще надо оговориться, что ЭПР-пара в качестве предсказателя спина на расстоянии — система железно надежная, но одноразовая: предсказание сбывается только один раз после того, как ЭПР-пару приготовили. Если же после первого измерения спинов не отпускать электроны по своим делам, а продолжить измерять их спины вдоль каких-то других направлений, то никакой корреляции между результатами больше наблюдаться не будет [275]. Это, однако, не умаляет чуда, происходящего при первом измерении.

«Коммуницируют» ли между собой два электрона, запутанные в ЭПР-пару, как только измерили спин одного из них? Обмениваются практически мгновенными сигналами на расстоянии? Или же, кроме информации, содержащейся в волновой функции $|\uparrow\rangle_1 |\downarrow\rangle_2 - |\downarrow\rangle_1 |\uparrow\rangle_2$, имеется и какая-то дополнительная информация («шпаргалка»), которую электроны приобретают в момент создания ЭПР-пары и благодаря которой они «заранее знают», какие направления спинов будут демонстрировать, если попадут в измерительные приборы? [276] Любая такая информация называется скрытыми переменными или скрытыми параметрами, где слово «скрытые» — тоже фактически термин и означает «не учитываемые в волновой функции». *Если* электроны в ЭПР-паре действительно несут с собой скрытые параметры, то, значит, квантовая механика, имеющая дело только с волновой функцией, *неполна*. В таком случае она может быть чрезвычайно полезной и даже необходимой теорией, подобно тому, как полезно и часто необходимо рассматривать большие собрания молекул лишь статистически, имея дело с вероятностями, но эти вероятности тогда происходят не из основ мироустройства, а от незнания (а оперирующая ими теория — не фундаментальная). Неполнота, собственно, и была предметом беспокойства Эйнштейна, выраженного в ЭПР-статье; создатель теории относительности, с ее максимальной скоростью распространения любых воздействий, определенно не был склонен к другой альтернативе — нелокальности, т.е. мгновенной коммуникации между электронами на расстоянии после первого измерения [277].

### *Существуют ли свойства объектов независимо от наблюдений?*

Вообще-то соблазнительно думать, что значения различных величин, которые частицы проявляют при измерениях, присвоены им, частицам, независимо от нашего каприза измерить одну или другую величину где-то в отдаленной части мира. Допущения такого типа поддерживаются идеями *реализма*. В широком смысле это убеждение, что свойства объектов существуют независимо от того, наблюдает их кто-то или нет; мир, другими словами, существует во всей своей полноте независимо от нас. Предыдущий опыт развития науки систематически указывал, что дело обстоит именно так. Но философские убеждения вынужденно уступают экспериментальным фактам, если таковые появляются. Выяснилось, что про наличие или отсутствие скрытых параметров можно высказать содержательное суждение, даже (почти) ничего не предполагая о механизме, который их производит. Правда, случилось это только в 1964 г., уже после смерти Шрёдингера; можно только пожалеть, что этого не произошло раньше.

Со времени появления статьи ЭПР и переписки Эйнштейна со Шрёдингером (в ходе которой, кстати, и возникла идея шрёдингеровской кошки) до возвращения к этой теме Бома прошло 15 лет. Это был период развития квантовой теории вширь и вглубь, а кроме того, и годы, пришедшиеся на Вторую мировую войну, поэтому не очень удивительно, что вопросы «объяснения» (интерпретации) того, что и так *работало*, отошли на второй план. Но и до следующего шага прошло еще 13 лет, в течение которых господствовало копенгагенское понимание квантовой механики и едва ли кто-нибудь всерьез интересовался «лишними» тонкостями. В 1964 г., однако, Белл понял, что кое-что из предполагаемого о скрытых параметрах в ЭПР-паре можно *проверить*, если задавать двум запутанным электронам более широкий круг вопросов по поводу не только точных, но и лишь частично сбывающихся предсказаний. Белл догадался, как извлекать информацию из неточных ответов, и, что оказалось совсем неожиданным, обнаружил существование четкого «экзаменационного критерия». Если очень вольно провести аналогию с некоторыми современными методами получения информации, то Белл сумел извлечь больше из статистики частично неточных ответов, чем из строго обоснованных «да/нет». Полученный им критерий стал известен как неравенство Белла, но часто говорят и о неравенствах Белла во множественном числе, включая в это понятие и те, которые были получены в развитие собственно первого неравенства Белла.

Как же работает и что показывает придуманный Беллом «тест на скрытые параметры»?

*****

**Ловушка Белла.** Чтобы повторить рассуждения Белла, нам понадобятся помощники. Созданием ЭПР-пар у нас будет заниматься Петр, а с измерениями над электронами ему помогают Анна и Яков (рис. 11.5; на одной из более ранних прогулок, совсем в другой, хотя тоже непростой, жизненной ситуации Петя уже оказывался примерно на полдороге между Аней и Яшей). Для разминки они проверяют, что стопроцентная корреляция действительно имеет место там, где ее и ожидают, — при измерении спинов двух ЭПР-электронов вдоль одного и того же направления. Петя весь день производит ЭПР-пары так, что электроны разлетаются в противоположные стороны, один к Ане, а другой к Яше [278]. Отправив очередную пару, Петя каждый раз шлет обгоняющую электроны радиограмму, в которой сказано, вдоль какого направления Аня с Яшей должны измерять спин в этот раз. Аня выполняет свое измерение первой. Результат ее измерения непредсказуем, но, как только *какой-то* результат получен, Аня делает предсказание о том, как направлен спин Яшиного электрона (а именно противоположно тому, что она получила в ходе своего измерения), и записывает это предсказание. Почти сразу после ее измерения Яша измеряет спин своего электрона (вдоль того же направления, указанного Петей) и тоже записывает результат. Они повторяют свои измерения в течение всего рабочего дня, а вечером встречаются за ужином или по зуму. Аня показывает список своих предсказаний о том, какое направление спина должен был определить Яша. Это случайный набор вроде $-1_{70°}$, $+1_{90°}$, $+1_{60°}$, $+1_{90°}$, $+1_{50°}$, $-1_{30°}$, $-1_{40°}$, $-1_{20°}$, $+1_{80°}$, $+1_{0°}$, $-1_{30°}$, $-1_{0°}$, $+1_{50°}$, $-1_{0°}$, $+1_{50°}$, $-1_{30°}$, $-1_{20°}$, $+1_{50°}$, $+1_{90°}$, $-1_{0°}$, $+1_{50°}$, $+1_{50°}$, $-1_{30°}$, $-1_{80°}$, $+1_{70°}$, $-1_{60°}$, $+1_{50°}$, $+1_{30°}$, $-1_{10°}$, $-1_{70°}$, …, где Аня на всякий случай указала углы, под которыми каждый раз был ориентирован прибор в соответствии с указаниями, полученными от Пети; друзья заранее договорились, что каждый измеренный результат «вперед», неважно, вдоль какой прямой, это +1, а результат «назад» это –1. Это намного упрощает дело по сравнению с использованием настоящих значений $+1/2\ \hbar$ и $-1/2\ \hbar$, а смысл тот же: при каждом измерении получается одно из двух взаимно противоположных чисел. Яша показывает список своих измерений, который оказывается в точности таким же. Причина нам уже известна: волновую функцию ЭПР-пары можно с равным успехом переписать в виде

$|\text{вперед}\rangle_1\,|\text{назад}\rangle_2$ –

$|\text{назад}\rangle_1\,|\text{вперед}\rangle_2$ для *любого* направления в пространстве, и

если Аня обнаружила электрон в состоянии $|\text{вперед}\rangle$, То Яша без вариантов получает свой электрон в состоянии

$|\text{назад}\rangle$.

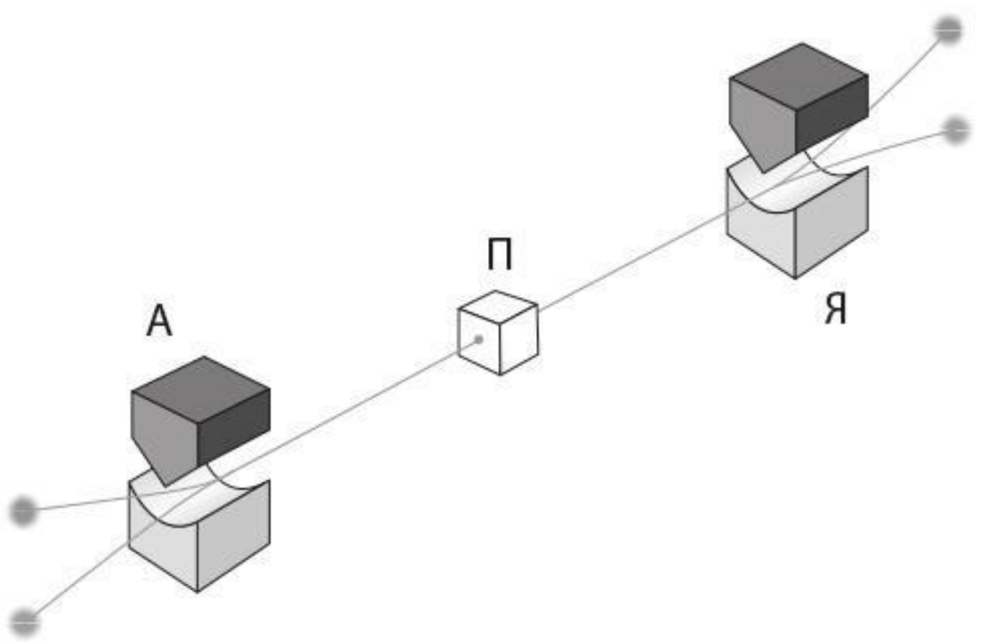



**Рис. 11.5.** Схема эксперимента с разлетающимися в противоположные стороны электронами, запутанными в ЭПР-состояние

Ночью Аня не может заснуть, размышляя над тем, были ли у электронов определенные спиновые состояния *до* измерений: электроны ведь *уже* находились в пути, когда, обгоняя их, пришла радиограмма, вдоль какого направления измерять спин, после чего Яшин электрон продемонстрировал «знание» о том, какой результат получила Аня для своего электрона, — хотя сами по себе результаты ее измерений чередуются случайно. Заодно Аня вспоминает, что убеждение в независимом существовании вещей и их свойств называется реализмом, задумывается, в каких отношениях состоят ЭПР-электроны с реализмом, и засыпает. Наутро Аня и Яша меняют тактику: они *рассогласовывают* направления, вдоль которых измеряют спины электронов. Каждый выбирает свое направление для измерения спина, после чего опыт повторяется много раз без изменения этих направлений (радиограммы от Пети теперь нужны разве что для того, чтобы придать всему происходящему более организованный характер). Аня по-прежнему пытается предсказывать спин Яшиного электрона как противоположный тому, который она измерила для своего электрона, но из-за рассогласования направлений теперь временами ошибается. Хитрость Белла состоит как раз в том, чтобы правильно обработать эти ошибки.

### *Среднее показывает, как коррелируют результаты А. и Я.*

Ошибочность или точность Аниных предсказаний в каждой серии экспериментов — для пары направлений, которые выбрали они с Яшей, — определяется числом, которое показывает, как *коррелируют* полученные ими результаты. Чтобы получить это число, в каждом опыте следует взять произведение (результат А.) · (результат Я.), а затем сложить такие произведения по всей серии опытов — и поделить сумму на число опытов в серии. Получится *среднее* значение от произведения результатов Ани и Яши. Если почти на каждый результат +1 у Ани приходится результат –1 у Яши, а на каждый –1 у Ани приходится +1 у Яши, то в сумме появится много слагаемых (–1) · (+1) = –1 и среднее будет близко к –1. Если же при выпадающих у Ани плюс единицах Яша получает плюс единицы и минус единицы примерно поровну, то в сумме возникнет примерно одинаковое число плюс единиц и минус единиц, из-за чего среднее окажется близким к нулю. Какое среднее в действительности получается в каждой серии опытов, выразительным образом зависит от угла между направлениями, которые выбрали Аня и Яша (рис. 11.6) [279].

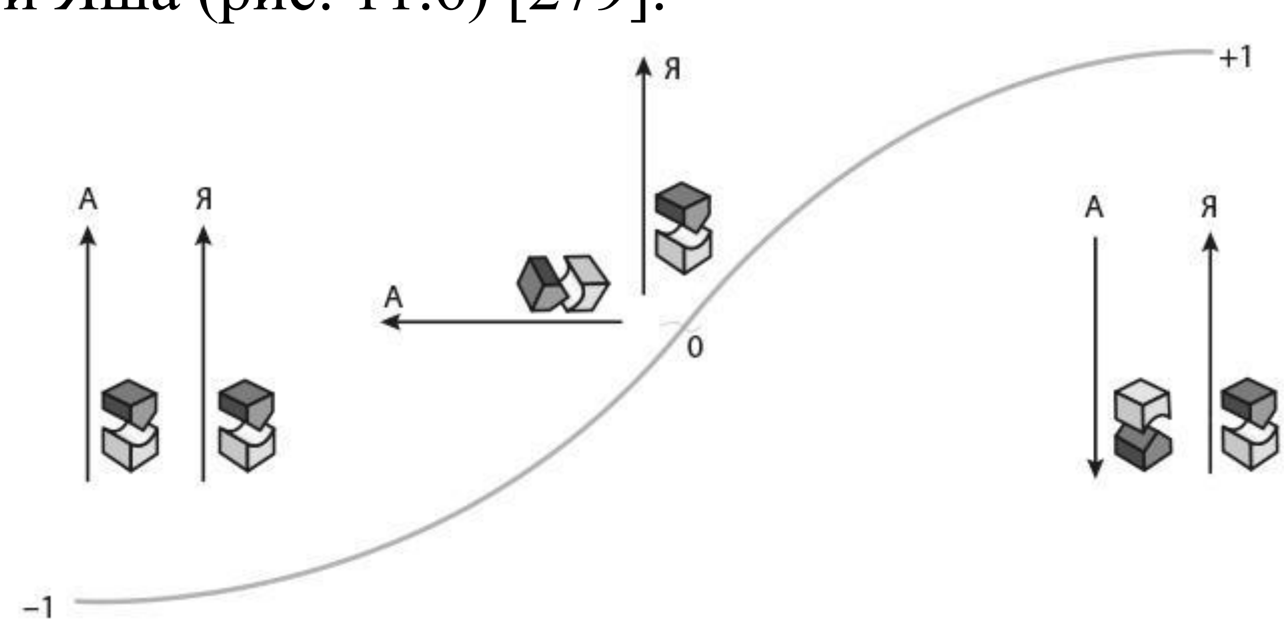


**Рис. 11.6.** Стрелки, обозначенные А и Я, показывают направления, вдоль которых измеряются спины двух электронов в ЭПР-паре. Угол между этими направлениями определяет, каким получится среднее от произведений результатов Ани и Яши. Это среднее выражает степень корреляции между двумя измерениями. *Слева:* угол между двумя направлениями близок к 0°, и среднее близко к –1. Это означает, что два спина почти всегда противоположны. *В центре*: направления перпендикулярны, и среднее равно нулю, корреляция между направлениями спинов отсутствует. *Справа:* угол между двумя направлениями близок к 180°, среднее близко к +1

## *Это общие допущения о том, как могут возникать скрытые параметры*

Проникнувшись идеями реализма, Аня хочет объяснить все корреляции между результатами измерений тем, что уже в момент создания каждой ЭПР-пары электроны получили инструкции о том, какой спин покажет каждый из них при любом измерении, которому он может подвергнуться. Механизм, раздающий эти скрытые инструкции, должен демонстрировать требуемую степень случайности, ведь измерение, которое делает Аня, случайным образом дает +1 («вперед») или –1 («назад»). Чем и как регулируется эта случайность, Аня не знает, но готова допустить сколько угодно чередующихся вариантов с любым распределением вероятностей. Это значит, что если все возможные варианты «сговора» между двумя электронами собрать в список, то каждый пункт из списка — с номером 1, или 5, или 333, или любым другим — активируется с некоторой вероятностью (непрерывная нумерация «вариантов сговора» тоже возможна, я не буду на этом останавливаться). Далее, в каждом из таких пунктов определено собственно содержание сговора: записаны инструкции для каждого электрона. Первый электрон получает инструкцию «если тебя спросят, каков твой спин в направлении *c*, отвечай…», и это для *каждого* направления *c* в пространстве. Ответами могут быть, конечно, только +1 или –1, но выбор между тем и другим может как угодно зависеть от направления. Второй электрон одновременно с этим получает похожие инструкции со своими собственными предписаниями для различных направлений. Каким изощренным способом устроены эти инструкции, мы не знаем, но если такой механизм работает, то среднее от произведения (результат А.) · (результат Я.), конечно, зависит от его настроек. Вычисление среднего в этом случае включает в себя и «усреднение по вероятностям» — по тем, с которыми выпадают различные пары инструкций. *Наверное*, думает Аня, возможны такие инструкции и такое распределение вероятностей различных инструкций, что для средних от результатов измерений получатся в точности те же значения, что и при применении правила Борна.

И правда же, результаты для среднего можно предсказать исходя из правила Борна! Те, кто применяет правило Борна, даже не покидают собственного дома и уж тем более не вникают в заботы Эйнштейна о действии на расстоянии или неполноте; они глухи к удивлению Шрёдингера; они равнодушны к идеям реализма или локальности, к тому, носят ли электроны свои свойства с собой, или же их свойства возникают «в момент измерения»; они не интересуются тем, является ли коллапс волновой функции фактом или иллюзией; они никак не комментируют «смысл» или «происхождение» вероятностей в квантовой механике — они, другими словами, «заткнулись и вычисляют». Но если, продолжает Аня, работа скрытого механизма приведет к тем же результатам, что и правило Борна, то это полностью снимет напряжение по поводу действия на расстоянии: никакой передачи информации от одного электрона к другому не требуется, электроны уважают идеи реализма и в момент создания ЭПР-пары обзавелись шпаргалками, в которых записаны все значения спинов, которые они могут проявить при измерениях.

Но такие шпаргалки невозможны. Беллу пришла в голову мысль, что «настоящие» квантовые средние (средние по состоянию с использованием правила Борна) и «поддельные» средние (неизвестный механизм со встроенными в него вероятностями назначает спины ЭПР-электронам) могут не совпасть, как ни настраивай скрытый механизм. Белл обнаружил границу, за которую не может выйти *никакая* локальная схема по раздаче скрытых параметров. Дополнительного удивления заслуживает тот факт, что провести такую границу несложно, надо только взять не одно среднее, а несколько; их можно обработать таким образом, что скрытый механизм, каким бы он ни был, перестанет справляться. Вот что нужно делать [280]:

1. Аня выбирает для измерения спина какое-то направление $a$, а Яша — какое-то направление $b$. Они проводят серию опытов и вычисляют среднее от произведения (результат А.) · (результат Я.) для этой серии. То, что получится, надо как-то обозначить, пусть это будет Среднее($a, b$).

2. Яша меняет направление на какое-то другое, $b'$. Снова долгая серия опытов и снова среднее, уж какое получится, от произведения полученных результатов. Для этого среднего используем обозначение Среднее($a, b'$).

Это еще не все, что надо сделать, но уже начинает просматриваться коварная стратегия Белла: нужна определенная вариативность откликов. Ничего пока не подозревающая Аня продолжает вместе с Яшей:

3. Теперь Аня меняет свое направление на какое-то другое, $a'$, но Яша возвращается к первому, т.е. $b$. Среднее по серии этих опытов фигурирует под обозначением Среднее($a'$, $b$).

4. И Аня, и Яша переходят на свои «новые» направления, т.е. $a'$ и $b'$, и вычисляют Среднее($a', b'$).

Несколько однообразно? Пожалуй, но вот и кульминация. Воспользуемся средними, полученными во всех четырех сериях, сложим три из них и вычтем четвертое: Среднее($a, b$) + Среднее($a, b'$) + Среднее($a', b$) — Среднее($a', b'$).
[281] *Если* все средние в этой комбинации являются результатом «сговора» двух электронов, т.е. представляют собой «подделку», основанную на скрытом механизме раздачи предустановленных спинов, то полученная величина лежит в пределах от –2 до +2.

## *Неожиданно! Но доказать несложно*

Это небольшое чудо стоит пережить еще раз: независимо от того, как именно работает скрытый механизм, при любых инструкциях для любых направлений и при любых сменах инструкций с любыми вероятностями, как и при любом выборе направлений $a$, $a'$, $b$ и $b'$, указанная комбинация четырех средних не может выйти за пределы –2 и +2. После того как это утверждение сформулировано, доказать его несложно — это *простая* теорема. Утверждения типа «лежит в фиксированном интервале» (скажем, от –2 до +2) и называются неравенствами Белла.

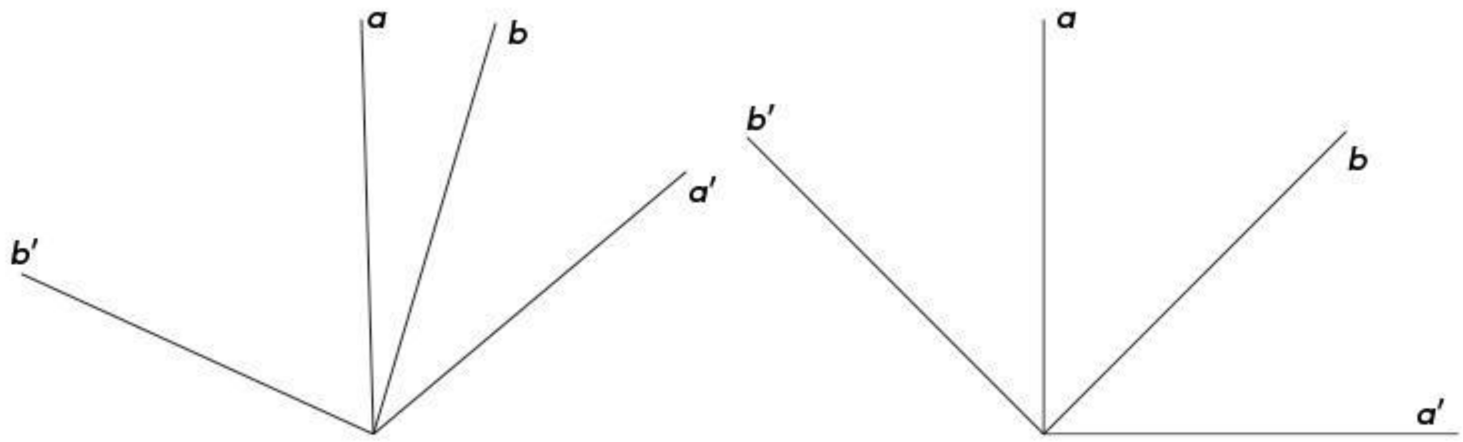



**Рис. 11.7.** Измерения спинов в ЭПР-паре. Направления $a$ и $a'$ используются по очереди при измерениях спина одного из электронов, а $b$ и $b'$ — при измерениях спина другого электрона. *Слева:* пример взаимной ориентации. *Справа:* направления выбраны так, что обеспечивают максимальное нарушение неравенства Белла — CHSH (все углы между соседними прямыми равны 45°)

Из правила Борна тем временем следует вполне определенная зависимость средних от углов; в интересующей нас комбинации четырех средних распоряжаться можно тремя углами между направлениями $a$, $a'$, $b$ и $b'$ (рис. 11.7 слева). Не для всех, но для большого множества углов комбинация четырех средних принимает значения, большие чем 2. Максимальное ее значение равно $2\sqrt{2}$, что превышает границу Белла в $\sqrt{2} \approx 1{,}414$ раза, и достигается оно в конфигурации, показанной на рис. 11.7 справа.

Средние по ЭПР-состояниям, вычисленные по правилам квантовой теории, нарушают неравенства Белла. Открытие Белла состояло в такой системе «контрольных вопросов», что из вида ответов можно было сделать заключение о наличии шпаргалки, неважно, насколько тщательно прописанной.

*****

**Основные подозреваемые.** *Нарушение* неравенств Белла не означает, что Белл «был в чем-то неправ»; он нашел эти неравенства как ограничение, которому с необходимостью подчиняются «подделки» под необычное квантовое поведение, обеспеченные «обычными» средствами (запутанные частицы получают локальные свойства, не помещающиеся в волновой функции, а распределение возможностей подчиняется некоторому вероятностному закону). Математический аппарат квантовой механики — применение правила Борна для вычисления среднего по состоянию — приводит к нарушению этих неравенств. Две теоретические схемы оказались в очевидном конфликте. *Что же верно на самом деле*?

В 1970-х гг. вопрос из абстрактно-теоретического начал превращаться в *экспериментальный*. Первые опытные проверки давались с большими усилиями и приносили не всегда железно убедительные результаты. Вместо электронов обычно используются фотоны, у которых тоже два спиновых состояния (в привычных нам терминах они проявляют себя как поляризация света). Я вынужден игнорировать подробности, потому что они потребовали бы отдельной Экспериментальной прогулки; а в таком случае я могу и дальше смело рассуждать про электроны. Новую главу открыли в начале 1980-х эксперименты под руководством Аспе, где впервые оперативно выполнялись переключения между «ориентациями» измерительных приборов. С современной точки зрения, как это почти всегда бывает, и эти работы можно критиковать за неабсолютную строгость сделанных в них выводов. Тем не менее они опытным путем показали, что верна квантовая механика: комбинации средних действительно нарушают неравенства Белла. С тех пор эксперименты многократно уточнялись различными способами, причем особое внимание уделялось пространственной разделенности приборов, чтобы световой сигнал не успевал дойти от одного до другого за время между измерениями. Относительно недавно начали использовать спутники, и база эксперимента превысила 1000 км. Результат неизменно подтверждается: неравенства Белла нарушаются. (Некоторые оригинальные подробности обсуждаются в добавлениях к этой прогулке.)

### *Мы не знаем, какие из предварительных условий неравенств Белла нарушаются*

Нарушение неравенств Белла, таким образом, — экспериментальный факт. Сами по себе эти неравенства являются математической теоремой, которую можно доказать исходя из определенных предположений. Мы заключаем, что по крайней мере одно из этих предположений неверно. Интрига в том, что мы не знаем какое (или какие) — возможно, «самое безобидное». Неработающий двигатель может не работать по нескольким причинам, включая дурацкие, и диагностика требует дополнительного оборудования или заглядывания внутрь, а именно этой возможности мы лишены в отношении квантового мира. Главную тайну квантовой механики — что же представляет собой квантовый мир? — не так просто раскрыть, потому что у нас нет прямого доступа в этот мир. Пока ничего более революционного не придумано, нам остается логический анализ предположений, из которых следуют неравенства Белла. В не слишком строгой формулировке мы перечислили эти предположения, когда говорили о том, как мог бы действовать механизм, предустанавливающий значения спинов в каждой ЭПР-паре. Кажется, что свобода действий, которую мы ему предоставили, никаких ограничений не содержит, но в действительности они там есть. Например, электроны получают инструкции «если тебя спросят, каков твой спин в направлении $c$, …», но *не* инструкции «если тебя спросят, каков твой спин в направлении $a$, а твоего компаньона — про его спин в направлении $b$, …». Последний вариант откровенно нарушал бы *локальность* — требование, чтобы происходящее сейчас и здесь не зависело от происходящего на достаточном удалении. В течение последних 300 лет успехи науки в поиске фундаментальных механизмов явлений неизменно были связаны с установлением локальных причин (фундаментальный ответ на этот вызов — концепция поля; как мы помним, действие на расстоянии беспокоило уже Ньютона). В силу этого на нелокальность не хочется соглашаться «сразу», без давления абсолютно неотвратимых обстоятельств. Если допустить в «скрытом механизме» наличие нелокального воздействия, никаких неравенств Белла доказать нельзя и вся затея теряет смысл — электроны «просто» разговаривают друг с другом на расстоянии; раз мы капитулировали, даже не ввязавшись в бой, нечего и рассчитывать на приобретение хоть какого-то знания.

Условия теоремы/неравенств Белла подверглись тщательнейшему рассмотрению со всех возможных точек зрения; внимание обращалось в том числе и на «неявные» предположения, которые исходно не формулировались отчетливо ввиду их очевидности. Например, предполагается отсутствие сигналов, распространяющихся назад во времени; если бы такая возможность была, то информация об ориентации двух приборов Штерна — Герлаха могла бы передаваться в прошлое, к моменту создания ЭПР-пары, и «скрытый механизм» мог бы это учитывать, снабжая электроны свойствами так, чтобы «подделать» квантово-механическое поведение. Обсуждались и все прочие мыслимые аспекты сопутствующих рассуждений, вплоть до «вселенско-конспирологических» теорий (см. добавления к этой прогулке), не столько для того, чтобы всерьез утверждать, что они имеют место, сколько с целью максимально точно очертить все, от чего зависит выполнение неравенств Белла и что, следовательно, оказывается кандидатом на выбывание — предположением, неважно, насколько «естественным» или «очевидным», которое в природе не выполнено. Пример другого направления мысли — обсуждение возможности, что сами измерительные приборы «некоторое время» пребывают в состоянии, описываемом суммой нескольких слагаемых, и поэтому надо внимательно отнестись к однозначности их показаний; это, в свою очередь, влияет на вычисление средних и т.п. Буквально ни одного камня не осталось неперевернутым.

### *Нет локальному реализму! Скорее всего*

Основной кандидат «на выбывание» — локальный реализм. Реализм — это убеждение в независимом существовании вещей. Скрытые переменные наделяют квантовые явления набором свойств, существующих вне зависимости от всяких измерений. Локальность — это отсутствие действия на расстоянии. Оба эти понятия можно уточнять разными способами, но в целом картина выглядит так, что не могут быть одновременно выполнены два условия:

1. частицы, запутанные в ЭПР-пару, обладают свойствами до и независимо от наблюдений, в которых они проявляют эти свойства;
2. любая «коммуникация» — передача информации между электронами — ограничена конечной скоростью распространения сигнала в пространстве (скоростью света, разумеется).

Главная тайна квантовой механики, возможно, связана с вопросом «локальность или реализм?» — но может оказаться, что самый правильный вопрос мы еще просто не задали.

Нарушение локального реализма получается довольно тонким в том смысле, что, как мы видели, не позволяет передавать сигналы быстрее света; даже если мы будем настаивать на реализме, признав тем самым необходимую степень нелокальности, все равно получится нелокальность, не угрожающая основным положениям специальной теории относительности [282]. Но тяга ЭПР-пар к нелокальности имеет эффектное проявление, название которого отсылает к распространенному мотиву научной фантастики — телепортации; эффект квантовой телепортации (многократно уже подтвержденный экспериментально) *не* позволяет отправлять грузы на Проксиму Центавра или хотя бы на Марс быстрее света, но невольно перекликается с метафорой, использованной мной в начале этой прогулки. Я говорил, что состояния квантовых систем — это что-то вроде «высказываний» или даже «идей», а обычные высказывания можно передавать по телефону. Квантовая телепортация и правда позволяет передавать квантовое состояние по телефону, причем в виде неправдоподобно короткого сообщения — ценой использования «ресурса нелокальности», которым обладают ЭПР-пары (см. добавления к этой прогулке).

*****

**Лоцманы спасают реализм.** Локальные скрытые переменные невозможны, заключаем мы из экспериментального нарушения неравенств Белла. На нелокальные скрытые переменные этот запрет не распространяется. Принять, что они существуют в том или ином варианте, означает «допридумать» квантовую механику, введя в нее что-то помимо волновой функции; но ведь и сама волновая функция была в свое время придумана, и, может быть, мы просто остановились, не дойдя до конца пути, тогда как надо было сразу придумывать больше? Разумеется, не следует изобретать сверх меры, ведь хорошие научные теории по определению экономны в своих постулатах; но если мы настаиваем на реализме, то, быть может, несколько дополнительных сущностей — приемлемая цена за его спасение?

Изящная идея по спасению реализма требует совсем нечепуховых добавок к волновой функции, но получающаяся картина впечатляет: элементами реальности в нашем мире являются точечные частицы, обладающие — !! — определенным положением в пространстве и одновременно определенным количеством движения, т.е. движущиеся по траекториям. *И это*, хочется спросить, — *квантовая теория*? С ее принципом неопределенности, туннельным эффектом, дискретными состояниями и всем остальным?!

Да! Полноценная квантовая механика и четкие траектории одновременно. И полная ясность с базовыми элементами реальности. Но, правда, не бесплатно.

Первоначальную идею предложил Л. де Бройль в своем выступлении на Сольвеевской конференции 1927 г., но формирующееся квантово-механическое научное сообщество энтузиазма по поводу его предложения не проявило, и де Бройль оставил это направление мысли. Копенгагенские взгляды и вообще набирали силу, а среди конкретных возражений против теории де Бройля называлась присущая ей нелокальность. Оставалось четыре десятилетия до сколько-нибудь широкого осознания, что какой-то вариант нелокальности неизбежен, если требовать реализма. Лишь через двадцать с лишним лет к идеям де Бройля вернулся Бом, а спустя еще примерно такое же время Белл сетовал, что взгляды Бома — получившие название бомовской механики — не излагаются в стандартных учебниках. Эта «бомовская механика» (бомовская интерпретация квантовой механики, или интерпретация де Бройля — Бома) называется еще теорией *волны-лоцмана* [283]. Волновая функция в ней, как и полагается всякой теории со скрытыми параметрами, — не все, что есть в теории, да и, пожалуй, не главная ее часть. Главное же — точечные частицы. *Правда*, это совсем не частицы из классического мира: их движение определяется вовсе не законами Ньютона. Там, как мы помним, сила говорила количеству движения, как ему изменяться. Здесь же все иначе: уравнения определяют не изменения количества движения, а непосредственно само количество движения. А именно, количество движения каждой частицы определяется волновой функцией — тем, как она изменяется в пространстве вблизи точки, где находится эта частица: количество движения больше всего в том направлении, в котором волновая функция изменяется наиболее значительно. И правда, *лоцман*: полрумба правее, полный вперед! А откуда взять волновую функцию, которая бы этим занималась? А вот здесь нет ничего оригинального: из уравнения Шрёдингера.

### *Бомовская механика: волновая функция наделяет скоростью точечные частицы*

Зафиксируем не совсем обычное положение вещей, взяв для примера систему из двух частиц, электрона и протона.

1. Волновая функция этой системы зависит от двух точек в пространстве; найти эту волновую функцию следует из самого обычного уравнения Шрёдингера.

Волновая функция, надо оговориться, в бомовской механике всегда зависит от положений в пространстве, в данном случае — от возможного положения электрона $q_э$ и возможного положения протона $q_п$. Для *каждой* пары точек ($q_э$, $q_п$) волновая функция имеет какое-то значение $\psi(q_э, q_п)$. Пока все стандартно, но далее следует совсем необычное.

2. В каждый момент времени электрон и протон находятся в конкретных точках в пространстве (строго локализованы).

3. Каждой частице при этом предписано иметь однозначно определенное количество движения. Оно задается тем, как волновая функция меняется в пространстве вблизи положения этой частицы. Например, если $q_э$ — точка, где сидит электрон, то его количество движения определяется тем, в каком направлении и насколько резко изменяются значения волновой функции $\psi(q, q_п)$, когда точка $q$ кружит вблизи точки $q_э$.

Причина движения частиц, таким образом, — непостоянство волновой функции в пространстве, но это непостоянство не производит силу, под действием которой частица разгонялась бы или тормозилась (*изменение* количества движения в обычной механике), а без всякого разгона, *сразу*, наделяет частицу количеством движения (и тем самым скоростью).

Этих изобретений еще недостаточно, чтобы в теории появились вероятности — которые как-никак должны быть в квантовой механике. Заявленное движение частиц под управлением волновой функции хоть и необычное, но полностью детерминированное, а уравнение Шрёдингера само по себе тоже детерминистское. Здесь в дело вступает самое, пожалуй, остроумное изобретение.

4. Заданная волновая функция электрона и протона не определяет положение электрона и протона однозначно. В природу встроен неустранимый «люфт»: при повторении одного и того же эксперимента с одной и той же начальной волновой функцией окажется, что частицы, которыми она

руководит, располагаются в начальный момент времени каждый раз в несколько различных точках. Случайность в их разбросе по различным точкам *контролируется* — разумеется, волновой функцией: вероятность, с которой частицы занимают точки в пространстве в «начальный» момент времени, определяется квадратом волновой функции [284].

Движение частиц полностью детерминистское, но начальные условия — нет! Под управлением одной и той же волновой функции они будут стартовать с несколько различных положений, а потому и в дальнейшем двигаться несколько по-разному — по однозначно определенным, но меняющимся от раза к разу траекториям. Глубоко внутри себя движение частиц в бомовском мире детерминированное, но обитатели этого мира видят неустранимую случайность.

И вот теперь — бонус, полагающийся за удачное придумывание и имеющий вид красивого математического наблюдения, которое, собственно, и делает все предприятие осмысленным: если в начальный момент времени распределение частиц задается квадратом волновой функции, а далее частицы движутся по (необычному) правилу 3, то и во все последующие моменты времени распределение частиц задается квадратом волновой функции — той, которая «образуется» к тому моменту в согласии с уравнением Шрёдингера. Не требуется никакого правила Борна, вступающего в действие при «измерениях», — измерения вообще никакой специальной роли не играют; но при повторении опыта с одной и той же волновой функцией частицы, которыми она управляет, оказываются и могут поэтому быть обнаружены («измерены») в той или иной конфигурации с вероятностями, которые всегда получаются такими же, как «в Копенгагене».

### *Бом: волновая функция выражает наше незнание*

Эти изобретения *работают*: применяя такую схему, можно последовательно описать (предположительно) все квантово-механические явления, с теми же результатами, что и с аксиомой коллапса и сопутствующими ей идеями. При этом нет никакой проблемы измерения, воздействующего на измеряемую систему и участвующего в наделении ее свойствами; наоборот, измерения просто выявляют то, что имелось в системе, но чего мы не знали. Никакие наблюдатели или макроскопические приборы не требуются для придания смысла происходящему. И нет никакого коллапса. Все эффекты квантовой механики, странные и менее странные, возникают полностью «реалистически»: все свойства, которые любая система или ее часть может проявить при измерениях, явным образом наличествуют до измерений (с небольшой «тонкой настройкой» для спина — что, возможно, не очень удивительно, потому что спин не имеет классического аналога). Все «квантово-механические недоумения» таким образом развеиваются. Никакие приборы не «зависают» в комбинации двух состояний, кошка Шрёдингера всегда или жива, или мертва — в зависимости от того, как в данном конкретном случае пролегла траектория электрона, чуть выше или чуть ниже некоторой разделительной линии.

При этом бомовская механика, раз ее предсказания неотличимы от того, что дает правило Борна вместе с коллапсом, нарушает неравенства Белла (иначе мы бы ее и не обсуждали). Добиться этого удается за счет нелокальности, действующей «через» волновую функцию. В системе из двух или более частиц волновая функция зависит от положения каждой из них; в только что обсуждавшейся системе из электрона и протона количество движения, которое предписано иметь электрону, определяется тем, насколько волновая функция $\psi(q_э, q_п)$ чувствительна к «шевелению» положения электрона $q_э$. Но ведь волновая функция зависит, конечно, и от $q_п$ — положения протона в тот же момент времени! Если мы вычислили количество движения электрона при некотором положении протона, то стоит только «подвинуть» протон, как и количество движения электрона может несколько поменяться. И происходит это при любом расстоянии между двумя частицами. Это и есть самая настоящая нелокальность. В точности она же обеспечивает и обмен информацией между частицами при удаленных измерениях. Как только Аня измеряет нечто, скажем про протон — а дело всегда сводится к его конкретному положению $Q_п$, — волновая функция всей системы конкретизируется, в ней остается неизвестным только положение электрона, положение же протона надо взять равным в точности тому, которое было измерено: $\psi(q_э, Q_п)$. Происходящее в дальнейшем с электроном чувствительно к актуально зафиксированному положению протона — неважно, насколько далеко этот протон находится.

### *Кто боится нелокальности?*

На упреки в нелокальности, предъявляемые бомовской механике, ее последователи отвечают примерно так: во-первых, неравенства Белла показывают, что если настаивать на реализме, то какую-то нелокальность приходится допустить в любом случае; а во-вторых, бомовская механика как раз и делает неизбежную нелокальность совершенно явной, а такое можно только приветствовать. И кстати! — хотя и немного в сторону — Белл вообще-то занялся своими неравенствами, размышляя не над чем-нибудь еще, а над бомовской механикой. И действительно, вот характерные риторические вопросы от Белла (а если называть вещи своими именами, то их адресат — засилье копенгагенской интерпретации). Отметив, что даже Паули, Розенфельд и Гайзенберг не смогли высказать никакой более разгромной критики бомовской концепции, кроме как заклеймить ее «метафизической» и «идеологической», Белл продолжает:

> Почему картину волны-лоцмана игнорируют в учебниках? Не следует ли ее преподавать — не как единственный вариант, но как средство против повсеместно распространенной безалаберности? С тем чтобы показать, что на неотчетливость, субъективизм и индетерминизм нас обрекают не экспериментальные факты, а сознательно сделанный теоретический выбор?

Скрытые переменные — траектории точечных частиц — предлагаются как основной элемент реальности, но, что несколько парадоксально, их «скрытость» означает, что мы не можем выследить никакие их проявления в окружающей нас реальности, кроме как в виде обычных квантовых эффектов. Это значит, что у нас нет способа доказать их существование (и они *не* оказывают обратного воздействия на волновую функцию). В таком случае трудно оспорить взгляд на бомовские траектории частиц как на *придуманные* траектории. Придуманы они сверх меры или нет? Приемлема ли цена, которую предлагается заплатить за то, чтобы логически последовательно объяснить квантовую теорию, оставаясь в рамках реализма, зависит в том числе и от того, какое значение придавать реализму.

Самая существенная проблема бомовской механики не в том, что она «просто нелокальна», а в том, что совсем не понятно, как можно было бы обобщить ее с учетом требований специальной теории относительности. В этой механике существенно, *что* происходит с другими частицами «в данный момент времени»; при объяснении ряда эффектов с запутанными парами важно, что один из электронов долетает до измерительного прибора первым. Но если мы вспомним, что из-за абсолютности скорости света и одновременность, и временной порядок событий, разделенных в пространстве, *относительны*, то вся схема рушится; бомовскую механику не получается (*очень* трудно?!) построить, не предполагая наличие абсолютного, одинакового для всех времени [285]. Придуманные траектории, движение по которым управляется волновой функцией, элегантны, но в нашем мире действует специальная теория относительности, и все, что *совсем* с ней не примиряется, едва ли имеет шансы быть частью природы на фундаментальном уровне [286].

*****

**Вспышки в пустоте.** Вообще-то все время получается так, что, говоря о какой-либо интерпретации квантовой теории, ее по разным поводам сравнивают с копенгагенской, несмотря на неразбериху, которая там творится с измерением и коллапсом. Однако в рассуждениях коллапс оказывается очень удобной вещью. Может ли так оказаться, что в Копенгагене и идею коллапса тоже правильно угадали — быть может, это физический процесс, который *происходит* в природе? Он мог бы являться не результатом непостижимого влияния «измерения» с помощью макроскопического прибора, а законом мироздания, по ясным правилам действующим в отношении самих квантовых объектов. Правда, от такого закона требуется, как кажется, трудно реализуемое: чтобы коллапс, происходящий по своим внутренним законам, не портил нам волновые функции огромного числа систем (начиная, конечно, с атомов), но «сам собой» случался бы всякий раз, когда задействован макроскопический прибор.

### *А что, если коллапс — физический процесс? Только очень редкий*

Закон природы с таким «умным» действием *возможен*. Надо только предположить, что волновая функция каждого электрона определенным образом коллапсирует — «суживается» — в среднем каждые 100 000 000 (сто миллионов) лет. Уравнение Шрёдингера для каждого электрона кратковременно нарушается случайным образом примерно с этой периодичностью (стоит сразу же обратить внимание, что выслеживать такое событие для одного отдельно взятого электрона — занятие малоперспективное). Редкие события самопроизвольного коллапса имеют точное математическое описание: при каждом таком событии *поправляется* зависимость волновой функции от точек в пространстве — она умножается на узкий ограничивающий профиль типа более «острой» кривой, показанной на рис. 11.8 слева. Главное свойство этого профиля — очень быстро становиться практически равным нулю при удалении от своего центра. На том же графике изображена такая зависимость волновой функции от одной из координат, в силу которой она заметным образом отлична от нуля в более широком интервале. Умножение на узкий профиль сужает эту волновую функцию: ее новая зависимость от рассматриваемой координаты изображена на рис. 11.8 справа. В трехмерном пространстве профиль является одинаково узким по всем направлениям, так что координатная зависимость волновой функции «суживается» по всем направлениям. Среднее время ожидания такого сужения (около 100 млн лет) — новая фундаментальная постоянная природы; ширина регулирующего профиля — еще одна постоянная, тоже имеющая странное на первый взгляд значение около $10^{-5}$ сантиметра (десятая доля микрона). Это расстояние в сотни или даже в тысячу раз больше характерного размера атома, а это значит, что для волновой функции электрона в атоме картина в некотором роде противоположна той, что изображена на рис. 11.8 слева: область, где волновая функция сколько-нибудь заметно отлична от нуля, в 1000 раз уже, чем профиль, а это значит, что вся эта область помещается там, где высота профиля максимальна — и где его «крыша» практически плоская. Но — кажется, я забыл сразу сказать — высота этой крыши равна 1, так что умножение на эту единицу ничего с волновой функцией не делает. Узкие волновые функции практически не меняются ни за сотни миллионов лет, ни за какое другое время, в атоме все остается без изменений! Правда ведь, здорово?

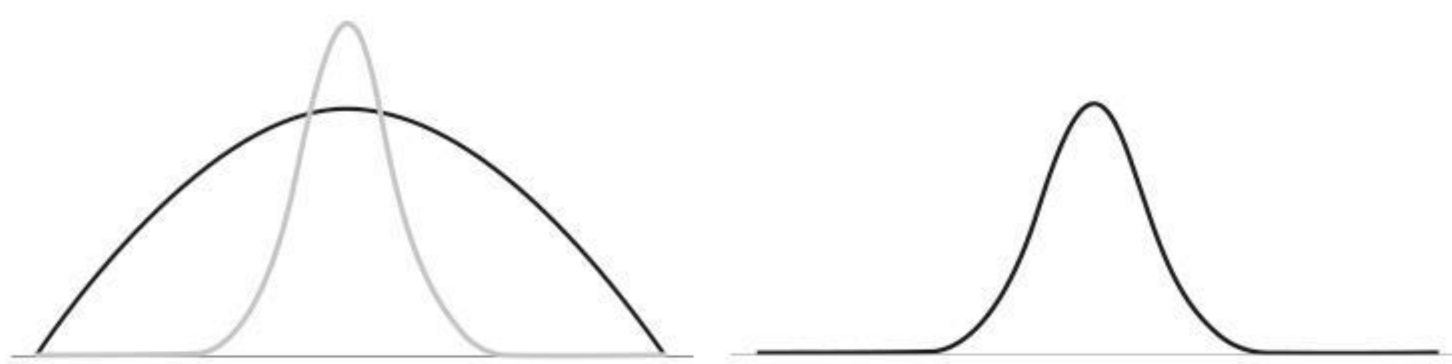


**Рис. 11.8.** *Слева:* зависимость величины волновой функции от координаты точки (темная кривая) отлична от нуля в некотором интервале. Ограничивающий профиль (серая кривая) заметно отличен от нуля в более узком интервале. *Справа:* умножение волновой функции на ограничивающий профиль сужает пространственную область, в которой волновая функция может сколько-нибудь заметно отличаться от нуля

Зато (раз в 100 млн лет) радикально меняются волновые функции с «растекшейся» зависимостью от точек в пространстве. Например, если электрону доступны две дороги (скажем, пролететь сверху или снизу в приборе Штерна — Герлаха), то в его волновой функции это отражено примерно так, как показывает двугорбая кривая на рис. 11.9 слева: горбы отвечают двум разным пространственным областям, и электрон с той или иной вероятностью может быть обнаружен в каждой из них, что (с некоторой долей условности) закодировано в его волновой функции $a \cdot |\text{в области } 1\rangle + b \cdot |\text{в области } 2\rangle$. На такую волновую функцию умножение на ограничивающий профиль производит радикальный эффект: шансы не исчезнуть остаются только у какого-то одного горба, как это показано на рис. 11.9 справа; во всех точках вдали от центра профиля волновая функция умножается на число, практически равное нулю; в результате электрон оказывается локализован в пределах не более чем $10^{-5}$ сантиметра где-то в одном месте.

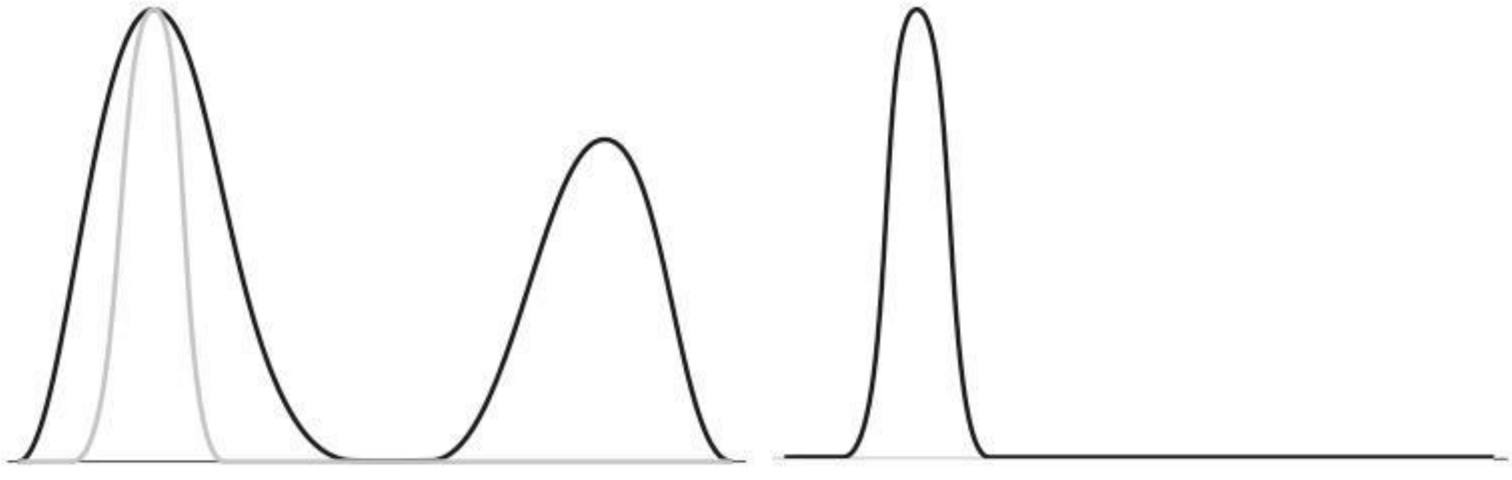


**Рис. 11.9.** *Слева:* волновая функция (темная кривая) заметно отлична от нуля в двух различных областях, показанных в одномерном случае как два интервала. Ограничивающий профиль (серая кривая) может возникнуть только в одной из этих областей. *Справа:* умножение волновой функции на ограничивающий профиль оставляет только один из двух интервалов (областей), где волновая функция заметно отлична от нуля

Пора сказать, *где же* случаются эти коллапсы — умножения на ограничивающий профиль. Это, как и выбор момента для такого события, тоже случайная величина, но случайность регулируется вероятностями, а эти вероятности — вы правильно подумали! — определяются с учетом имеющейся волновой функции. Резюме в довольно нестрогом виде состоит в том, что коллапс вероятнее там, где волновая функция «выше» (при этом наиболее чувствительны к результату коллапса, как мы видели, «широкие» волновые функции). Математические детали организованы таким образом, что коллапс и в самом деле происходит чаще всего там, где «измерение» скорее всего и обнаружило бы частицу. (Конечно, никаких «измерений» в качестве причины коллапса здесь не требуется. Коллапс происходит спонтанно, но, как мы очень скоро увидим, в присутствии макроскопического прибора все выглядит в точности так, как если бы это самое присутствие вызывало коллапс.) Я опустил бы подробности, если бы в них не участвовало гауссово размытие, по разным поводам применяемое при обработке изображений. Математически при гауссовом размытии используется в точности такой же ограничивающий профиль (он и называется гауссовым — и в методах обработки изображений, и в теории спонтанного коллапса). Правда, для реализации размытия надо не умножать его на функцию, описывающую изображение, а выполнить операцию так называемой *свертки* с ней. Центр профиля для этого помещается в выбранный пиксель, после чего содержимое пикселя заменяется на среднее по всем пикселям, но в это среднее более далекие пиксели вносят все меньший вклад, потому что их содержимое умножается на соответствующую высоту профиля, которая быстро убывает по мере удаления от центра [287]. Точно так же определяется и вероятность коллапса с центром в той или иной точке! Требуется вычислить свертку квадрата волновой функции с ограничивающим профилем: там, где результат свертки больше, вероятность коллапса выше.

Эти идеи спонтанного коллапса обычно обозначают аббревиатурой ГРВ, образованной из первых букв фамилий Гирарди, Римини и Вебера. Они решили, что «коллапсу быть», но полностью устранили магическое влияние измерительного прибора и вообще измерения — ценой постулата, что коллапс происходит самопроизвольно. Тем не менее сами по себе измерения никто не отменял, и ГРВ должны объяснить, каким же образом в результате измерения прибор оказывается в каком-то *одном* состоянии — причем приходит в него заметно быстрее, чем через 100 млн лет. Они и объясняют. Сразу после взаимодействия с электроном прибор попробовал было находиться в состоянии без определенного положения стрелки индикатора — волновые функции *всех* электронов (и всего остального в нем) были двугорбые. Другими словами, прибор находился в сумме двух состояний — в одном он указывает на отметку «⇑», а в другом — на отметку «⇓». Волновая функция прибора построена из волновых функций всех его электронов (и всего остального) $|\ \rangle_1$, $|\ \rangle_2$ и так далее до $|\ \rangle_N$, где $N$ — очень большое число порядка $10^{24}$; сразу после взаимодействия с влетевшим туда электроном (который я сейчас отмечу значком 0) электрон и прибор находятся в состоянии

$$|\uparrow\rangle_0 |\text{вблизи } \Uparrow\rangle_1 |\text{вблизи } \Uparrow\rangle_2 |\text{вблизи } \Uparrow\rangle_3 \ldots |\text{вблизи } \Uparrow\rangle_N +$$
$$+ |\downarrow\rangle_0 |\text{вблизи } \Downarrow\rangle_1 |\text{вблизи } \Downarrow\rangle_2 |\text{вблизи } \Downarrow\rangle_3 \ldots |\text{вблизи } \Downarrow\rangle_N.$$

(это запутанное состояние, потому что все «верхние» горбы волновых функций всех электронов собрались вместе в одном слагаемом, а все «нижние» горбы — в другом). Здесь фигурируют *страшно длинные* произведения, по одному множителю на каждый электрон системы. У каждого электрона своя волновая функция, но ее часть $|\text{вблизи } \Uparrow\rangle$ заметно отлична от нуля только в той области пространства, которая отвечает состоянию прибора «вверх»; аналогичный смысл имеет и $|\text{вблизи } \Downarrow\rangle$. Какой-то один из $N = 10^{24}$ электронов вызовет умножение волновой функции на ограничивающий профиль уже примерно через $10^{-8}$ с (это, по порядку величины, есть результат деления ста миллионов лет ожидания для одного электрона на число электронов). При этом одно из длинных произведений (например, отвечающее состоянию прибора «вверх») останется практически без изменений, а другое (состояние прибора «вниз») умножится на число, которое во всех практических смыслах неотличимо от нуля. В результате стрелка прибора сама собой локализуется в положении «вверх». Если перед двумя слагаемыми имелись различные коэффициенты, то в зависимости от их величины предпочтительнее будет случаться коллапс в одной или другой ветви (на рис. 11.9 слева два горба показаны неодинаковыми, что отражает наличие не сильно различающихся коэффициентов); свойства самопроизвольного коллапса таковы, что воспроизведется правило Борна! И, как мы видим, ждать коллапса тем меньше, чем больше система, с которой взаимодействует интересующий нас электрон или любая другая квантовая система.

### *Один из многих сколлапсирует довольно скоро. Этого достаточно*

Подход ГРВ уточнялся, но в его улучшенные варианты вдаваться здесь ни к чему, поскольку основная идея спонтанного коллапса уже ясна. Авторы концепции постулируют новый закон природы. Относится ли этот постулат к числу изобретений сверх меры? Из него, между прочим, можно вывести и очень *ясную* связь между абстракцией волновой функции и базовыми элементами реальности в нашем трехмерном пространстве — я бы даже сказал, связь несколько неординарную в своей ясности. Как мы видели, волновая функция любой системы из нескольких частиц не обладает значениями в трехмерном пространстве; но мы знаем, что в огромном числе ситуаций (например, в атоме) электрон локализован в пределах некоторой области, и про него хочется думать, что сам факт его существования там возможен безотносительно ко всему остальному во Вселенной. Поэтому требуются «мостики» от волновых функций к элементам реальности, существующим локально, т.е. имеющим относительно определенное пространственное положение. В ГРВ-подходах, как заметил Белл, уже имеется нечто, обладающее желаемым статусом *локального* существования в нашем обычном пространстве: сами ограничительные профили! Волновую функцию $\psi(q_1, q_2, q_3, q_4, \dots)$, зависящую от многих точек, никак не впихнуть в наше пространство, но ее коллапс всегда представляет собой «сужение» вблизи *какой-то точки* в физическом пространстве. Ограничивающие профили поэтому — уже готовые привязки к нашему пространству. Правда, они не существуют постоянно, а *возникают* только в момент коллапса; из-за того что они случаются то здесь, то там, о них часто говорят как о «вспышках». Волновая функция, развивающаяся во времени под управлением уравнения Шрёдингера где-то в математическом пространстве, приобретает связь с физической реальностью в трехмерном пространстве из-за последовательности вспышек. А пока нет вспышек, в нашем пространстве ничего нет, продолжает свою мысль Белл. В пространстве, где мы обитаем, *в основном пусто*.

Да?! А как же насчет окружающих предметов? Возьмем, например, человеческое тело. В нем порядка $10^{28}$ электронов; следовательно, каждую секунду в нем «вспыхивают» — *появляются в пространстве* — около триллиона ($10^{12}$) электронов. (Атомных ядер в несколько раз меньше, устроены они сложнее, но и про них следует предполагать нечто подобное.) Получается довольно своеобразный (даже, пожалуй, экстремальный) вариант *пуантилизма* (рис. 11.10), трехмерный и с непрерывно перерисовываемым «изображением»: около десяти тысяч точек, вспыхивающих за секунду в каждом кубическом миллиметре, вполне достаточно, чтобы, несмотря на некоторую прерывистость картины, дать представление о контурах и вообще об устройстве тела. Правда, не все так здорово уже с отдельной клеткой, потому что в ней происходит всего лишь несколько вспышек в секунду, и мы вынуждены заключить, что клетка как таковая ничем не наполнена, что она есть лишь арена, где появляются и исчезают различные актеры, всего по нескольку за секунду. Эту картину можно, вероятно, согласовать с тем фактом, что, глядя в микроскоп, мы *видим* клетку вовсе не пустой: как только в деле оказывается замешан микроскоп, волновые функции *его* электронов запутываются с волновой функцией, описывающей содержимое клетки, обеспечивая надежное снабжение всей системы «вспышками», в результате чего мы и видим клетку как клетку, а не как пустое вместилище [288].

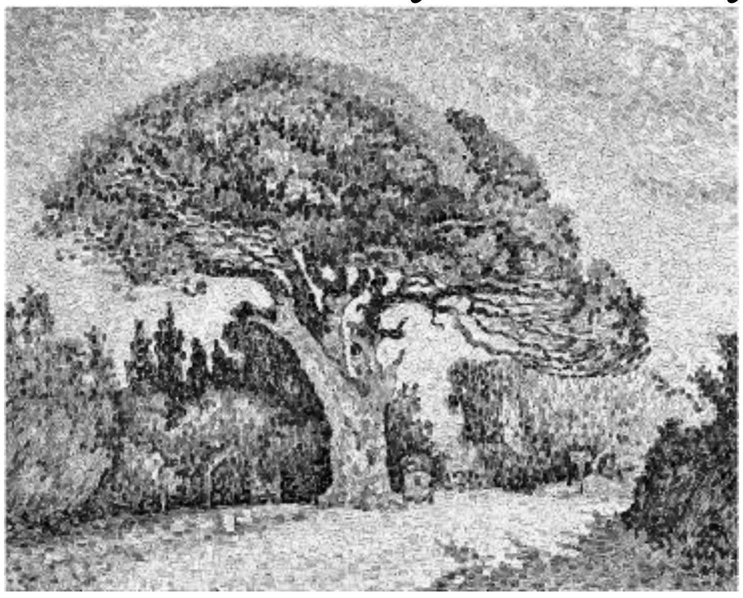


**Рис. 11.10.** Пуантилизм в живописи: сборка мира из точек требует работы воображения

Справедливости ради надо сказать, что ГРВ-теорию можно снабдить и другим рецептом по построению элементов реальности: принять, что по пространству «плавно» (и на этот раз — постоянно, а не только в моменты коллапсов) распределена масса с плотностью, которая определяется квадратом волновой функции с помощью следующего трюка. Если перед нами волновая функция десяти электронов — зависящая от десяти точек в пространстве, — а мы интересуемся плотностью массы в точке $q$, то мы десять раз *усредняем* квадрат волновой функции по всем возможным положениям девяти электронов — всех, кроме сначала первого, затем второго и так далее, а этот первый, затем второй и так далее по очереди помещаем в выбранную точку $q$. Полученные результаты усреднений мы затем складываем [289]. За постоянное, а не «вспышечное» существование элементов реальности приходится платить их размазанностью по пространству. Во всех тех случаях, когда волновая функция (скажем, электрона) имеет несколько областей локализации (как двугорбая кривая на рис. 11.9 слева), масса электрона буквально распределена по этим областям. Элементарную частицу приходится считать в некотором роде делимой, да еще и в произвольных пропорциях. Правда, все это ненаблюдаемо само по себе так же, как и бомовские частицы ненаблюдаемы сами по себе:

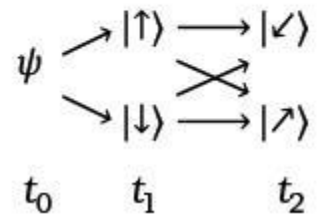
как только мы принимаемся за любые измерения с использованием любых макроскопических приборов, эти приборы в избытке снабжают картину коллапсами, из-за чего вся размазанность исчезает. Концепция перманентных, но размазанных частиц, впрочем, несколько уязвима вот с какой стороны. Те части волновой функции, которые при коллапсе умножаются почти на нуль, умножаются все же не строго на нуль; из-за этого по пространству оказываются размазанными очень малые «остатки» массы, все-таки отобранные от основных скоплений массы. Накапливающиеся остатки могут превратиться в проблему.

*****

**Реализм по выбору.** Реализм, вероятно, избавляет от части смутных тревог за устройство Вселенной, но вообще-то заранее неизвестно, сколь глубоко в недра материи распространяются идеи о реальности в том виде, к которому мы стихийно привыкли. Мы ведь привыкли, например, к абсолютному, одинаковому для всех времени — но в природе такого времени нет; ход времени и одновременность оказываются зависящими от относительного движения. Несколько труднее принять, что относительной может быть сама реальность — в том смысле, что различные наблюдатели могут *выбирать* для себя разные о ней представления, которые (сразу выдам самое главное из того, что нас ждет за ближайшим поворотом) нельзя сопоставлять, рассматривать вместе, объединять в одну картину. Хорошо известный факт, что «у каждого своя правда», — немаловажный аспект человеческих отношений, но в них, как мы знаем, все запутано намного безнадежнее, чем запутываются волновые функции. Сейчас же речь идет о движении простых/элементарных объектов и эволюции простых систем. *Основательная квантовая теория* [290] находится, наверное, в умеренном (ну, почти) ценовом диапазоне в смысле положений, с которыми необходимо согласиться, а взамен предлагает понимание квантовой механики без каких-либо дополнительных подпорок и изобретений сверх меры — причем понимание, очень близкое к копенгагенскому, но без тени проблем в

отношении измерения и избавленное от позора невнятных предположений о разграничении квантового и классического, как и о коллапсе волновой функции [291]. При всем этом свойства квантовых систем существуют «внутренним» образом — независимо от совершаемых «измерений».
Как, *реализм*?! Погодите минуту.

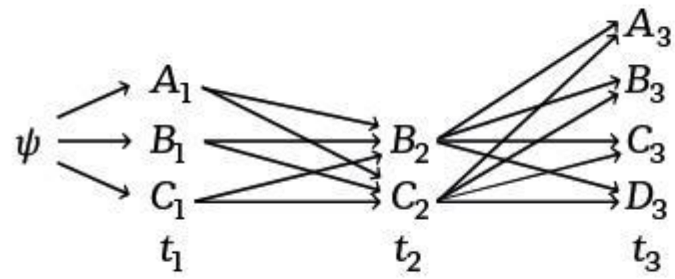
Начнем с того, с чем предлагается согласиться. Прежде всего, наблюдения, которые мы проводим над квантовым миром, совершаются в определенные, дискретные моменты времени $t_1$, $t_2$ и так далее, до какого-то момента времени $tM$. Это вроде бы техническая деталь, но она необходима для всего дальнейшего. Собственно говоря, «наблюдения» не играют никакой специальной роли, поэтому для каждого из выбранных моментов времени предлагается просто указывать, на какие альтернативы разбито пространство возможностей — по каким свойствам сгруппированы различные исходы (из тех, что могли бы быть обнаружены при каком-то измерении, если бы его делали). Можно использовать любые свойства, которые по каким-то причинам нам интересны. Например, в случае спина электрона мы могли бы в момент $t_1$ выделить две альтернативные возможности $|\uparrow\rangle$ и $|\downarrow\rangle$, а в момент $t_2$ — две другие альтернативы $|\swarrow\rangle$ и $|\nearrow\rangle$ (хотя никто не запрещает оставить $|\uparrow\rangle$ и $|\downarrow\rangle$). [292] Можно думать, что для квантовой системы (спина электрона в данном случае) нарисовано что-то вроде «классиков»: на старте (момент времени $t_0$) имеется некоторое начальное состояние $\psi$, из которого можно «прыгнуть» на одно из свойств, заявленных для момента времени $t_1$, а оттуда — на одно из свойств, которые мы решили выбрать для следующего момента $t_2$ (в данном случае финального):



Должно выполняться несколько условий. От каждого разбиения на альтернативные возможности — каждого столбца в таких «классиках» — требуется *полнота*: в него должны быть включены все возможности в каждый выбранный момент времени, хотя при этом допускаются сколь угодно грубые описания. Например, говоря о колебательной системе, мы можем использовать разбиение всего из двух альтернатив: «система находится в состоянии с наименьшей возможной энергией» и «система находится в состоянии с большей энергией». Каким образом она устраивается во втором случае, нас тогда совершенно не интересует. Одной только полноты, впрочем, недостаточно: нужно еще, чтобы выделенные возможности в каждый момент времени действительно были альтернативными — *взаимоисключающими*. У этого требования есть математическое выражение в терминах «нарезки» пространства всех волновых функций на части, отвечающие выделенным возможностям, — в виде условия, что у различных частей нет общих элементов (мы уже встречали его как условие отсутствия интерференции между различными частями волновой функции) [293].

*Взаимоисключающие варианты — без интерференции между ними*

Выбранную схему разбиений называют все же не классиками, а *каркасом* [294]. Каркасы нужны для того, чтобы «рассказывать истории» — описывать варианты развития системы во времени в виде перескоков между возможностями в соседние моменты времени. Все такие возможности можно показывать стрелками, тогда каждая история — это путь по стрелкам от начального состояния до одного из конечных. Например, в каркасе



имеется история $\psi \to C_1 \to B_2 \to A_3$. Тот факт, что мы говорим о ней, означает, что *нас интересует* возможность развития событий от старта к финишу через обладание свойством $C_1$ в момент времени $t_1$, свойством $B_2$ в момент $t_2$ и свойством $A_3$ в момент $t_3$. Всего историй в этом каркасе 24, и каждая из них — это один из вариантов эволюции квантовой системы. «Рассказывать истории» можно, используя *только* те возможности, которые присутствуют в данном каркасе. Например, если в некоторый момент времени $t_1$ спиновые состояния разбиты на возможности $|\uparrow\rangle$ и $|\downarrow\rangle$, то в истории не может быть фразы «а если в момент $t_1$ электрон находится в состоянии $|\swarrow\rangle$…». Если вас интересует, не случится ли спиновое состояние $|\swarrow\rangle$ в момент времени $t_1$, выберите каркас по-другому. По существу, ОКТ (основательная квантовая теория) систематически изгоняет из рассуждений все нефактологические вопросы типа «а если бы». На них, надо сказать, не всегда просто ответить и в обычной жизни: «Какая погода была бы в декабре в Санкт-Петербурге, если бы он был расположен на 1000 км южнее?» Минуточку, что значит «Санкт-Петербург расположен»? А река Нева и Финский залив? А Ладожское озеро — тоже? А…?

### *Любой каркас, но только один за один раз*

Основное правило жизни в ОКТ, о котором нельзя забывать ни на секунду, чтобы не поддаться соблазну «обычного» способа рассуждений: любое высказывание о квантовой системе требует указания каркаса, причем только одного. Да, каркасов может быть много разных, и можно выбирать их согласно тем или иным предпочтениям, но только по одному за раз! *Все* логические сложности квантовой механики, не устают подчеркивать сторонники ОКТ, проистекают исключительно из попыток сочетать друг с другом высказывания из различных каркасов, которые взаимно несовместны. На языке настоящих «классиков» совместность или несовместность двух каркасов означала бы примерно вот что. Клетки из одного каркаса, нарисованные красным, и клетки из другого, нарисованные синим (для тех же моментов времени), каким-то образом пересекаются, из-за этого возникают новые клетки меньшего размера. Если все эти клетки считать элементами нового разбиения, то будет ли оно по-прежнему удовлетворять условиям полноты и взаимоисключительности? Если не будет, то «красный» и «синий» каркасы несовместны. В действительности несовместность каркасов возникает как отражение вражды различных величин друг с другом. Например, если (для одного и того же момента времени) в одном каркасе выбрано разбиение спиновых состояний на $|\uparrow\rangle$ и $|\downarrow\rangle$, а в другом — на $|\swarrow\rangle$ и $|\nearrow\rangle$, то каркасы несовместны, потому что компоненты спина вдоль различных осей враждуют друг с другом [295].

И все же ОКТ — это квантовая механика, а не игра в классики. От момента $t_1$ до момента $t_2$ не скачут дети, а развивается во времени волновая функция, и делает она это в соответствии с уравнением Шрёдингера. Волновая функция ничего не знает о свойствах, которые *мы* решили выделить в момент $t_2$, и вовсе не собирается «приземляться в один из квадратов». Каркас — это то, что интересно нам, а волновая функция ведет себя так, как ей велит Шрёдингер. В результате имеется еще одно (и самое сложное в применении) условие, которое требуется от каждого каркаса: истории, нарисованные в данном каркасе (чисто логическая конструкция), должны оставаться полностью альтернативными, когда их «оживляют» с помощью уравнения Шрёдингера. Как это понимать? Снова посмотрим на историю $\psi \to C_1 \to B_2 \to A_3$, произвольно выбранную из приведенного выше каркаса. Вот что надо с ней сделать. Сначала с помощью уравнения Шрёдингера вычисляем, как развивается во времени начальная волновая функция $\psi$ за время от момента $t_0$ до $t_1$. Из полученной волновой функции мы вырезаем кусок, который отвечает обладанию свойством $C_1$. Для этого есть математическая процедура, определенная, по существу, тем, что каждое разбиение представляет собой «нарезку» всех мыслимых волновых функций на части, отвечающие выбранным свойствам. В результате получается какая-то новая волновая функция, которой мы снова даем развиваться во времени под управлением уравнения Шрёдингера до момента времени $t_2$. Из получившейся волновой функции снова вырезаем часть, отвечающую свойству $B_2$, а результат снова отдаем Шрёдингеру, чтобы с помощью его уравнения пройти эволюцию до момента времени $t_3$. Потом, наконец, оставляем только ту часть волновой функции, которая отвечает свойству $A_3$, — и запоминаем этот результат. Далее следует точно таким же образом поступить со всеми историями в имеющемся каркасе, а все полученные волновые функции запомнить (определенно придется *записывать*). И вот главное: требуется, чтобы никакие из полученных волновых функций не интерферировали друг с другом. Это условие, имеющее строгий математический смысл, означает, что волновые функции, получающиеся из различных историй, не должны нести дублирующую информацию; в данном случае «двойной учет» не должен приходить от более ранних моментов времени в силу того, как эволюционирует волновая функция. Такие «хорошие» истории называются *основательными*, и с ними только и следует иметь дело. Здесь наконец заканчивается раздел «Требования» из «Руководства пользователя» всей схемой ОКТ. Далее идут обещанные выгоды и преимущества.

### *Необходим полный набор основательных историй*

Из уже проделанного упражнения с уравнением Шрёдингера и «нарезкой» волновых функций немедленно следует раздача вероятностей — для каждой истории! «Конечный продукт» ОКТ — вероятности не просто исходов в финальный момент времени, а *вероятности историй*. Вероятность, что развитие событий случится в соответствии с выбранной историей, равна квадрату волновой функции, которую мы построили для этой истории [296]. «Основательность» историй требуется именно для того, чтобы можно было определить вероятность для каждой. При бросании, скажем, игральной кости неправильной формы с 24 гранями (разных площадей и с разными вероятностями выпадения) пространство событий состоит из 24 отчетливых исходов, в каждом из которых кость лежит на столе одной определенной гранью. Отсутствие интерференции между различными историями — это что-то вроде ясной отделенности граней друг от друга, запрет на плавные переходы между гранями, при наличии которых было бы не так просто сказать, какой же исход случился.

Рецепт раздачи вероятностей основательным историям обобщает правило Борна и представляет собой фундаментальный постулат, заодно снабженный ясной пользовательской инструкцией: применять его надо *всегда*, а не только когда делается измерение (в нем вообще не упоминаются измерения). Вероятности историй — это больший объем информации, чем вероятности того, что система придет к одному из свойств в финальный момент времени ($t_3$ в приведенном выше каркасе). Если же нас интересуют только вероятности этих финальных исходов, то надо просто просуммировать вероятности всех историй, приводящих к каждому из них. Здесь есть, правда, один абсолютно ключевой вопрос. Может ли так случиться, что два различных каркаса, которые «ведут» от одного и того же начального состояния к одному и тому же финальному разбиению, дадут различные вероятности для (одних и тех же, как было сказано) исходов? Ведь в каждом каркасе эти вероятности складываются из своих собственных историй со своими собственными вероятностями. Удается тем не менее доказать, что любые два каркаса с одним и тем же «началом» и одним и тем же «концом» всегда дают одинаковые вероятности для конечных исходов, вне зависимости от того, насколько непохожи соответствующие им наборы историй, — что, конечно, представляет собой важный элемент *основательности* всей теории.

Обладая вероятностями *историй*, мы можем теперь урегулировать все вопросы, например, по поводу того, какими свойствами обладал, а какими не обладал тот или иной электрон «по пути от Пети к Ане». Во-первых, он мог обладать только какими-то из тех свойств, что включены в данный каркас, а во-вторых, нам полностью известен весь «вероятностный расклад». Ничто не мешает отвечать на вопросы типа «С какой вероятностью в момент времени $t_2$ электрон имел свойство $B_2$, если известно, что в момент времени $t_3$ он имел свойство $A_3$?». Вот на какой натянутой струне балансирует ОКТ: известны ответы на *все* вопросы (разумеется, ответы вероятностные, поскольку вероятностный характер квантовой механики никто не отменял), но только в рамках *одного* выбранного каркаса. Другие наблюдатели «нарисуют другие классики» и дадут другие ответы по поводу того, чем была наполнена эволюция «по пути от Пети к Ане». Среди каркасов нет более истинных и менее истинных, каждый из них предлагает свою реальность, которая не лучше и не хуже любой другой; эти реальности *нельзя* обсуждать совместно. Правых или неправых при этом нет, потому что единой реальности нет. С этим предлагается примириться как с основной чертой квантового мира.

### *ОКТ: единой реальности нет*

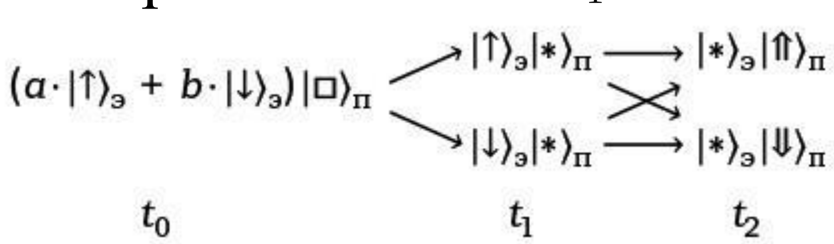
Уравнение Шрёдингера становится в ОКТ отчасти вспомогательным средством, используемым для вычисления вероятностей, а до того — и, собственно, главным образом — еще и для проверки основательности историй в рамках каждого каркаса. И хотя в проверке основательности историй нет ничего неясного или неоднозначного, это определенно самая неудобная в применении часть всей схемы. Процедура получается довольно громоздкой: ни о какой заинтересовавшей вас отдельной истории самой по себе говорить нельзя, необходимо сначала включить ее в подходящий каркас, следя при этом за полнотой, а в нем рассмотреть *все* истории, и, если они действительно не интерферируют, вы наконец сможете делать выводы о том, с какой вероятностью могла бы случиться выбранная история.

Проблема измерения решена в ОКТ тем, что измерительный прибор рассматривается как часть составной квантовой системы; возможные показания прибора (уж какие предусмотрены в конкретном эксперименте) просто задают еще одно разбиение на несколько возможностей: это разбиение на случаи «что угодно для электрона и показание 1 для прибора», «что угодно для электрона и показание 2 для прибора» и т.д. Займемся, например, измерением спина электрона, который достается нам в каком-то общем спиновом состоянии $\psi = a \cdot |\uparrow\rangle + b \cdot |\downarrow\rangle$. Выберем каркас таким, что — для ясности — от начального момента $t_0$ до момента $t_1$ еще ничего не происходит, а вот в интервале от $t_1$ до $t_2$ электрон взаимодействует с прибором Штерна — Герлаха. Сам прибор сначала находится в состоянии «готов», которое мы продолжаем обозначать как $|\square\rangle_п$, а в финальных состояниях мы различаем две возможности для прибора — наши обычные состояния прибора $|\Uparrow\rangle_п$ и $|\Downarrow\rangle_п$ со стрелкой вверх и со стрелкой вниз. Тогда каркас выглядит так:

$$\begin{array}{ccccc} & & & \nearrow & |*\rangle_э|\Uparrow\rangle_п \\ (a\cdot|\uparrow\rangle_э + b\cdot|\downarrow\rangle_э)\,|\square\rangle_п & \longrightarrow & (a\cdot|\uparrow\rangle_э + b\cdot|\downarrow\rangle_э)\,|\square\rangle_п & & \\ & & & \searrow & |*\rangle_э|\Downarrow\rangle_п \\ t_0 & & t_1 & & t_2 \end{array}$$

«Джокер» $|*\rangle_э$ для состояния электрона означает, что в финальный момент $t_2$ мы ничего от электрона не требуем: пусть его волновая функция будет какой угодно, нас в конце истории интересует только прибор. В таком каркасе всего две истории, они не интерферируют, и вероятности их получаются равными $a^2$ для истории, приводящей к $|\Uparrow\rangle_п$, и $b^2$ для истории, приводящей к $|\Downarrow\rangle_п$. *То же самое* говорит и правило Борна в самом грубом варианте своего применения, так что пока мы не получили ничего нового. Но у нас теперь есть возможность осмысленно задавать и более детальные вопросы, например, *про реализм*: было ли у электрона то значение спина, которое показал прибор, *до* измерения — скажем, в момент $t_1$? Смотрим на имеющийся каркас и не видим там ничего относящегося к отдельным спиновым состояниям электрона; значит, сейчас у нас нет возможности о них говорить.

Ничто, однако, не заставляет нас оставаться в рамках одного каркаса, который мы, похоже, выбрали не самым интересным образом. Возьмем другой каркас, который позволит нам говорить об отдельных спиновых состояниях электрона в момент $t_1$:




На этот раз в момент времени $t_1$ мы выделили два отчетливых варианта в отношении спина электрона, но прибору позволили там делать что угодно («джокер» в виде звездочки). В момент $t_2$, наоборот, нас живо интересует именно результат измерения — состояние прибора, а состояния электрона мы никак конкретизировать не хотим, что есть, то есть. Получилось *четыре* истории, никакие из них не интерферируют, и, значит, они наделяются вероятностями по описанным выше правилам ОКТ. Применение обобщенного правила Борна показывает, что истории, содержащие *наклонные* стрелки между $t_1$ и $t_2$, имеют нулевую вероятность, а это означает, что если в момент времени $t_2$ прибор показал «вверх», то с вероятностью 100% в момент времени $t_1$ электрон имел спин вверх, и аналогично для показания «вниз». Другими словами, электрон до измерения *имел* то состояние, которое и измерили. И так происходит в ОКТ всегда, из-за чего она и претендует на своеобразный реализм: квантовые системы несут с собой те свойства, которые проявляют при измерениях. Единственное «но» состоит тут в том, что это — «*каркас-реализм*»: про одно и то же можно рассказывать истории, пользуясь разными каркасами, и эти истории несовместимы друг с другом. Свойства-то реальны, только реальностей много. Только что сделанное утверждение, что электрон «заранее» обладал измеренным свойством, надо вообще-то переформулировать как «в выбранном каркасе электрон до измерения имел то состояние, которое и измерили».

### *Даже не пытайтесь рассуждать, не подобрав каркас*

Вообще, если в историях, которые вам позволяет рассказывать данный каркас, на ваш взгляд недостаточно подробностей («А если бы спин был направлен вдоль $x$?»), есть только один способ их добавить: построить подходящий каркас, где интересующее вас «если» представлено в качестве одного из альтернативных свойств, и проверить, что он дает основательные истории. Тогда вы получите ответы на все интересующие вас вопросы. Если согласованный каркас, включающий предмет вашего интереса, никак не выходит, попробуйте убрать какие-то другие подробности. И никогда не пытайтесь совместить истории из различных каркасов.

После всего сказанного едва ли покажется удивительным, что «мировоззренческий» вопрос о коллапсе волновой функции оказывается вопросом о выборе каркаса. Проблема коллапса, как мы видели, состоит в изменении, которое «в результате измерения» происходит с волновой функцией: она превращается в одно из собственных состояний измерявшейся величины, а именно то, которое отвечает актуально измеренному значению. Разбор ситуации оказывается чепуховым упражнением для ОКТ. «Происходит» — порядочная бессмыслица, неподходящий способ изъясняться, пока не выбран каркас. В данном случае требуется каркас, в котором истории заканчиваются набором возможностей, различающихся *и* состояниями измерительного прибора, *и* состояниями измеряемой системы. Чуть выше мы интересовались состояниями прибора, но не состояниями системы (электрона) в финальный момент времени $t_2$. Теперь же выделим в этот момент времени не две, а четыре альтернативы, различающиеся состояниями и электрона, и прибора: $|\uparrow\rangle_э|\Uparrow\rangle_п$, $|\uparrow\rangle_э|\Downarrow\rangle_п$, $|\downarrow\rangle_э|\Uparrow\rangle_п$ и $|\downarrow\rangle_э|\Downarrow\rangle_п$. Но это означает, что если прибор показал «вверх», то и спин электрона «оказался» направленным вверх (и аналогично для «вниз») — как если бы произошел коллапс волновой функции электрона!

Картина аналогична и при более замысловатых вариантах выбора финальных альтернатив, и для любых систем — везде, где в копенгагенской интерпретации применяется правило коллапса, в ОКТ можно построить такой каркас, что отвечающие ему истории получат такие вероятности, как если бы использовалось обычное правило Борна и как если бы волновая функция претерпевала коллапс в результате измерения. Создатели ОКТ говорят поэтому, что их подход — это «Копенгаген», только наконец сформулированный правильным образом; их теория ни с чем не борется, но предлагает логически *основательные* интерпретации методов вычислений, которыми «и так все пользуются». С точки зрения ОКТ правило Борна и коллапс в традиционной формулировке — это *вычислительные средства*, упрощающие выкладки. Это не так мало, особенно с учетом громоздкого вычислительного аппарата самой ОКТ, но их ни в коем случае не следует путать с *объяснением* квантовой механики.

### *Копенгаген?*
### *Да, но с человеческим лицом*

Заодно в рамках «каркас-реализма» устраняется напряжение в связи с нелокальным влиянием электронов в ЭПР-паре друг на друга. Во-первых, в ЭПР-паре *есть* довольно очевидная нелокальность, выражающаяся в том, что это состояние двух электронов несовместимо с локальным свойством «иметь спин вверх» для, например, первого электрона. Это, конечно, «все всегда знали», но сторонники ОКТ указывают на этот факт с целью подчеркнуть контраст: да, в ЭПР-парах есть своя нелокальность, но — и это во-вторых — нет нелокальных *воздействий.* Все то, что традиционно обсуждается как нелокальное влияние одного электрона в ЭПР-паре на другой, происходит из-за соединения рассуждений в рамках различных каркасов и тем самым нарушает требование основательности. Состояние $\psi = |\uparrow\rangle_1 |\downarrow\rangle_2 - |\downarrow\rangle_1 |\uparrow\rangle_2$, описывающее ЭПР-пару, нельзя включить в одно разбиение наряду с возможностями, которые могут в принципе встретиться при измерении спинов: $|\uparrow\rangle_1 |\uparrow\rangle_2$, $|\uparrow\rangle_1 |\downarrow\rangle_2$, $|\downarrow\rangle_1 |\uparrow\rangle_2$, $|\downarrow\rangle_1 |\downarrow\rangle_2$. Это значит, что для «понимания» происходящего в ЭПР-паре надо нарисовать каркас, включающий $\psi$ в начальный момент времени, четверку состояний (которые все вместе удовлетворяют условиям полноты и взаимоисключительности) в какой-то другой и, возможно, что-то еще в дополнительные моменты в зависимости от того, на какие вопросы мы ищем ответ. Вычисление вероятностей по обобщенному правилу Борна тогда показывает, что в подходящем каркасе, начиная с любого момента *после* создания ЭПР-пары, каждый из электронов уже обладал тем свойством, которое обнаружилось в измерении, и поэтому никакой необходимости в нелокальном воздействии одного электрона на другой просто нет. «Парадоксальность» же, занимавшая ЭПР и Шрёдингера, проистекает из рассуждения, которое не помещается в один каркас: мы измерили положение частицы 2, и оно оказалось коррелировано с положением частицы 1, а *если бы* мы измерили количество движения частицы 2, то оно оказалось бы коррелировано с количеством движения частицы 1. Никаких «если бы», пока нет единого каркаса, вмещающего все возможные повороты событий! Кроме того, в ОКТ выдвигается и предположительное (как мне кажется, не вполне законченное) объяснение, *почему* в квантовой механике нарушаются неравенства Белла: потому что в самом выводе этих неравенств тем или иным образом нарушается правило единого каркаса; по мнению сторонников ОКТ, предпосылки этих неравенств выражают не локальный реализм, а классический реализм, попросту неприменимый к квантовой механике, так что с их точки зрения ничего удивительного в нарушении этих неравенств нет.

Ограничения, накладываемые на способ рассуждать, оставляют нас в рамках (так и хочется сказать «в каркасе») только таких вопросов, на каждый из которых находится ясный ответ. Правда, каждая серия согласованных ответов — в своем каркасе. Этим в основательной («согласованной») квантовой теории и полагается предел нашему углублению в природу явлений.

*****

**Ускользающая реальность.** Имеется *много* интерпретаций квантовой механики. Одна из самых новых, например, отвергает фундаментальную роль волновой функции [297]. Рука моя не поднимается описывать ее подробности на этой прогулке, где как-никак волновая функция — главный герой; да и в любом случае нужно где-то остановиться среди имеющегося интерпретационного изобилия. Фейнману принадлежит часто цитируемое высказывание: «Я думаю, что могу смело утверждать, что квантовую механику никто не понимает». По итогам этой прогулки должно быть, я надеюсь, понятно, что речь здесь идет не о (сколь угодно сложных) вычислениях с уравнением Шрёдингера, или даже с уравнением Дирака, или с чем бы то ни было еще; это высказывание вообще не об операциональной части «заткнись и вычисляй», а о *смысле* или даже о том, осмысленно ли этот смысл искать. Главная тайна квантовой механики — из каких элементов все-таки состоит мир и в каких отношениях с ними находится волновая функция — продолжает прятаться в собственной тени. Впрочем, хочется закончить чем-то оптимистическим

— точнее, *умеренно оптимистическим* высказыванием одного из ведущих специалистов по обсуждаемой теме:

Немалая доля накала в многочисленных дебатах по поводу оснований квантовой механики порождена, как кажется, ожиданиями, что *одна-единственная* идея должна обеспечить полное решение. Когда этого не случается — когда удается достичь прогресса, но остаются и нерешенные вопросы, — мы порой пренебрегаем возможностью, что идея, лежащая в основе этого прогресса, может представлять собой шаг в правильном направлении, хотя для достижения цели и требуется больше, чем одна идея и один шаг.

В. Зурек

И, конечно, квантовая механика *работает*.

## Добавления к прогулке 11

**Действующие лица.** Бельгийский химик и предприниматель Сольвэ финансировал конференции, которые сыграли немалую роль в становлении современной физики. Первая («Теория излучения и кванты») состоялась в 1911 г., пятая («Электроны и фотоны») — в 1927-м под председательством Лоренца. Фотография участников (рис. 11.11) остается предметом моего восхищения тем, что *такое* собрание легендарных фигур было когда-то возможно; 17 из 29 стали нобелевскими лауреатами (причем Склодовская-Кюри — и по физике, и по химии). Про этот снимок иногда говорят, что это «фото с наивысшим суммарным IQ». На нем, кстати, заметно пренебрежение Шрёдингера к строгой одежде: его спортивный пиджак контрастирует с более формальным стилем всех остальных. (Как-то раз он слегка шокировал Дирака, явившись в фешенебельный отель, где жили участники конференции, в тирольском костюме и с рюкзаком за спиной.) Конференция особенно запомнилась захватывающими дискуссиями-на-все-времена между Эйнштейном и Бором о непротиворечивости и полноте квантовой теории, но включала и многое другое. Бор и Гайзенберг подвергли там массированной критике взгляды Шрёдингера на «волновую механику», основанную на его уравнении. Копенгагенская точка зрения на природу квантов набирала силу; участники разъехались с ощущением, что в вопросах об устройстве квантового мира Эйнштейн, де Бройль и Шрёдингер остались в меньшинстве.

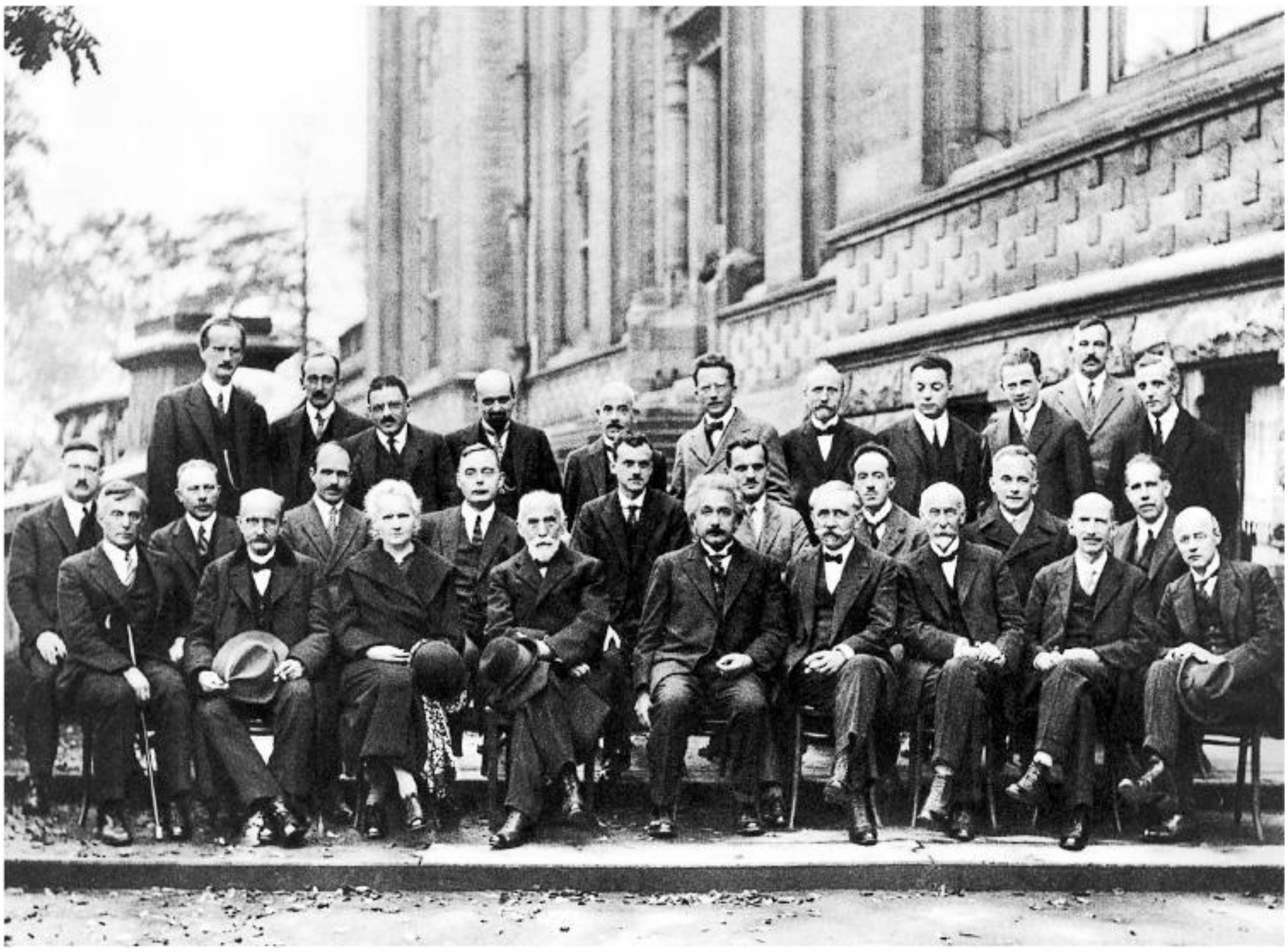


**Рис. 11.11.** Участники Сольвеевской конференции 1927 г. Из знакомых по нашим прогулкам здесь Эренфест (третий слева в заднем ряду), Шрёдингер (шестой там же), Паули (восьмой), Гайзенберг (девятый, он же третий справа); Дирак (пятый слева в среднем ряду), де Бройль (седьмой), Борн (восьмой), Бор (девятый, он же крайний справа); Планк (второй слева в первом ряду), Лоренц (четвертый слева) и Эйнштейн

Сам Сольвэ скончался в 1922 г. в возрасте 84 лет. Он разработал аммиачный способ получения соды из поваренной соли — патент и заводы в ряде стран принесли ему значительные средства. В 1883 г. он совместно с пермским предпринимателем Любимовым построил Березниковский содовый завод, ныне — ОАО «Березниковский содовый завод» со штаб-квартирой в городе Березники Пермского края. В русскоязычной литературе Сольвеевские конференции часто называют конгрессами.

**О вражде, дружбе и неопределенности совсем всерьез.** Схема действий, в соответствии с которой разнообразные величины (координаты, компоненты количества движения и количества вращения, энергия) надевают шляпы и становятся операторами (предписаниями по изменению волновых функций), позволяет максимально точно указать источник «вражды» между некоторыми величинами или, что то же самое, условие, обеспечивающее их «дружбу». Начнем с примера, который сопровождает нас в течение двух прогулок — с операторов $\hat{\mathcal{X}}$ и $\hat{\mathcal{P}}_x$, построенных по координате *x* и количеству движения вдоль того же направления. Результат применения их к волновой функции одного за другим зависит от выбранного порядка действий. Вообще, это не очень странно, если сравнивать с чем-то бытовым: сначала нарезать, а затем пожарить дает, как правило, несколько другой результат, чем сначала пожарить, а потом нарезать. В случае, когда два оператора действуют на волновую функцию сначала в одном порядке, а потом в другом, способ математически точного сравнения двух результатов состоит в том, чтобы просто вычесть один из другого, т.е. составить разность $\hat{\mathcal{X}}(\hat{\mathcal{P}}_x\Psi)-\hat{\mathcal{P}}_x(\hat{\mathcal{X}}\Psi)$. Если разность окажется равной нулю, значит, от порядка, в котором действуют операторы, ничего не зависит (такое, конечно, бывает и в жизни: сначала посмотреть на часы, а потом на термометр или наоборот). Но в данном случае разность *не* равна нулю: $\hat{\mathcal{P}}_x(\hat{\mathcal{X}}\Psi)-\hat{\mathcal{X}}(\hat{\mathcal{P}}_x\Psi) = (\text{постоянная})\cdot\Psi$, и это имеет место для всех без исключения волновых функций. От волновой функции здесь на самом деле ничего не зависит, обсуждаемое свойство — это свойство самих операторов $\hat{\mathcal{X}}$ и $\hat{\mathcal{P}}_x$. Для сравнения, если взять компоненту количества движения вдоль другого направления, прекрасно получается нуль: $\hat{\mathcal{P}}_y(\hat{\mathcal{X}}\Psi)-\hat{\mathcal{X}}(\hat{\mathcal{P}}_y\Psi) = 0$.

*Не нуль* в подобных выражениях — причина, из которой с математической неизбежностью следует, что две величины «враждуют», т.е. не могут иметь численные значения одновременно. Каждой физической величине отвечает оператор, полученный «надеванием шляпы» на эту величину, и враждуют те и только те, для которых действие *их* операторов на волновые функции дает разные результаты при применении в разном порядке. Постоянная, возникающая при сравнении двух последовательностей действий, *всегда* пропорциональна постоянной Планка ħ — из-за чего мы и говорили на прогулке 10, быть может, несколько вольно, что вражда происходит из-за того, что постоянная Планка вторгается в отношения тех или иных величин. Правда, без работы тогда не остается наш дежурный фокусник: он ловко строит одни состояния из других именно для тех пар величин, которые враждуют так же, как координата и количество движения вдоль одного и того же направления.

**Эксперименты против лазеек в неравенствах Белла.** Нарушение неравенств Белла неоднократно проверялось экспериментально, в том числе в последнее время, с целью исключения каких-либо «лазеек», которые могли бы спасти локальный реализм. Использование все более современных приборов и технологий делает возможными весьма изощренные по своей постановке эксперименты. Дополнительная мотивировка таких исследований состоит в том, что запутанность лежит в основе квантовых компьютеров и квантового шифрования, из-за чего вопрос о природе запутанности (и если она все же опирается на скрытые параметры, то и о способах воздействия на нее) приобретает явное практическое значение. При проверках нарушения неравенств Белла следовало прежде всего исключить даже принципиальную возможность обмена сигналами между «Аней» и «Яшей» (разумеется, со скоростью, ограниченной скоростью света). Выбор направлений a или a′ и b или b′, под которыми они ориентировали свои детекторы, делался в экспериментах двумя квантовыми генераторами случайных чисел, которые срабатывали каждый раз, когда очередная запутанная пара (фотонов, с которыми намного удобнее работать, чем с электронами) была уже в пути от места создания к детекторам; два события выбора ориентации были причинно не связанными между собой. Неравенства Белла оказались успешно нарушенными, «коммуникационная» лазейка была таким образом исключена, но внимание затем переключилось на «лазейку выборки». Дело в том, что эксперименты требуют измерений со множеством запутанных пар, на основе которых затем вычисляются средние, но в реальности в формировании этих средних участвуют не все запутанные фотоны, которые производит «Петя», — по той простой причине, что детекторы одиночных фотонов не обеспечивают стопроцентный уровень регистрации. Что, если экспериментаторы наблюдают лишь «перекошенную» выборку, а если бы они анализировали *все* запутанные пары, то неравенства Белла не нарушались бы? В 2015 г. технически сложный эксперимент по измерению спинов двух *электронов*, каждый из которых был связан с точечным дефектом в своем образце алмаза (но которые тем не менее удалось запутать на расстоянии 1280 м друг от друга), исключил лазейку выборки, причем заодно с лазейкой коммуникации. Почти одновременно две другие группы экспериментаторов смогли добиться того же результата и в опытах с фотонами.

Но это не все, что надлежало проверить; еще одна лазейка хорошо иллюстрирует характер применяемого здесь критического мышления. Да, за выбор между направлениями a и a′ и направлениями b и b′ отвечали квантовые генераторы случайных чисел; но ведь *если* исходы событий управляются скрытыми параметрами, то это должно в равной мере относиться и к созданию запутанной пары, и к работе самих генераторов! А тогда в прошлом могла бы, в принципе, иметься причина, действие которой внесло некоторую корреляцию в распределение скрытых параметров при производстве пары и при выборе направлений. При этом, как выясняется, корреляции могли бы быть вполне «мягкими»: чтобы «симулировать» такое же нарушение неравенств Белла, как то, что обеспечивает квантовая механика с правилом Борна, достаточно обмена информацией в 20 раз меньшего объема, чем требовалось бы передавать внутри ЭПР-пар, если открыто нарушать локальность (т.е. посылать сигналы быстрее света). Для устранения этой лазейки — фактически отсутствия полной свободы в процессе измерения — применялись два подхода. В первом использовался человеческий фактор: 30 ноября 2016 г. более 100 000 волонтеров по всему миру играли в специальную компьютерную игру, целью которой было произвести «как можно более случайный» набор нулей и единиц, которые и использовались для выбора направлений/ориентации в детекторах. Оказалось, что неравенства Белла успешно нарушаются, когда экспериментом управляет «совокупная воля» всех участников. Во втором подходе для выбора ориентации детекторов использовался свет от далеких объектов: в первоначальном варианте — от звезд в нашей Галактике, а около года спустя (в 2018 г.) от двух квазаров, находящихся на расстоянии 7,78 млрд и 12,21 млрд световых лет от нас. Было задействовано два телескопа: в зависимости от характеристик света, приходящего «сейчас» в телескоп «у Ани», ее детектор переключался между ориентациями 22,5° и 67,5°; другой телескоп управлял переключением детектора между ориентациями 0° и 45° «у Яши». Были, разумеется, приняты меры, чтобы в принципе исключить причинную связь между событиями выбора у Ани и у Яши. В таком случае, если какая-то причина все же обеспечивает нарушения неравенств Белла, действуя через скрытые параметры, то она по необходимости должна находиться в таком далеком прошлом, чтобы влиять на *оба* квазара. Насколько далеком? Здесь вовлечены уже космологические расстояния, поэтому при определении «общего прошлого» (пересечения световых конусов прошлого) для событий, когда каждый из квазаров испустил свет, использованный в эксперименте, потребовалось учитывать расширение Вселенной. В результате оказалось, что гипотетическая общая причина должна была действовать никак не позднее, чем 13,15 млрд лет назад. Таков вывод из опыта. Приходится заключить, что идея, будто причины нарушения неравенств Белла действуют из столь далекого прошлого, уводит нас в область конспирологии, чтобы не сказать фантастики (снабжая, впрочем, не самой плохой затравкой для сюжета фантастического произведения).

*Вселенский заговор очень маловероятен*

**Телепортация.** Квантовая телепортация — это передача *состояния* (волновой функции) на расстояние с использованием главного ресурса — ЭПР-пары, про которую в данном случае говорят как про квантовый канал связи, и вспомогательного ресурса — обычного, классического канала связи («телефонной линии»). Отправляемая «посылка» представляет собой спиновое состояние $a \cdot |\uparrow\rangle + b \cdot |\downarrow\rangle$ отдельно взятого электрона. Его, как и любую волновую функцию, нельзя *наблюдать* (потому что результат любого измерения — одно из двух состояний $|\uparrow\rangle$ или $|\downarrow\rangle$, но не числа $a$ и $b$), но ее, оказывается, можно *переслать* [298].

Основа инфраструктуры — заранее приготовленная ЭПР-пара: один из электронов держит у себя Аня (скажем, на Земле), а другой удалось доставить Яше (на Луну). Сделать это надо заранее; и использовать ЭПР-пару можно только один раз. Я запишу состояние этой пары, явно указывая принадлежность каждого электрона Ане или Яше: $|\uparrow\rangle_А|\downarrow\rangle_Я - |\downarrow\rangle_А|\uparrow\rangle_Я$. Сама по себе она никакой «полезной информации» не несет, это такая же ЭПР-пара, как и все остальные. Чтобы не запутаться в трех электронах, вот что имеется перед началом работы:

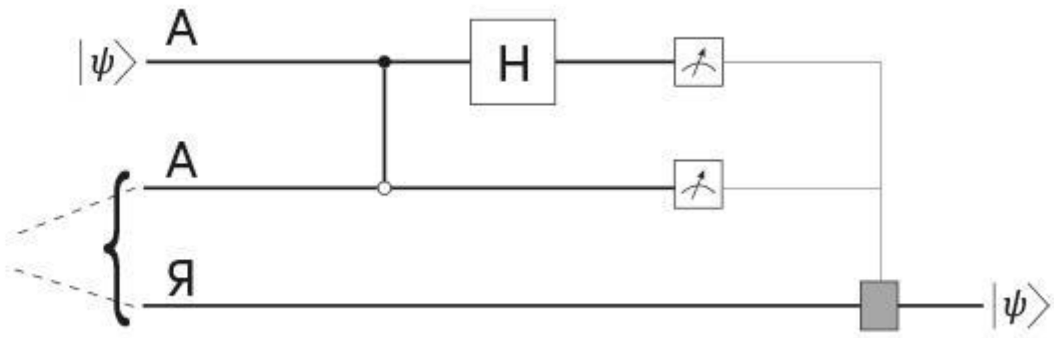



**Рис. 11.12.** Квантовая телепортация: передача спинового состояния с помощью ЭПР-пары и двухбитового сообщения. Горизонтальные линии условно изображают три электрона. Верхняя из них представляет электрон в лаборатории А. в спиновом состоянии $\psi = a \cdot |\uparrow\rangle + b \cdot |\downarrow\rangle$, которое требуется передать в лабораторию Я. Двойные линии означают классический канал связи («телефонную линию»), по которому передается двухбитовое сообщение

*у Ани:*

• электрон в спиновом состоянии $a \cdot |\uparrow\rangle + b \cdot |\downarrow\rangle$, которое требуется передать; я буду называть этот электрон электроном-посылкой (хотя в результате на Луне появится не он сам, а его спиновое состояние);

• электрон $|\ \rangle_{А}$ из ЭПР-пары, про спиновое состояние которого нельзя высказаться определенно;

*у Яши:*

• электрон $|\ \rangle_{Я}$ из ЭПР-пары, про спиновое состояние которого нельзя высказаться определенно.

То, что происходит дальше, схематически изображено на рис. 11.12. Основную работу выполняет Аня, оперируя в своей лаборатории двумя электронами. Сначала она изменяет состояние *обоих* своих электронов — применяет к их волновой функции некоторое специальное предписание. Это показано знаком на рисунке. Затем она применяет некоторое преобразование к состоянию только одного электрона, что показано знаком $\boxed{H}$. Яша находится далеко и не делает пока ничего. Аня, наконец, *измеряет* спины двух своих электронов. Измерения условно показаны значком со стрелкой и шкалой. В результате может получиться одна из четырех возможностей $|\uparrow\rangle\ |\uparrow\rangle_{А}$, $|\uparrow\rangle\ |\downarrow\rangle_{А}$, $|\downarrow\rangle\ |\uparrow\rangle_{А}$ и $|\downarrow\rangle\ |\downarrow\rangle_{А}$ (выбор между ними, разумеется, неконтролируемый). Этот результат Аня и передает Яше «по телефону» в виде одного из сообщений 00, 01, 10 и 11; это два бита информации. В зависимости от содержания полученного послания Яша делает одно из четырех заранее запланированных преобразований над своим электроном. В результате его электрон гарантированно оказывается в состоянии $a \cdot |\uparrow\rangle + b \cdot |\downarrow\rangle$, которое и требовалось передать. Секрет всего «фокуса» — запутанность, т.е. особый вид корреляции между спинами в ЭПР-паре. Вот что получается в конце работы:

*у Ани:*

• электрон-посылка и электрон $|\ \rangle_А$ из ЭПР-пары, находящиеся в одном из четырех возможных состояний, которые получились в результате измерения их спинов: $|\uparrow\rangle\,|\uparrow\rangle_А$, $|\uparrow\rangle\,|\downarrow\rangle_А$, $|\downarrow\rangle\,|\uparrow\rangle_А$ и $|\downarrow\rangle\,|\downarrow\rangle_А$;

*у Яши:*

• электрон, ранее бывший частью ЭПР-пары, а теперь оказавшийся в состоянии $a \cdot |\uparrow\rangle_Я + b \cdot |\downarrow\rangle_Я$.

ЭПР-пара при этом «погибает»: два ее электрона больше не запутаны, их ресурс корреляции истрачен, и больше использоваться для передачи информации они не могут. Зато Яшин электрон приобрел в точности то спиновое состояние, в котором исходно находился электрон-посылка. Это состояние определяется, конечно, числами a и b; они передаются Яшиному электрону с абсолютной математической точностью — несмотря на то, что числа эти ненаблюдаемы и остаются неизвестными и Ане, и Яше. Письмо, прочитать которое невозможно!

### *Телепортируется не электрон, а состояние*

Получается это следующим образом. Состояние всех трех электронов в начале работы — это состояние электрона-посылки и ЭПР-пара; как всегда в таких случаях, мы их перемножаем, чтобы получить состояние полной системы:

$$(a \cdot |\uparrow\rangle + b \cdot |\downarrow\rangle)\,(|\uparrow\rangle_А|\downarrow\rangle_Я - |\downarrow\rangle_А|\uparrow\rangle_Я).$$

Электрон-посылка ни с чем пока не запутан. Здесь можно, конечно, раскрыть скобки по обычным правилам, не забывая только всегда писать состояния, относящиеся к электрону-посылке, первыми. Получится состояние

$$a \cdot \underline{|\uparrow\rangle\,|\uparrow\rangle_А}|\downarrow\rangle_Я - a \cdot \underline{|\uparrow\rangle\,|\downarrow\rangle_А}\,|\uparrow\rangle_Я + b \cdot \underline{|\downarrow\rangle\,|\uparrow\rangle_А}|\downarrow\rangle_Я - b \cdot \underline{|\downarrow\rangle\,|\downarrow\rangle_А}|\uparrow\rangle_Я.$$

Во власти Ани — действия с первыми двумя состояниями в каждом слагаемом, потому что у нее находятся именно первые два электрона; они подчеркнуты. В ее лаборатории имеется два устройства. Одно из них «переворачивает» спин второго электрона, если первый находится в состоянии со спином вверх, и не делает ничего, если первый находится в состоянии со спином вниз. «Перевернуть» означает заменить $|\uparrow\rangle$ на $|\downarrow\rangle$ и наоборот. Например, $|\uparrow\rangle|\uparrow\rangle_A$ заменится в результате на $|\uparrow\rangle|\downarrow\rangle_A$. Другое устройство изменяет состояние только первого электрона так, что $|\uparrow\rangle$ переходит в $|\uparrow\rangle - |\downarrow\rangle$, а $|\downarrow\rangle$ переходит в $|\uparrow\rangle + |\downarrow\rangle$. На рис. 11.12 эта операция обозначена буквой H — на этот раз в честь Адамара (Hadamard), а не Гамильтона.

Все эти действия никаким образом не зависят от того, каковы числа *a* и *b*: основа всего происходящего в том и состоит, что правила изменения состояний имеют дело с самими $|\uparrow\rangle$ и $|\downarrow\rangle$, а не с числами, на которые они умножаются. После выполнения всех действий состояние трех электронов описывается более длинной суммой, чем выписана выше, — из восьми слагаемых. В ней присутствуют все восемь вариантов расстановки стрелок вверх и вниз в тройных произведениях $|\ \rangle|\ \rangle_A|\ \rangle_Я$, а в качестве коэффициентов перед различными

слагаемыми там возникают комбинации
чисел $a$ и $b$ (собственно говоря, попросту числа $a$, $b$, $-a$ и $-b$).

Предположим сначала, что проведенное Аней измерение дало результат «вниз-вверх», т.е. $|\downarrow\rangle\,|\uparrow\rangle_А$. Такой результат может реализоваться потому, что в состоянии, имевшемся прямо перед измерением, присутствуют слагаемые $|\downarrow\rangle\,|\uparrow\rangle_А\,|\uparrow\rangle_Я$ и $|\downarrow\rangle\,|\uparrow\rangle_А\,|\downarrow\rangle_Я$ с некоторыми коэффициентами. Кроме них, там имеется и шесть других слагаемых, но после того, как измерение дало результат «вниз-вверх», никакие другие возможности не реализовались, и поэтому в волновой функции остаются *только* два указанных слагаемых. А из простой арифметики преобразований, которые сделала Аня, следует, что они умножены на те же числа $a$ и $b$: волновая функция, другими словами, оказалась равной $a \cdot |\downarrow\rangle\,|\uparrow\rangle_А\,|\uparrow\rangle_Я + b \cdot |\downarrow\rangle\,|\uparrow\rangle_А\,|\downarrow\rangle_Я$. Но это же можно записать в виде произведения $|\downarrow\rangle\,|\uparrow\rangle_А(a \cdot |\uparrow\rangle_Я + b \cdot |\downarrow\rangle_Я)$. В скобках здесь — спиновое состояние Яшиного электрона. Если действительно Аня получила в своем измерении результат «вниз-вверх», то Яшин электрон «сам собой» оказался в том состоянии, которое и надо было передать!

Правда, Аня может обнаружить и три другие возможности для спинов своих электронов. В каждом из этих случаев Яшин электрон тоже оказывается во вполне определенном спиновом состоянии, но оно не совпадает с тем, что требовалось передать. Тем не менее его можно немного подправить, чтобы оно в точности совпало. «Подправить» означает, что от Яши требуются действия, не зависящие (и это главное!) от чисел $a$ и $b$: в одном случае — если измерение Ани дало «вверх-вверх» — ему надо сделать над своим состоянием преобразование, заменяющее $|\uparrow\rangle_Я$ на –

$|\uparrow\rangle_я$ (изменение знака); в двух других случаях требуется преобразование, заменяющее $|\downarrow\rangle_я$ на $|\uparrow\rangle_я$ и $|\uparrow\rangle_я$ на $|\downarrow\rangle_я$, после чего нужно еще изменить знаки. В любом случае Яшин электрон в итоге гарантированно оказывается в том же спиновом состоянии, что и электрон-посылка. Все, что нужно Яше, — короткое сообщение о том, какой из четырех вариантов случился у Ани.

В реальности почти всегда используют не электроны, а фотоны. У них тоже два спиновых состояния, которые все же удобнее обозначать не стрелками, а как $|0\rangle$ и $|1\rangle$; числа 0 и 1, как, впрочем, и стрелки, — удобная условность. Стандартная ЭПР-пара для фотонов, которую используют Аня и Яша, имеет вид $|0\rangle_А |1\rangle_я + |1\rangle_А |0\rangle_я$. Получив для передачи фотон-посылку $a \cdot |0\rangle + b \cdot |1\rangle$, Аня точно так же выполняет с двумя своими фотонами манипуляции двух видов, а потом проводит измерение; в результате числа $a$ и $b$ внедряются в состояние Яшиного фотона, и после необходимой коррекции, выполняемой в соответствии с полученным коротким сообщением, Яша может быть уверен, что у него возник фотон точно в том состоянии, которое исходно было у фотона-посылки. Квантовая телепортация была неоднократно осуществлена на практике: один из впечатляющих результатов на сегодняшний день — передача состояния фотона на 1400 км («Яша» сидел на спутнике) [299].

**Скиталец с пси-функцией.** Через шесть лет после 5-й Сольвеевской конференции, в 1933-м, Шрёдингер приехал на 7-ю конференцию уже в статусе, близком к беженскому: из-за нелюбви к новому режиму он только что оставил свою престижную профессорскую кафедру в Берлинском университете (на которой в 1927 г. сменил Планка) и после отдыха в Южном Тироле отправился в Оксфорд, где для ряда ученых, покидавших Германию, была создана возможность временного трудоустройства. По пути в Англию, в октябре, он и заехал на конференцию в Брюссель. Шрёдингер был одним из немногих немецких ученых [300], не имевших еврейских корней, но уехавших из Германии после прихода к власти нацистов. Он был осторожен в высказываниях, но достаточно ненавидел новую власть, чтобы в 46 лет оставить свое привилегированное положение в Берлине и отправиться в неизвестность [301]. (Позднее нацисты планомерно изъяли из анналов престижной Прусской академии наук упоминания только о двух ее членах: это были Эйнштейн и Шрёдингер.) Вскоре после его приезда в Оксфорд ему была присуждена Нобелевская премия по физике за 1933 г.; помимо прочего, это был весомый вклад в укрепление его положения в чужой стране [302]. Спустя несколько месяцев Шрёдингер отправился читать лекции в США, но отклонил сделанное ему там предложение стать профессором в Принстоне. Причин (несмотря на жалованье, примерно в два раза превышавшее его оксфордское) было, видимо, несколько; *некоторый* вклад могли внести и воспоминания о его поездке по США в начале 1927 г. — невозможность заказать за обедом бокал вина или кружку пива («К дьяволу сухой закон!»). Университетский мир Оксфорда и Шрёдингер, однако, не слишком хорошо подходили друг другу; некоторые проблемы были академического толка, а некоторые коренились в непростой личной жизни Шрёдингера, *особенно* выделявшейся на фоне довлевшего тогда в Оксфорде уклада. В конце 1935 г. заканчивалось финансирование, найденное для приехавших из Германии ученых; для Шрёдингера его удалось продлить на два года, но в целом будущее делалось все менее определенным. В 1936-м попытка занять предложенное ему место профессора в Эдинбурге не удалась из-за проволочек в оформлении иностранца, а пока оно тянулось, пришло приглашение из университета в австрийском Граце; оно, что немаловажно, включало в себя и почетную позицию в Венском университете. (Профессором в Граце в свое время был Больцман.) Позднее Шрёдингер описывал свое решение перебраться в Грац в 1936 г. как «беспрецедентную глупость» в свете накалявшейся политической ситуации. В университете уже была сильна и постоянно крепла поддержка национал-социализма. Перед Шрёдингером разворачивалось все то, из-за чего он уехал из Берлина. В марте 1938 г. Австрия была присоединена к Германии, что полностью развязало руки местным нацистам. Насилие и репрессии в отношении евреев стали массовыми; в Граце, впрочем, это ощущалось слабее, чем в Вене, поскольку Грац уже некоторое время был под сильным влиянием нацистов. Шрёдингер знал, что находится под наблюдением. Новый ректор университета посоветовал ему написать открытое письмо, подтверждающее его «благонадежность». 30 марта оно было опубликовано в местной газете. В последующие годы Шрёдингер не раз высказывал сожаления по поводу этого (умеренно) верноподданнического по отношению к фюреру текста, но тогда, в марте 1938-го, он надеялся, что письмо стабилизирует его отношения с властями после неожиданного (во всяком случае, для самого Шрёдингера) изменения статуса его родной страны. Однако 23 апреля он получил извещение о прекращении его почетной позиции в Вене. Университет Граца тем временем становился одним из главных центров нацистского обучения; в Германии же вспомнили о бегстве Шрёдингера из Берлина по политическим мотивам, и фон Риббентроп передал британскому послу, что возобновление лекций профессора Шрёдингера в Оксфорде нежелательно. В Британии открытое письмо Шрёдингера подпортило его репутацию среди других эмигрантов, да и среди британских ученых, когда выяснилось, что он писал его не в концентрационном лагере, как первоначально предполагали. Ирландский тишок (премьер-министр) Имон де Валера, узнав из газет об увольнении Шрёдингера, задался вопросом, как можно было бы вступить с ним в контакт, не ухудшив этим его положения в Австрии. Де Валера был по образованию математиком (несколько раз сидевшим в тюрьме в период борьбы за независимость) и разглядел возможность создать в Дублине новый Институт перспективных исследований, который повторял бы модель такого института в Принстоне (очевидно, в той мере, в какой это было возможно в бедной Ирландии), со Шрёдингером в качестве ключевой фигуры. Он обратился к британскому математику Уиттекеру, а тот — к Борну, который передал сообщение друзьям в Цюрихе; те, по словам Анни Шрёдингер, привлекли к делу «голландца, который поехал в Вену», где нашел мать Анни, которая на клочке бумаги написала несколько строк про возможность создания института в Дублине. «[Мы] прочитали ее три раза и потом уничтожили, бросив в огонь», — пишет Анни. Через друзей в Констанце они передали Борну свою положительную реакцию по поводу института, добавив, однако, что сначала им надо выбраться из Австрии. В августе Шрёдингера уволили уже «совсем», указав в качестве причины его политическую неблагонадежность. Оставив все ценности, включая нобелевскую медаль и цепочку члена Папской академии наук, упаковав вещи в три чемодана и не решившись добираться до вокзала в Граце на такси, Шрёдингеры с 14 марками в карманах сели на поезд, идущий в Рим; свою машину они оставили на мойке недалеко от вокзала.

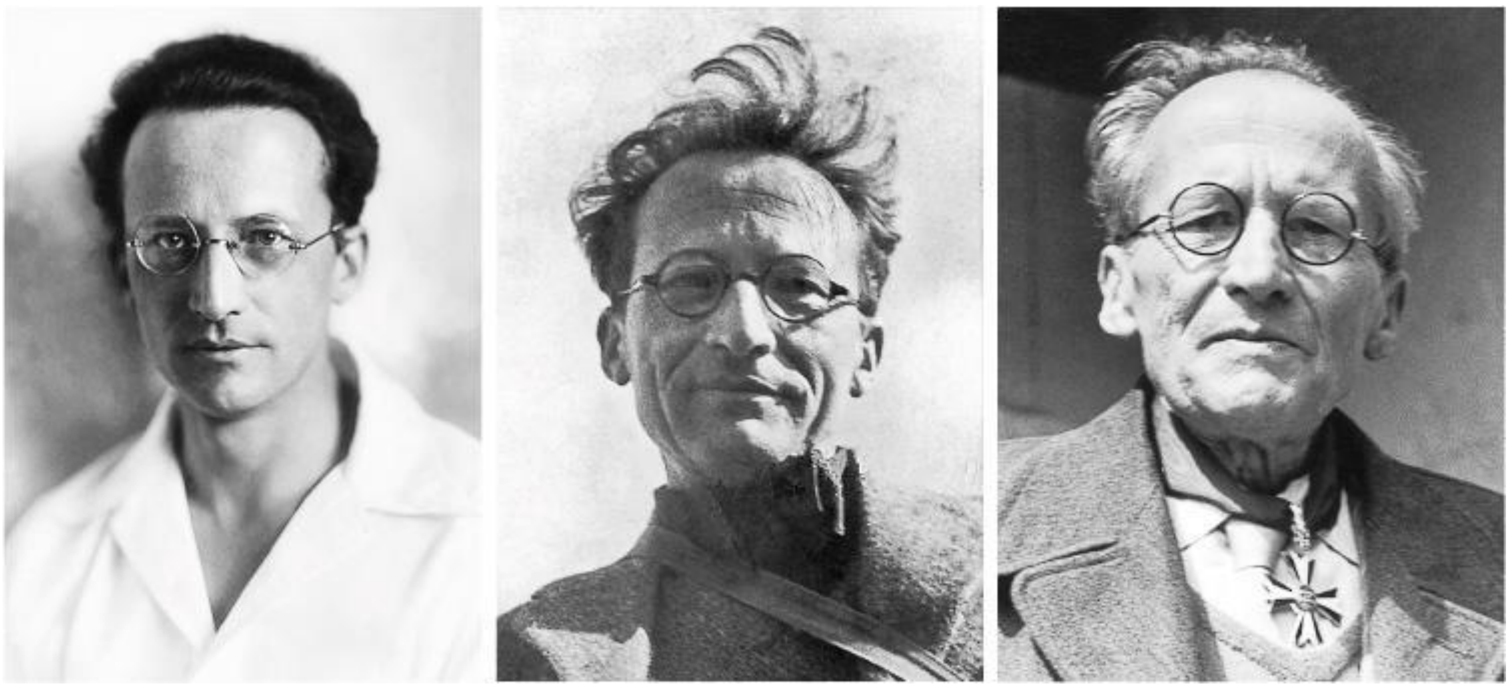


**Рис. 11.13.** Эрвин Шрёдингер в разные периоды жизни

К слову, в 1599 г. из Граца изгнали Кеплера — вместе с другими преподавателями-протестантами. Со следующего, 1600 года Кеплер работал в обсерватории Браге недалеко от Праги; его пребывание там прервалось в 1612 г. по политическим причинам.

А в 1938-м Шрёдингеры остановились в Риме в Папской академии наук. Туда им позвонил де Валера, находившийся в это время в Женеве, и после относительно небольших приключений на границе со Швейцарией они добрались до Женевы на поезде. Институт еще не был организован, Шрёдингер недолгое время провел в Оксфорде, а на 1938/39 академический год принял приглашение из бельгийского Гента. В мае Гентский университет решил присудить ему почетную степень, вручение которой было запланировано на октябрь, но 1 сентября началась война. Путешествие в Ирландию через Британию оказалось связанным с некоторыми сложностями из-за визы для гражданина враждебного государства, но 6 октября Шрёдингеры в конце концов добрались до Дублина. Во Второй мировой войне Ирландия сохраняла нейтралитет. Став через девять лет (в 1948 г.) гражданином Ирландии, Шрёдингер прожил там до 1956-го, когда вернулся в Вену.

Для меня Институт перспективных исследований в Дублине оказался первым западным научным центром, который я посетил как ученый. Много позже я приехал и в Международный институт математической физики имени Эрвина Шрёдингера в Вене; в нем всего несколько постоянных штатных единиц, а характер его деятельности — предоставление условий для работы ученым, приезжающим на время для участия в *программах*. Программы, с характерной продолжительностью в несколько месяцев, отбираются на конкурсной основе, что поддерживает международный характер науки и «соревновательный» способ ее развития. Собравшиеся ученые временно объединяют усилия для получения совместных конкурентных преимуществ перед другими; затем, с учетом достигнутого прогресса, сотрудничество организуется в других комбинациях, и процесс продолжается — будем надеяться, безостановочно. В том, что в городе, где Шрёдингер родился, но провел так мало времени, постоянно собираются ученые из разных стран, можно усмотреть своеобразное зеркальное отражение его скитаний.

## Признания и литературные комментарии

Возможность сложения состояний (волновых функций) называется принципом суперпозиции (т.е. наложения). Говоря о волновых функциях, их суперпозициях и правиле Борна, я систематически игнорировал наличие комплексных чисел (единственное исключение — вскользь прозвучавшее замечание о стационарных состояниях, да и оно сделано по настойчивой просьбе редактора). Волновые функции можно умножать на комплексные числа, поэтому получение вероятностей по правилу Борна требует не просто возведения в квадрат, но и дополнительного действия, которое делает результат пригодным для того, чтобы быть вероятностью. Из-за той же фигуры умолчания несколько загадочными могут показаться и подробности рецепта, который фокусник предлагает для построения собственного состояния количества движения из собственных состояний координаты: эти последние входят в сумму каждый со своим коэффициентом, и все эти коэффициенты различны, но все отвечающие им вероятности оказываются одинаковыми. Подобное умолчание не прошло бесследно в том отношении, что лишило меня удовольствия записать уравнение Шрёдингера так, чтобы в нем фигурировала постоянная

Планка $\hbar$; и поделом мне! Повторю также свое признание, сделанное на предыдущей прогулке, что и спиновые состояния вроде $|\uparrow\rangle$ тоже несут с собой комплексные коэффициенты; их удачным образом не содержат соотношения между спиновыми состояниями вдоль $x$ и вдоль $z$, которыми поэтому все так широко и пользуются.

Возвращаясь к волновым функциям в целом, я практически полностью (если не считать пары не очень внятных намеков) обошел вниманием структуру гильбертова пространства. На этом фоне совсем уж и не прегрешение — мое систематическое равнодушие к нормировке волновых функций. Нечего и говорить, что я и близко не подхожу к теме эрмитовости операторов; пожалеть в связи с этим можно об оставшейся за рамками обратимости по времени для эволюции, которую определяет уравнение Шрёдингера.

Обозначение $|\ \rangle$, вместе с иногда употребляющимся для него названием «кет», появилось (как и обозначение $\hbar$) в книге Дирака "The Principles of Quantum Mechanics" [11], оригинальное издание которой вышло в 1930 г. Пожалуй, это моя любимая книга по квантовой механике. Странствия Шрёдингера, описанные в добавлениях, — наикратчайшее резюме нескольких глав из довольно всеобъемлющего изложения [92], откуда я многое почерпнул (и которое цитирую в тексте). Цитаты из Тегмарка по поводу его разговоров с Уилером, как и вся идея «квантового бессмертия», взяты из книги [31]. Разнообразные биографические подробности об Эверетте собраны костромским историком Евгением Шиховцевым — моим основным источником по этому поводу. Материал доступен на странице Тегмарка https://space.mit.edu/home/tegmark/everett/.

Рассуждение с ящиками А и Б для очередного испытуемого кота критически анализируется в [90]. Треки на рис. 11.3 оставлены в 1960 г. в первой пузырьковой камере ЦЕРНа: https://cds.cern.ch/record/39474.

Споры Эйнштейна и Бора о «содержании» квантовой механики рассматриваются в популярном изложении в книге [16], которая — не без некоторого элемента драмы — приглашает к знакомству с темой самую широкую аудиторию. В том, что касается периода создания квантовой механики, много подробностей и о действующих лицах, и о содержании формулируемой ими теории можно найти в [22]. Фамилии, которые я упоминаю в коротких исторических экскурсах, заведомо не составляют сколько-нибудь исчерпывающий список; это *не* систематическое изложение. Заметный, но далеко не единственный пробел — Борн и Йордан, развивавшие «матричную» квантовую механику в соавторстве с Гайзенбергом. Полноценное изложение этого сюжета требует немалого количества подробностей, а выборочное представление лишь некоторых аспектов, которое нередко встречается в книгах по квантовой механике, как правило, далеко от реальной, наполненной противоречиями истории и обычно приводится лишь с целью поддержать выбранную автором логику построения предмета. (Попутное замечание: в начале 1936 г. Борн всерьез рассматривал предложение Капицы переехать для работы в Москву и даже начал учить русский язык; примерно в это же время Розен принял предложение Киевского университета, но проработал там недолго.) Из числа ученых, совсем не связанных с созданием квантовой механики, я хотел рассказать, но не рассказал о Гамильтоне, имя которого теперь используется для самого главного оператора в квантовой механике. Он среди прочего придумал кватернионы: как говорится в [15], они возникли перед его мысленным взором внезапно и сразу в окончательном виде, когда он прогуливался вдоль канала неподалеку от Дублина (ныне — в окраинном районе города). Гамильтониан (энергия, выраженная через координаты и количества движения) управляет эволюцией во времени и в классическом (неквантовом) мире, только там требуется меньше математических абстракций и применяются более простые средства для того, чтобы энергия могла воздействовать на координаты и количества движения всех участников событий.

Говоря о копенгагенской интерпретации квантовой механики, я допускаю вольность, несколько произвольно объединяя ее с тем, что также известно как «стандартная» интерпретация, в значительной степени восходящая к фон Нейману. Различия между ними и собственно взгляды самого Бора анализируются, например, в [68]. Тщательное рассмотрение оригинальной работы ЭПР и связанной с ней переписки Эйнштейна доступно в [70]. Теоремы Белла обсуждаются во многих местах, включая книги [90, 96, 76], а также [94]. Обзор экспериментов по исключению различных «лазеек», посредством которых нарушение неравенств Белла можно было бы согласовать с локальным реализмом, и ссылки на оригинальные работы приведены в [79]. Интерпретации квантовой механики — неисчерпаемая тема, стоит только один раз выбраться за рамки традиционной/копенгагенской, поэтому сюжеты, которые я выбрал для обсуждения, никак не претендуют на полноту. (Сергей Нечаев не одобряет мой выбор интерпретаций, что не в последнюю очередь свидетельствует о мозаичности всей «интерпретационной картины».) Кроме того, я полностью обошел молчанием теорему Глисона, теорему Кохена — Спекера и теорему ПБР (Пьюзи, Баррет, Рудольф), как и ряд других вопросов, быстро уводящих в разветвления, конца которым не предвидится; я прошу прощения у тех, кто считает, что любая из этих теорем так же важна для понимания квантовой механики, как и теоремы Белла. Источник цитаты Белла о бомовской механике — статья [45]. Каким образом постулируемое поведение бомовских точечных частиц приводит к наблюдаемым квантово-механическим эффектам, рассматривается в работах [97] и [98], а также в книге того же автора [96]. В книге, кроме того, обсуждается ряд проблем квантовой механики, включая измерения и локальность, а также несколько интерпретаций:

копенгагенская, бомовская, ГРВ и многомировая. Основательная квантовая теория из первых рук — предмет книги [76]; мне пригодилось также изложение [80]. Подход ГРВ ясно изложен (с участием одного из авторов исходной идеи) в [74], а также, несколько более критически, в книге [90]. Цитата Зурека взята из статьи [112].

За исключением «основательных» (декогерирующих) историй, я почти совсем не обсуждал декогеренцию и совсем не обсуждал возникновение классического мира из квантового. Литература здесь весьма обширна, сошлюсь только на один очень энергичный обзор [106] и еще один, содержащий большее число подробностей и к тому же обновленный весной 2020 г., что позволяет найти там большинство ключевых ссылок: [43]. Отдельную большую тему, целиком оставшуюся в стороне, составляет интеграл по траекториям — впечатляющее изобретение Фейнмана, выросшее из сделанного вскользь замечания Дирака.

Как оказалось, я обошелся без волн де Бройля и (почти) без «корпускулярно-волнового дуализма». О них говорится практически в любом изложении квантовой механики, поэтому я за них не переживаю. (За опыт с одиночными электронами, проходящими через два отверстия в экране, я тоже не переживаю — он обсуждается *везде*.) В продуманных изложениях обычно добавляют, что корпускулярно-волновой дуализм *не* означает, что квантово-механическая «частица» — это и частица, и волна; напротив, он означает, что она не есть ни частица, ни волна. Ну и хорошо.

## Движение на прогулке 11

Наши возможности делать заключения о происходящем в мире основаны на наблюдении материальных последствий движения — наблюдении макроскопических кусков материи, изменивших или изменяющих свое положение. О внутренних свойствах квантовых объектов мы в состоянии судить благодаря запутыванию этих свойств с движением. «Непосредственного доступа» к ним у нас нет, и лучшее имеющееся объяснение квантового мира требует развития абстрактных понятий и строится в терминах ненаблюдаемых объектов — состояний (волновой функции). Описание движения при этом также в значительной мере растворяется в череде абстракций; понятия положения, количества движения (скорости) и энергии приобретают новый способ существования, не как числа, а как операторы — математические конструкции, выражающие собой готовность воздействовать на волновую функцию. Построенное с их использованием уравнение Шрёдингера описывает эволюцию волновой функции, где и предлагается искать ответы на вопросы, «что и куда движется». Ключевую роль в эволюции во времени берет на себя энергия в виде оператора, действующего на волновые функции. Одновременно с этим мир на фундаментальном уровне имеет вероятностную природу, и наблюдаемые в нем события — продукт действия законов, регулирующих случайность. Запутанность как особый вид согласованности между свойствами разнесенных в пространстве квантовых явлений позволяет «перемещать» волновую функцию с математической точностью, используя лишь короткие «классические» сообщения. Квантовая механика достигла грандиозных успехов, отвечая и на количественные, и на качественные вопросы о поведении и свойствах квантовых систем, но она в значительной мере оставляет нас в неведении относительно элементов реальности, поведение которых отражается в волновой функции.

## Заключение

# Вселенная в движении

Вселенная — это пространство-время и материя, а также отношения между ними. Важнейшим таким отношением является движение. В нем проявляются разнообразные взаимосвязи между частями мира, а мы пользуемся им, чтобы изучать свойства Вселенной и прогнозировать происходящие в ней события. Движение встроено в фундаментальную научную картину мира на масштабах от много меньше атомного до несколько превосходящего наблюдаемую Вселенную.

Стратегия, приводящая к открытию нового, — поиск *причин* наблюдаемого движения. Мы виртуозно научились использовать движение одних частей мира, чтобы делать выводы о наличии и устройстве других. Движение — неотъемлемая составляющая наблюдений и экспериментов, которые служат двигателем познания и первоисточником концепций, формирующих научную картину мира. Используя движение, мы узнали о существовании атомного ядра, а затем и о структуре протонов и нейтронов. Особенный характер движения света привел к осознанию, что и темп времени, и порядок причинно не связанных событий зависят от относительного движения и что масса есть форма энергии. Сейчас мы ищем в Солнечной системе непредвиденную планету, догадка о которой возникла целиком и только из того, как движется около десятка открытых ранее небольших тел. О наличии планет у других звезд мы узнаём по небольшим раскачиваниям далеких светил. Наблюдаемое движение звезд в центре галактики Млечный Путь сообщает о том, какова в точности находящаяся там черная дыра. А движение звезд в других галактиках настойчиво рассказывает захватывающую историю, что все видимое вещество в космосе — лишь добавка к более массивным скоплениям невидимой («темной») материи; предположив ее существование, мы стали лучше понимать эволюцию Вселенной к ее нынешнему состоянию, сделавшему возможным наше появление.

Универсальность самого распространенного во Вселенной вида макроскопического движения — свободного падения — послужила указанием на связь материи и геометрии пространства-времени, что привело к впечатляющему прогрессу в понимании устройства Вселенной, как в отношении областей сильной гравитации, где черные дыры становятся ловушками даже для света, так и в отношении динамики Вселенной в целом — «всеобщего» взаимного удаления, т.е. расширения. Полученная из наблюдений оценка ускорения этого расширения поставила перед нами вопрос о его причине и привела к предположению о наличии отдельной сущности («темной энергии») со свойствами, отличающими ее от всего известного.

Окружающие нас вещи «наполнены» движением составляющих их атомов и молекул, и это движение во многом определяет свойства этих вещей. Законы, которые управляют массовым поведением малых частей, критически важны в самом широком диапазоне явлений: эти законы контролируют превращение тепловой энергии в работу и одновременно имеют первостепенную важность для формирования и существования различных структур во Вселенной. Принципиальную роль при этом играет информационная невозможность знания об индивидуальном поведении микроскопических деталей. Потерянное знание о движении внутри вещей измеряется энтропией, возрастание которой отражает захват этим движением все большего числа возможностей. Эта концепция, исходно сформировавшаяся при изучении рассеянного движения атомов и молекул, дала первые подсказки о квантовой природе мира, а сейчас находит применение при рассмотрении квантовой природы черных дыр.

На фундаментальном уровне организации материи движение оказалось лишенным привычной наглядности: перемещение в пространстве происходит без определенной траектории, а «вращение» — без определенной оси вращения. Осуществляющееся по необычным законам движение на этом масштабе тем не менее лежит в основе структурирования мира: атомы образуются из более простых частей путем «захвата» этими частями движения друг друга, а требования к такому захвату оказываются столь жесткими, что все атомы одного элемента получаются совершенно одинаковыми; поэтому все разнообразие мира складывается из относительно небольшого числа деталей, повторяющихся во всех уголках космоса.

За пределами наглядности описание природы опирается на абстракции того или иного рода. Они помогают получать знание с помощью логического анализа, и в первую очередь его математических средств, которые во многом обязаны своим развитием предшествовавшим этапам изучения движения на более близких нам масштабах. Единство фундаментальной научной картины мира поддерживается при этом принципом соответствия: новые теоретические элементы должны демонстрировать согласие с установленными ранее в области применимости этих последних. Изучение движения открыло ряд максимально общих фактов о природе вещей, таких как законы сохранения, которые могут служить организующими принципами и за пределами изученных масштабов. А те особенности наблюдаемого движения, которые не объясняются влиянием ранее неизвестных частей мира, могут требовать расширения наших представлений о законах, по которым этот мир функционирует.

Мы начали наше путешествие с эллипсов, полученных Кеплером, который и помыслить не мог об открывшихся вслед за тем и продолжающих открываться глубинах, но тем не менее сделал верный первый шаг. Едва ли кто-либо в состоянии сказать, в какой степени современная фундаментальная научная картина мира когда-нибудь окажется поверхностным слоем существенно более фундаментального понимания, подобно тому как это произошло с законами Кеплера. Узнать это можно, только систематически работая над развитием уже добытого знания. Наше понимание устройства мира расширяется по мере того, как, изучая движение уже известного, мы открываем неизвестное. Движение доставляет нам картину мира и, собственно, является самой существенной частью этой картины.

*****

**Мои ошибки.** Никто из тех, кто повлиял на автора и процесс написания и кто в том числе отмечал сделанные мною ошибки, не несет ответственности за оставшиеся. Я заранее благодарен за указания на все несуразности, неточности и глупости различного толка, касающиеся того, что в книге *сказано*. В отношении того, что там не сказано, я отдаю себе отчет, сколько раз я останавливаюсь «на самом интересном месте»; если читателю захочется узнать, а что же дальше, я буду считать свою задачу выполненной.

# ПРИЛОЖЕНИЯ

На прогулках снова и снова, пусть с разной степенью отчетливости, возникало несколько тем, отвлекаться на которые не хотелось, хотя они и заслуживают внимания. Я собрал три из них в этих приложениях. Часть этих понятий обсуждалась и ранее, но здесь я стараюсь обходиться без ссылок на основной текст книги, чтобы не попасть в порочный круг закольцованных объяснений.

## Приложение А

## Физические законы

Сочувствие героям разнообразных произведений в жанре фэнтези дается мне намного легче, если внутри вымысла подразумеваются определенные *правила* и не происходит «что угодно», разрывающее рамки повествования. Игры — от карточных до футбола — тоже, кстати, интересны в первую очередь наличием в них правил, по существу являющихся ограничениями на возможное развитие событий.

Физические законы — это сформулированные людьми правила (тоже фактически ограничения) относительно того, как, на их взгляд, функционирует окружающая реальность. Главное чудо состоит в том, что *можно* сформулировать некоторые правила, которые оказываются эффективными в применении к миру вокруг нас. Это позволяет довольно всерьез полагать, что Вселенная на фундаментальном уровне организована в соответствии с определенными законами. Уже триста с лишним лет мы занимаемся тем, что эти законы угадываем, а успешно угадав, пользуемся ими, например, чтобы запустить самолет или ракету, да и для того, чтобы создать смартфон. Угадыванием правил Вселенной занимается наука. Слово «угадывание» не должно вводить в заблуждение: это требующая определенной квалификации деятельность, подчиненная ряду требований и имеющая свои собственные ограничения.

Сила физических законов в том, что на их основе возможны предсказания (выйдет ли ракета на орбиту; расплавится ли этот проводник; когда будет следующее солнечное затмение). При этом в каждом фундаментальном законе что-то принимается без объяснений — постулируется; предсказательная же способность науки появляется тогда, когда на основе малого числа принятых допущений и никак не объясняемых понятий удается разобраться с большим количеством разнообразных явлений. Научное описание мира является в этом смысле *экономным*, чтоб не сказать «прижимистым»: постулируется необходимый минимум, остальное должно выводиться из него. Самые фундаментальные допущения не могут иметь других обоснований, кроме возможности вывода из них большого числа следствий, хорошо согласующихся с наблюдаемым миром. Для них не предполагается и никаких объяснений через что-то другое — по той самой причине, что они фундаментальны. *Почему* во Вселенной имеется максимальная и абсолютная скорость, мы не знаем, но из этого факта выводится колоссальное число следствий, подтверждаемых практикой; это положение, кроме того, работает во взаимосвязи со множеством других понятий и концепций. *Почему* движение пробных тел задается геодезическими, мы не знаем, но исходя из этого положения удается количественно объяснить поворот орбиты Меркурия, а более тонкие эксперименты подтверждают ряд других эффектов, которые отсюда следуют. Такова же ситуация и со всеми другими фундаментальными законами природы — до тех пор, пока они не окажутся в конфликте с наблюдениями или пока не появится более фундаментальное понимание, а безответные вопросы не переместятся на более глубокий уровень.

### *Законы сохранения — это запреты*

Законы природы, обладающие «повышенной общностью», называются иногда *принципами*, но строгой терминологии здесь нет, и к тому же самые, как мне кажется, фундаментальные принципы традиционно все же носят название законов: это *законы сохранения*. Законы сохранения — это систематизация и обобщение наблюдений о том, что огромного числа явлений никогда не происходит. Они «кодифицируют» набор запретов: при всем многообразии происходящего во Вселенной, там могут случаться только те явления, при которых выполняется несколько математических равенств «было» = «стало». Здесь подразумевается правило подсчета какой-то величины (выражаемой числами) исходя из известного состояния системы. Сохраняющиеся величины — это те, которые при подсчете по определенным правилам дают одно и то же число, что бы с системой ни происходило: взаимодействие, столкновение, взрыв или любой другой процесс. Независимо от сложности этого взаимодействия или разрушительности взрыва, правила подсчета приводят к одному и тому же числу в любой момент времени. Законов сохранения несколько, одни связаны с движением, а другие нет.

Среди законов сохранения, которые не связаны с движением, — сохранение электрического заряда. Заряд не может исчезнуть или возникнуть без компенсирующих изменений, восстанавливающих баланс [303]. Приняв закон сохранения электрического заряда как принцип, мы, в частности, лучше понимаем стабильность мира: одинокий электрон не может исчезнуть, родив вместо себя частицу с меньшей массой (что *не* запрещено само по себе), потому что в нашей Вселенной отсутствуют частицы с меньшей массой *и* с электрическим зарядом; заряд электрона некому передать. Но одинокий мюон *может* превратиться (и, не откладывая, превращается) в более легкие элементарные частицы, включающие электрон, которому и достается электрический заряд мюона. Важное дополнение к закону сохранения электрического заряда состоит в том, что в природе имеются элементарные (наименьшие) заряды и что, хотя электроны и протоны — это элементарные частицы существенно различного вида, участвующие в формировании материи выраженно несимметричным образом, они тем не менее несут в точности противоположные заряды. Из-за этого мир оказывается в целом электрически нейтральным, но при этом в глубине его электрические заряды только и делают, что взаимодействуют друг с другом, чем и определяют способы сборки всех вещей и материалов вокруг нас, включая живую материю. Заряды — это параметры, которые определяют степень участия во взаимодействии, и собрать хоть что-нибудь из одних только нейтральных (т.е. не несущих заряда) «деталей» было бы невозможно.

Связанные с движением законы сохранения — это сохранение энергии (ей посвящено отдельное приложение Б), количества движения и момента количества движения. Количество движения (синоним — импульс) — это произведение массы на скорость, если скорость невелика по сравнению со скоростью света, и более сложное выражение, пригодное для любых скоростей, меньших скорости света; отдельное правило требуется для подсчета количества движения самого света, т.е. электромагнитных волн (а также, строго говоря, и гравитационных волн). Эти правила прекрасно работают вместе: полное количество движения перераспределяется между взаимодействующими частями. Например, давление солнечного света на космические аппараты — результат обмена количеством движения: когда свет поглощается или переизлучается, некоторое количество движения достается спутнику. Разумеется, пока нас интересует какое-то конкретное тело или система, мы говорим об *изменении* количества движения под действием силы; но если включить в баланс и ту часть мира, со стороны которой сила действует, то полное количество движения остается неизменным. Количество движения — вектор, как и скорость: у него есть не только величина, но и направление; его можно задавать, указав три компоненты вдоль трех выбранных направлений в пространстве, поэтому количество движения — это не одно, а три числа.

Название «момент количества движения» лучше всего воспринимать как иероглиф, в котором отдельные слова не разобрать, но который все же намекает на родство с «просто» количеством движения. Я рискнул называть его количеством вращения. Закон сохранения этой величины — то самое, что вынуждает фигуриста ускорять свое вращение, когда он или она прижимает руки к телу: количество вращения чувствительно к массе, скорости и расстоянию до оси вращения, поэтому при уменьшении расстояния рук от оси скорость должна увеличиться, чтобы количество вращения не изменилось. Тот же механизм лежит в основе второго закона Кеплера: там, где планета (или комета, или что угодно) ближе к Солнцу, она движется быстрее. Количество вращения — тоже вектор, т.е. имеет и величину, и направление. Направлено оно вдоль оси вращения, причем одна из двух возможностей выбирается по определенному правилу.

Среди других законов природы из числа встречавшихся нам — законы Ньютона, закон всемирного тяготения, принцип относительности, абсолютность скорости света в вакууме, уравнения Эйнштейна, правило Борна, уравнение Шрёдингера [304]. Ни один закон природы не может быть «доказан», потому что все они — обобщение наблюдений; всегда есть шанс, что в каких-то ранее не встречавшихся условиях закон перестанет выполняться. (Правила игры вообще сильно различаются в отношении опровержения, для которого достаточно одного ясного контрпримера, и подтверждения, которое всегда бывает лишь частичным.) Такие «отказы» действительно случаются, но в целом на удивление редко. Тем интереснее все случаи отчетливого несоответствия предсказаний и наблюдений: они могут служить сигналами о присутствии неучтенных пока факторов или же действительно указывать на неточность самих законов. Про известные законы природы (*пожалуй*, кроме законов сохранения) мы не думаем, что они представляют собой «окончательную истину». Но придумывание новых законов природы — тех, которые поправляют известные, когда они (известные) перестают хорошо действовать, — непростая задача, потому что любые предложения по усовершенствованию не должны портить того, что уже хорошо работает в своей области применимости. Требования к кандидату в законы природы включают преодоление довольно высокого барьера: предлагаемая новая схема рассуждений должна как минимум воспроизвести все то, что уже достигнуто на основе имеющихся концепций, в том числе количественные предсказания, не породив при этом следствий, которые явно противоречат опыту. Существенный момент здесь состоит в том, что необходимо принимать *все* следствия, получаемые логическим путем из постулатов, которые мы пожелали принять; нельзя оставлять одни, нравящиеся нам, следствия и игнорировать другие. «Теории», претендующие на описание мира, но постоянно нуждающиеся в дополнительных пояснениях для того, чтобы согласовать их следствия с наблюдениями, не обладают предсказательной силой и, как правило, не считаются частью науки. Так проявляет себя форма скепсиса, защищающая науку от введения в обиход произвольных положений. В результате картина мира, основанная на законах природы, обладает свойством, которое можно условно назвать упругостью: различные ее части поддерживают друг друга через множество перекрестных связей, а прогресс науки в одних направлениях отражается и на ряде других.

Наличие законов природы представляется мне обстоятельством столь же загадочным, сколь и прекрасным. Загадочным — потому что действие фундаментальных законов нельзя объяснить через что бы то ни было другое, а прекрасным — потому что благодаря им мир выглядит регулярным и познаваемым.

## Приложение Б

# Энергия

Энергия, время и движение — три существенно различные категории, которые связаны между собой довольно изысканным образом: энергия служит «движителем» вперед во времени и тем самым определяет, каким будет движение. Эту роль энергии можно вывести уже из законов движения Ньютона, но она фундаментальнее, чем эти законы. Чтобы энергия заработала как двигатель эволюции, необходимо знать ее значение для *каждой* конфигурации системы. При этом ни в коем случае не следует ограничиваться «реальными» состояниями, через которые проходит развитие системы с течением времени; наоборот, эволюция системы, заранее неизвестная, как раз и определяется из знания энергии для вообще *всех* конфигураций (зависимость энергии от положений и количеств движения всех составных частей) [305]. Уравнения, которые определяют эволюцию исходя из знания о том, какую энергию имела (бы) система в различных состояниях, называются *уравнениями Гамильтона*; они представляют собой глубокую и одновременно изящную переформулировку закона движения Ньютона. Они утверждают, что темп изменения положения какой-либо части системы определяется тем, насколько энергия чувствительна к вариациям количества движения этой части; а темп изменения количества движения определяется аналогичным правилом [306] — тем, насколько энергия чувствительна к вариациям положения. С некоторой философской точки зрения такая роль энергии должна, вероятно, выглядеть естественной: любые изменения в мире требуют какого-то перераспределения энергии, так что если бы энергия для всех конфигураций системы была одинакова, то ничего и не происходило бы. Как бы то ни было, обсуждаемое свойство энергии реализуется не на уровне неопределенных рассуждений, а количественно — на основе чего, собственно, и можно развивать осмысленные рассуждения. Понимание энергии как мотора эволюции — замечательное достижение XIX в., но эта роль энергии в полной мере проявляет себя и в квантовой механике. В своем «продвинутом» варианте, в виде гамильтониана, энергия определяет развитие во времени волновой функции — факт, который, собственно, и выражается уравнением Шрёдингера.

### *Энергия — двигатель эволюции во времени*

И абсолютно фундаментальное обстоятельство во всей истории про энергию состоит в том, что в каждой изолированной системе ее количество *сохраняется*. Сохранение энергии — один из главных «стабилизаторов» нашей Вселенной: здесь, например, не случаются сказочные появления чего-то из ничего или исчезновения в никуда, потому что они потребовали бы внезапного появления или исчезновения энергии. В комнате перед вами не может «из ниоткуда» появиться огнедышащий единорог. Фундаментальные законы природы не запрещают огнедышащих единорогов (известные нам способы организации живой материи делают это затруднительным, но «трудно» не значит «в принципе невозможно»). Но фундаментальные законы природы требуют, чтобы энергия, заключенная в единороге, попала в вашу комнату каким-либо способом — по проводам или в чемодане — через дверь, окно, стены, пол или потолок. Без этого создать единорога не просто трудно, а невозможно. (А если в момент «до» требуемая энергия была заключена в волшебной палочке, то она должна там как-то помещаться: в частности, масса палочки «до» должна быть равна массе палочки «после» *в сумме* с массой единорога.) Весьма актуальна проблема *доставки*: если вы хотите, чтобы в некотором объеме пространства произошло что-нибудь выразительное, вам необходимо придумать, как доставить туда энергию [307].

Но при всем том довольно трудно определить, что же такое энергия. Я знаю, что длинные цитаты нарушают правила хорошего тона, но цитата из Фейнмана того стоит.

Представим себе мальчишку, пусть его зовут Несносный Деннис, у которого есть кубики, которые совершенно невозможно разломать и разделить на части. Все кубики полностью одинаковые. Пусть у него, скажем, 28 кубиков. Утром мама оставляет его в комнате с этими 28 кубиками. Вечером она из любопытства тщательно пересчитывает кубики и открывает удивительный закон: что бы он ни делал с кубиками, их число всегда остается равным 28! Так продолжается в течение нескольких дней, пока однажды она не обнаруживает, что кубиков только 27; правда, небольшое расследование показывает, что один кубик оказался под ковром. Ей приходится заглядывать повсюду, чтобы удостовериться, что число кубиков не изменилось. Но однажды количество кубиков все-таки меняется: их оказывается только 26. Тщательное расследование показывает, что в комнате открыто окно; выглянув наружу, она находит два недостающих кубика. Но в другой раз подсчет показывает, что кубиков 30! Это вызывает заметное смятение, пока не выясняется, что в гости со своими кубиками приходил Брюс. Уходя, он оставил два из них у Денниса. Избавившись от лишних кубиков, мама запирает окно и больше не пускает Брюса. Все снова идет хорошо до того момента, когда, пересчитывая кубики, она не выясняет, что их 25. Правда, в комнате имеется коробка — ящик для игрушек — и мама собирается ее открыть, но мальчик говорит ей: «Нет, не открывай коробку!» — и начинает реветь. Маме нельзя открывать коробку. Но необычайно любопытная и довольно изобретательная мама разрабатывает план! Она знает, что кубик весит три унции, поэтому она взвешивает коробку, когда на месте все 28 кубиков, и получает вес, равный 16 унциям. Устраивая проверку в следующий раз, она снова взвешивает коробку, вычитает из веса 16 унций и делит результат на три. Она приходит к открытию, что

$$\left(\begin{array}{c}\text{число наблюдаемых}\\ \text{кубиков}\end{array}\right) + \frac{(\text{вес коробки}) - 16\ \text{унций}}{3\ \text{унции}} = \text{постоянная величина.}$$

В дальнейшем снова наблюдаются некоторые отклонения, но внимательное исследование показывает, что меняется уровень грязной воды в ванной. Ребенок бросает кубики в воду, а маме не видно их в грязной воде. Но она узнает, сколько кубиков находится в воде, добавив к своей формуле еще одно слагаемое. Поскольку исходный уровень воды равен шести дюймам, а каждый кубик поднимает воду на четверть дюйма, новая формула получается такой:

$$\left(\begin{array}{c}\text{число наблюдаемых}\\ \text{кубиков}\end{array}\right) + \frac{(\text{вес коробки}) - 16\ \text{унций}}{3\ \text{унции}} +$$
$$+ \frac{(\text{уровень воды}) - 6\ \text{дюймов}}{1/4\ \text{дюйма}} = \text{постоянная величина.}$$

По мере постепенного возрастания сложности мира она открывает целый ряд слагаемых, представляющих собой способы вычисления количества кубиков в тех местах, куда ей не заглянуть. В результате она получает сложную формулу — величину, которую ей *нужно подсчитать* и которая в ее ситуации всегда остается одной и той же.

Какова здесь аналогия с сохранением энергии? Главный аспект, в отношении которого от этой истории следует абстрагироваться, состоит в том, что *никаких кубиков нет*. Стоит только убрать первые слагаемые в [двух выписанных выше] формулах, как окажется, что вы вычисляете более-менее абстрактные вещи. Аналогичны же вот какие моменты. Во-первых, когда мы вычисляем энергию, часть ее иногда покидает систему и уходит, а иногда какая-то энергия в систему поступает. Чтобы удостовериться в сохранении энергии, следует проявлять аккуратность в том, чтобы ничего не приходило и не уходило. Во-вторых, у энергии имеется большое число *различных видов*, и для каждого есть своя формула. <…> Если мы соберем вместе формулы для всех этих вкладов, то энергия не будет меняться, кроме как в тех случаях, когда она уходит наружу или приходит извне.

Важно осознавать, что в рамках сегодняшней физики мы не знаем, *что такое* энергия. Мы не считаем, что энергия состоит из маленьких капель точно определенного размера. Вовсе нет. Однако у нас имеются формулы для подсчета некоторой численной величины, и, когда мы складываем все результаты, получается «28» — всегда одно и то же число. Это абстракция, потому что в ней ничего не говорится ни про механизм, ни про *причины*, стоящие за различными формулами.

Фейнмановские лекции по физике, т. 1, гл. 4, § 1

Канонический пример «пропажи кубика» — история открытия нейтрино. Эта элементарная частица крайне неохотно взаимодействует с чем бы то ни было, а потому очень слабо себя проявляет; о ее существовании и не подозревали, пока не обнаружилось нарушение закона сохранения энергии (а заодно и количества движения) в процессе превращения нейтрона в протон. С сохранением электрического заряда проблемы не было, потому что превращение сопровождается появлением электрона, но баланс энергии до и после превращения не сходился. Эти первые наблюдения делались в то время, когда сам нейтрон был только-только открыт, и даже до открытия нейтрона в 1932 г., поскольку эффект его превращения в протон внутри некоторых атомных ядер был уже известен как один из видов радиоактивности — вылет электрона из ядра. Квантовой механике было всего несколько лет от роду; оставалось не вполне ясно, где предел отличий квантового мира от привычного классического. Бор даже готов был допустить, что закон сохранения энергии выполняется для квантовых объектов только в среднем, а в отдельных событиях может нарушаться. Уточненные измерения со временем показали, однако, что следствия из этой идеи плохо согласуются с опытом: закон сохранения энергии «устоял», и к 1934 г. на первый план вышла гипотеза, что «пропажа кубика» объясняется неизвестной частицей, которая тоже возникает при превращении нейтрона в протон, унося часть энергии с собой. Ее прямое экспериментальное открытие состоялось только в 1956-м [308]. В данном случае закон сохранения энергии исполнил роль указания искать неучтенное.

Никакого обмена неразменными единицами («кубиками») нет, а есть только правила подсчета, но баланс всегда сохраняется. Способы «подсчета кубиков», обеспечивающие сохранение, включают несколько форм энергии, и все, что происходит во Вселенной, сопровождается переходами энергии из одной формы в другую [309]. Среди различных форм энергии имеются энергия движения (кинетическая); ее вариант в виде энергии теплового движения молекул газа или жидкости; энергия колебаний атомов в твердом теле; энергия электромагнитного поля и ее проявления в виде энергии химических связей; ядерная энергия; энергия гравитационного притяжения. Следствием теории относительности является эквивалентность массы и энергии, выражаемая в Самой знаменитой формуле $E = mc^2$, которая относится к покоящемуся телу массы $m$. Если же тело (или в действительности что угодно) движется и имеет при этом количество движения $p$, то энергия выражается и через массу, и через количество движения: $E = \sqrt{m^2c^4 + p^2c^2}$. Скорость света фигурирует в этих соотношениях в качестве фундаментальной постоянной Вселенной; без нее нельзя обойтись, потому что мы привыкли измерять массу и энергию в разных единицах: энергию в «энергетических», а массу в граммах, килограммах или еще чем-то таком, и нам требуется «курс» перевода из одних единиц в другие. (Если бы люди «сразу догадались», что энергию можно измерять так же, как массу, — например, в килограммах, — то формула Эйнштейна приняла бы вид $E = m$). [310] Любое равенство можно, разумеется, читать справа налево или слева направо. Эйнштейн первоначально ставил вопрос о мере инертности (т.е. массе), которой обладает любая энергия: она оказалась равной $E/c^2$. Например, газ, нагретый в замкнутом сосуде, имеет массу чуть бóльшую, чем холодный газ, из-за того что энергия движения молекул обладает массой. Но поскольку прибавку к энергии надо все-таки делить на $c^2$, прибавка к массе получается ничтожная. Противоположная картина наблюдается при аннигиляции: там энергия, уносимая главным образом светом, получается *умножением* массы на $c^2$ и оказывается впечатляюще большой уже для скромной, по нашим меркам, массы.

Еще один аспект сохранения энергии — локальность; это свойство не очень хорошо иллюстрируется метафорой кубиков. Оно означает, что убыль полной энергии в пределах моей комнаты не может компенсироваться появлением того же количества энергии в доме напротив, если между ними нет потока энергии (в виде перенесенных предметов, электромагнитного излучения или еще чего-то подобного).

Увеличение или уменьшение полной энергии внутри некоторого объема должно в точности равняться потоку энергии, прошедшему через границы этого объема. Это верно совершенно всегда для малых объемов, а для больших верно до тех пор, пока не возникает сложности с их складыванием из малых. Сложности же возникают при наличии гравитационного поля в рамках общей теории относительности. Во-первых, энергия становится частью более общей конструкции, включающей, кроме того, количество движения, а также компоненты давления и натяжений; требуется внимание к тому факту, что разные наблюдатели поделят эту общую конструкцию на энергию и остальное по-разному. Но главная сложность в том, что заявление о глобальном сохранении энергии требует сравнения между собой отстоящих друг от друга частей мира (насколько больше энергии втекло через одну поверхность, чем вытекло через другую), а для такого сравнения необходимо что-то вроде параллельного переноса из одного места в другое. Но параллельный перенос определяется гравитационным полем, и в результате это поле замешивается в закон сохранения энергии. Приходится учитывать получаемую им или отбираемую у него энергию; однако энергия поля не локализована в одном месте, а распределена всюду, где есть поле. Альтернатива состоит в том, чтобы считать, что при наличии гравитационного поля энергия глобально не сохраняется. Так нравится думать многим космологам, и они не сильно переживают по этому поводу, потому что такое несохранение «из-за трудностей сравнения» *не* открывает возможность внезапного появления огнедышащих единорогов из ничего. Локальное же сохранение энергии остается универсальным для нашей Вселенной регуляторным принципом.

Приложение В

# Элементарные частицы в азартном изложении

*На стол колоду, господа! Крапленая колода!*
В. Высоцкий

На наших прогулках эпизодически встречаются элементарные частицы. Имеет смысл собрать минимально необходимые подробности в одном месте. Сюда относится как общее понимание, что это за явления, так и наблюдения о том, с какой конкретной «раздачей» на руках мы оказались в этой Вселенной. Сначала несколько самых общих моментов.

1. Элементарные частицы — это сущности, которые по современным представлениям не состоят ни из каких деталей. Это довольно обязывающее свойство, потому что сводит все возможные различия между разными элементарными частицами к числам; эти числа (скажем, массы и заряды) никак больше прокомментировать нельзя, потому что нет места ни для каких «объясняющих» подробностей.

2. Список чисел, определяющих каждую элементарную частицу, закрытый. К нему нельзя добавить что-то еще для того, чтобы различать, например, два электрона. Этому «еще» там просто негде поместиться. В результате все элементарные частицы одного вида неразличимы.

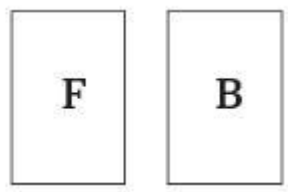
3. Ни одна элементарная частица не является «неуничтожимой». Наоборот, они появляются и исчезают, превращаясь друг в друга, с соблюдением законов сохранения (в том числе законов сохранения энергии и электрического заряда).

4. При этом элементарные частицы — возбуждения соответствующих квантовых полей (говорят еще «кванты» соответствующих полей). Минимальные пояснения к этому таковы: квантовое поле способно «на постоянной основе» обладать энергией лишь в дискретных порциях, и наименьшая такая порция называется его квантом; кванты имеющихся во Вселенной фундаментальных полей и представляют собой все известные элементарные частицы. (Открытие новой элементарной частицы означает открытие нового квантового поля.)

И одно уточнение вдогонку. Произошедшие изменения в понимании природы оставляют место для небольшой путаницы в использовании термина «элементарный». Сначала к элементарным частицам относились электрон, протон и нейтрон; затем добавились мюон и нейтрино. В конце 1940-х гг. экспериментально обнаружили пи-мезоны, а в 1950-х гг. на ускорителях стали массово открывать разнообразные другие короткоживущие частицы. Их тоже называли элементарными, но со временем выяснилось, что они составлены из по-настоящему элементарных — кварков. И не только они, но и казавшиеся элементарными протон и нейтрон. А электрон (как и мюон), наоборот, ни из чего не составлен и не был разжалован из истинно элементарных. В результате выражение «элементарные частицы» может относиться к минимальному набору тех, которые и правда ни из чего другого не сложены, но нередко применяется и шире, охватывая протоны, нейтроны, пи-мезоны и т.д. (Смешению понятий дополнительно способствует тот факт, что протоны, нейтроны и другие частицы, составленные из кварков, нельзя разобрать на отдельные кварки.) В целом ряде ситуаций не называть, скажем, протон элементарной частицей довольно глупо, но, относя его к этой категории в несколько расширительном смысле, мы держим в уме, что он все же состоит из более элементарных. Однако в рамках этого приложения я слежу за тем, чтобы называть элементарными только по-настоящему элементарные частицы. Их-то — в отличие от «как-бы-элементарных» — совсем немного. Все вместе они и составляют *Стандартную модель*, содержание которой, впрочем, не ограничивается перечислением элементарных частиц, но, что очень важно, включает еще и описание их взаимодействий [311].

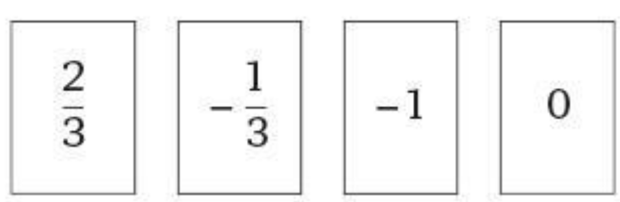
Небольшой набор известных элементарных частиц выглядит относительно случайным. Мы *совсем* не знаем, *почему* они именно такие и получили ли мы их в этой Вселенной в результате случайной «раздачи карт»; трудно сказать также, какую часть из «полной колоды» мы уже открыли (хотя очевидно, что не всю). Как бы то ни было, знания о картах, имеющихся у нас на руках, систематизируются следующим образом.

Прежде всего, полная колода получена объединением двух. У них разные рубашки:




Рабочий способ охарактеризовать две колоды — сказать, что все **F** составляют материю, а **B** являются переносчиками взаимодействий, т.е. служат для *связи* между разными частями материи [312]. В колоде **F** — карты трех мастей, а в колоде **B** никакого разделения по мастям нет (все карты в ней — что-то вроде козырей плюс еще один джокер).

Перевернем лицом вверх сначала карты из трехмастной колоды **F**. *Значений* карт (т.е. того, что определяет карту, помимо масти) там всего четыре; но это не двойка, тройка, четверка и пятерка (так их *совсем* никто не называет, даже я), а вот какие значения:




С учетом мастей карты из колоды **F** представлены на рис. В.1. Это, впрочем, определенное упрощение; чуть дальше мы увидим, что часть карт тут определенным образом «крапленые», но прямо сейчас это неважно.

Правила обращения с мастями особенно просты для первых трех значений карт (они выделены скобкой): «серые» и «темные» карты *нельзя держать на руках*. Крупье немедленно меняет каждую из них на более светлые карты, нередко добавляя карты с нулями. Правил обмена для одной и той же карты несколько, и то или иное выбирается случайным образом в соответствии с некоторыми вероятностями. Если в результате обмена карты из самой темной масти появилась серая карта (из числа выделенных скобкой), она, в свою очередь, обменивается. Каждый обмен — это превращение одной элементарной частицы в несколько других; в полном списке таких превращений —

десятки возможностей, по несколько на одну элементарную частицу.

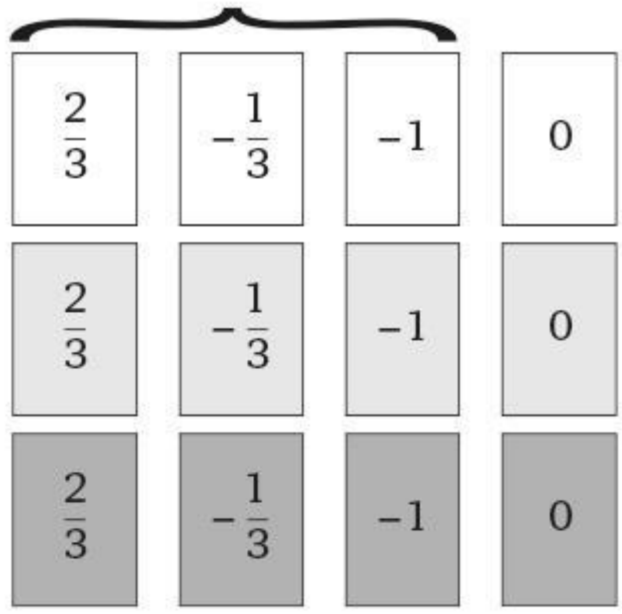


**Рис. В.1.** В колоде **F** карты четырех значений разбиты по трем мастям, которые показаны здесь как светлая, серая и темная

Серые и темные карты из выделенных скобкой представляют элементарные частицы, которые долго не живут: представители серой масти превращаются во что-то другое очень быстро, а представители более темной — еще быстрее. Происходит такое потому, что в природе «масти» отличаются друг от друга только массой элементарной частицы. Серая карта — копия светлой карты того же значения, но только со (значительно) большей массой, а темная — еще одна копия с (колоссально) большей массой. Общее же правило состоит в том, что более массивная элементарная частица претерпевает превращение всегда, когда ей есть во что превратиться — в набор менее массивных, перераспределив между ними свои значения (числа 2/3, –1/3 и –1, а также некоторые другие числа, здесь не указанные). При этом энергия $mc^2$, которая содержалась в ее массе, уходит в массу новых частиц, а избыток — в их энергию движения, а *суммарное значение* карт после превращения остается таким же, каково было значение карты до превращения. Например, из исходной $\boxed{-1}$ не могут получиться две $\boxed{-1}$ или только карты с нулями. Значения карт 2/3, –1/3, –1 и 0 выражают электрический заряд, а он сохраняется, что бы ни происходило. В светлой масти для $\boxed{\frac{2}{3}}$, $\boxed{-\frac{1}{3}}$ и $\boxed{-1}$ никаких вариантов превращений с соблюдением этих правил просто нет, и они ни во что и не превращаются [313]. Поэтому только они и участвуют напрямую в формировании вещества.

Я поддался картежному азарту и забыл сказать что-то важное. В колоде **F** есть еще *антикарты*. Это карты, представляющие античастицу для каждой элементарной частицы. Значение антикарты противоположно (в смысле дополнительного знака минус) значению карты; это означает, что заряды античастиц противоположны зарядам их частиц. Из-за этого антикарты легко отличать от карт во всех случаях, кроме одного — когда заряд равен нулю, потому что тогда у античастицы он тоже равен нулю. В этом случае мы будем проводить черту над нулем, $\bar{0}$. Но для ясности я во всех случаях снабжу антикарты еще небольшой звездочкой в правом верхнем углу. Антикарты тогда выглядят так, как показано на рис. В.2. В отличие от «регулярных» карт $\boxed{\frac{2}{3}}$, $\boxed{-\frac{1}{3}}$ и $\boxed{-1}$ во Вселенной очень мало антикарт $\boxed{-\frac{2}{3}^{*}}$, $\boxed{\frac{1}{3}^{*}}$ и $\boxed{1^{*}}$: стоит только антикарте встретиться со «своей» картой, как они аннигилируют: пара заменяется на карты из колоды **B** (а потом могут случаться дальнейшие превращения).

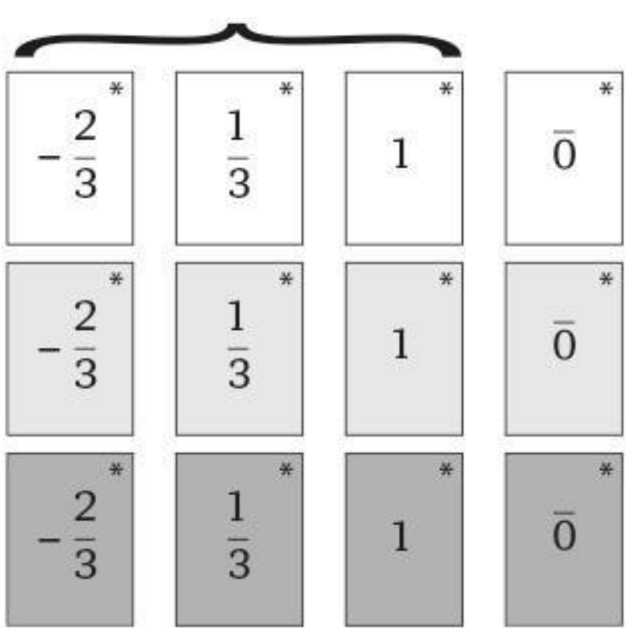



**Рис. В.2.** В колоде **F** есть еще и антикарты

Имея под рукой антикарты, можно точнее показать, как карты более темных мастей превращаются в более светлые. (Превращения традиционно называют распадами, но это именно превращения, потому что получившиеся продукты *не* сидели в исходных частицах; все частицы элементарны в равной мере, и превращения, кстати, могут идти и в противоположную сторону, если для этого обеспечить достаточную энергию.) В темных мастях для каждой карты из числа выделенных скобкой есть несколько вариантов превращений, в результате которых в конце концов остаются карты светлой масти плюс, возможно, их антикарты, плюс разнообразные комбинации «нулей» и «антинулей». Вот несколько примеров, относительно случайно выбранных из многих:

- $\boxed{-1} \rightarrow \boxed{-1}\ \boxed{\bar{0}^*}\ \boxed{0}$ и $\boxed{-1} \rightarrow \boxed{-1}\ \boxed{\bar{0}^*}\ \boxed{0}$, где появляющаяся светлая масть представлена картой и антикартой;
- $\boxed{-1} \rightarrow \boxed{-1}\ \boxed{\bar{0}^*}\ \boxed{0}$;
- $\boxed{-\frac{1}{3}} \rightarrow \boxed{\frac{2}{3}}\ \boxed{-1}\ \boxed{\bar{0}^*}$;
- $\boxed{\frac{2}{3}} \rightarrow \boxed{-\frac{1}{3}}\ \boxed{\frac{2}{3}}\ \boxed{\frac{1}{3}^*}$;
- $\boxed{-\frac{1}{3}} \rightarrow \boxed{\frac{2}{3}}\ \boxed{-\frac{1}{3}}\ \boxed{-\frac{2}{3}^*}$ и $\boxed{-\frac{1}{3}} \rightarrow \boxed{\frac{2}{3}}\ \boxed{-1}\ \boxed{\bar{0}^*}$.

Пора, кстати, *раскрыть карты*: $\boxed{-1}$ — это электрон, наша прекрасная стабильная частица, основа химии и разнообразного другого благополучия; $\boxed{-1}$ — его более тяжелый двойник мюон, пригодившийся нам на одной из прогулок для тестирования замедления времени; их третий собрат $\boxed{-1}$ называется тау-лептоном, или тауоном, или (пожалуй, чаще) просто тау. Электрический заряд каждого из них равен минус единице. В составе мира на постоянной основе присутствует единственный стабильный представитель этой троицы, электрон [314]. Его античастица $\boxed{1^*}$ — позитрон — сама по себе тоже стабильна, но, как только в сдаче оказывается позитрон, он быстро находит себе один из многочисленных электронов по соседству и немедленно с ним аннигилирует.

Три карты с нулями — это нейтрино, а три с нулями с чертой — антинейтрино. Это легкие частицы, которые носятся по Вселенной, практически ни в чем не участвуя. Точнее говоря, они совсем не участвуют в создании структур, а кроме того, чрезвычайно слабо взаимодействуют со всеми другими элементарными частицами. Нуль указывает на их электрический заряд: он отсутствует, из-за чего нейтрино невосприимчивы к электромагнитному взаимодействию; невосприимчивы они и к сильному ядерному взаимодействию, и их единственный контакт с миром, кроме гравитации, — слабое ядерное взаимодействие. С точки зрения отношений внутри своей семьи нейтрино стоят особняком от остальных карт: более темные не испытывают необходимости исчезнуть, навсегда превратившись во что-то светлое. Вместо этого нейтрино разных мастей запутаны друг с другом, что выражается в так называемых «осцилляциях» — самопроизвольном последовательном превращении между всеми тремя мастями. Если не вдаваться в более технические подробности, то можно считать, что, получив на руки карту со светлым нейтрино, вы через некоторое время обнаружите, что она превратилась в карту с серым или темным нейтрино, и такие превращения «по кругу» идут безостановочно, на деле являясь для нейтрино способом существования.

Карты двух оставшихся значений 2/3 и –1/3 — это кварки, и это отдельная история. В светлой масти это *u* (или up) кварк $\boxed{\frac{2}{3}}$ и *d* (или down) кварк $\boxed{-\frac{1}{3}}$. Они входят в состав протона и нейтрона, а потому сидят во всех атомных ядрах, т.е. везде вокруг нас, да и внутри нас. Если вы желаете предъявить протон или нейтрон, то вам необходимо собрать вполне определенные комбинации, причем только в одной, светлой, масти:

$$\text{протон} = \boxed{\boxed{\tfrac{2}{3}}\,\boxed{\tfrac{2}{3}}\,\boxed{-\tfrac{1}{3}}},$$

$$\text{нейтрон} = \boxed{\boxed{\tfrac{2}{3}}\,\boxed{-\tfrac{1}{3}}\,\boxed{-\tfrac{1}{3}}}.$$

Кварки двух других мастей — более массивные варианты двух светлых, и, будучи более массивными, они долго не живут. Собственно говоря, и из двух светлых по-настоящему стабилен только один, потому что второй обладает средним временем жизни около 900 с, превращаясь как $\boxed{-\frac{1}{3}} \to \boxed{\frac{2}{3}}\,\boxed{-1}\,\boxed{\bar{0}}$ (заряд справа и слева, как видим, один и тот же). В правой части — *u*-кварк, электрон и электронное антинейтрино, что общепринятым образом выражается как $d \to u + e + \nu e$. Это превращение не происходит, когда карты составляют «правильную комбинацию», а именно протон; в нейтроне, предоставленном самому себе, оно все-таки случается, из-за чего нейтрон превращается в протон, но внутри атомных ядер нейтроны такого *в основном* не делают, благодаря чему и существуют стабильные ядра [315]. Рекордсмен по скоротечности жизни — так называемый *t* (top) кварк $\boxed{\frac{2}{3}}$: он распадается в среднем через невыразимо короткие $5 \times 10^{-25}$ с (за это время *свет* пролетает расстояние в полторы *десятитысячные размера атомного ядра*).

Возвращаясь к протонам и нейтронам, из которых собраны все атомные ядра, полезно сложить значения карт в каждой из приведенных выше комбинаций: получаем электрический заряд протона 2/3 + 2/3 – 1/3 = 1 и нейтрона 2/3 – 1/3 – 1/3 = 0. Очень общее правило состоит в том, что *запрещено показывать* карты с дробным значением заряда: в природе кварки не присутствуют поодиночке, отдельный кварк нельзя «вынуть» из протона, нейтрона или другой частицы, в состав которой он входит; кварки присутствуют в мире лишь в комбинациях, удовлетворяющих нескольким условиям, среди которых важное (хотя и не единственное) — целочисленный (а не дробный) заряд. Целочисленные заряды можно собирать и другими способами: например, комбинация $\boxed{-\frac{2}{3}}\,\boxed{-\frac{1}{3}}$ (где использованы карта и антикарта!) имеет заряд +1 и представляет собой положительно заряженный пи-мезон, а противоположная ей комбинация $\boxed{-\frac{1}{3}} \to \boxed{\frac{2}{3}}\,\boxed{-1}\,\boxed{\bar{0}}$ дает его античастицу с зарядом –1. Эти частицы играют роль передатчиков ядерного взаимодействия между протонами и нейтронами, но сами по себе они нестабильны. Пи-мезон с зарядом +1 живет в среднем 26 миллиардных долей секунды, после чего превращается главным образом в антимюон и мюонное нейтрино.

Тот факт, что протон и нейтрон нельзя разделить на кварки, выглядит необычно в сравнении со свойствами обычных предметов: все, состоящее из нескольких деталей, можно разобрать на эти детали (или разломать на какие-то другие части), стоит только должным образом потратить энергию, превосходящую энергию связи этих деталей. Поэтому кажется, что все привычные вещи можно в принципе разложить на части — «разобрать на атомы» в качестве программы-максимум. Это верно, причем можно разобрать и сами атомы, и даже их ядра. Но почему же с протонами и нейтронами это не так? Почему в природе не наблюдаются третьи доли от заряда протона? Попробуем вырвать один кварк из протона — скажем, отбирая на ускорителе те случаи, когда при столкновении двух протонов «особенно сильно достается» одному из кварков: он получает столько энергии, что, казалось бы, может вылететь прочь из протона. Но по мере увеличения расстояния между кварками сила притяжения между ними возрастает, а вместе с ней растет энергия их связи, достигая величины $2mc^2$, где $m$ — масса кварка. Эта энергия принимает вид пары «кварк — антикварк», и родившийся таким образом антикварк составляет компанию тому кварку, который «почти» вырвался из протона; они улетают вместе, образовав комбинацию с непременно целочисленным электрическим зарядом. А родившийся в паре кварк заменяет собой того, который улетел, и «голого» дробного заряда снова не образуется. Если на попытку «разрушения» была затрачена большая энергия, то по сторонам может разлететься много комбинаций, составленных из кварков и антикварков, но ни одна из них не будет иметь дробного электрического заряда.

В общепринятом варианте колода **F**-карт имеет вид, приведенный на рис. В.3, где использованы стандартные обозначения частиц, а электрический заряд показан в левом верхнем углу. *Масти* (мое предложение для повышения азарта) стандартно называются столь же произвольным словом — *поколения*. В стандартной формулировке одно из высказываний об элементарных частицах звучит как «имеются три поколения элементарных частиц»; можно искать смысл этого слова в том, что более темные (исчезая!) рождают более светлые, но эта метафора кажется несколько натянутой. Главное же состоит в том, что, как уже было сказано, более темные карты из числа обведенных скобкой отличаются от более светлых только большей массой и из-за этого быстро претерпевают превращения.

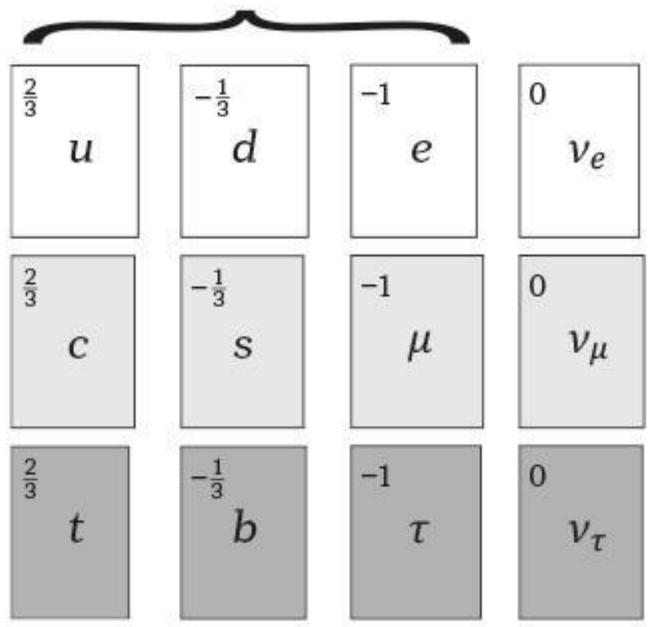



**Рис. В.3.** Фермионы, входящие в Стандартную модель элементарных частиц. Числа слева вверху указывают электрический заряд. Обозначения: *u* — up-кварк, *d* — down-кварк, *e* — электрон, νe — электронное нейтрино, *c* — charm-кварк, *s* — strange-кварк, μ — мюон, νμ — мюонное нейтрино, *t* — top-кварк, *b* — bottom-кварк, τ — тау-лептон, ντ — тау-нейтрино

Все частицы из колоды **F** — фермионы, т.е. ненавистники себе подобных в силу принципа Паули: две одинаковые частицы из этого класса *не могут* находиться в одном и том же состоянии. Это условие первостепенно важно для того, чтобы из них можно было складывать мир: в случае взаимного притяжения одинаковые фермионы не громоздятся все в одном состоянии «друг на друге», а вынуждены образовывать какие-то более интересные конфигурации. Собрание нечетного числа фермионов — снова фермион; таковы протон и нейтрон, из которых сложены все атомные ядра.

Я обещал еще сказать про «крапленые» карты — те, которые не так просты, как кажутся. Каждый из кварков — это на самом деле одна из трех частиц, одинаковых во всем, кроме еще одного свойства, до сих пор не упоминавшегося. Это свойство, как и все другие, тоже представлено числом; оно выражает заряд по отношению к сильному ядерному взаимодействию, т.е. степень участия в этом взаимодействии. Дело здесь организовано несколько интереснее, чем в случае электромагнитного взаимодействия, где есть заряды только двух типов, положительные и отрицательные, а нейтральность — отсутствие заряда — достигается собранием положительных и отрицательных зарядов в равном количестве. В случае сильного взаимодействия имеется *три* пары зарядов, и в каждой паре есть свои «плюс» и «минус». Эти плюс и минус могут составить нейтральное образование описанным выше способом — собравшись в равном числе, но это работает только в пределах одной пары, а плюс из одной пары и минус из другой *не* дают в сумме нулевой заряд. Тем не менее между тремя парами зарядов все же имеется связь! Она состоит в том, что, взяв по плюсу из каждой пары, мы получаем нулевой заряд. Это непривычно и заслуживает комментариев.

Прежде всего, «плюс» и «минус» — неудобные обозначения: как минимум необходимо дополнительно указывать номер пары, вроде $+_1$, $+_2$, $+_3$ и аналогично с минусами. Никто так и не делает, а вместо этого три разных плюса называют «красный», «зеленый» и «синий», а слово «плюс» опускают. Отвечающие им минусы тогда получают названия «антикрасный», «антизеленый» и «антисиний». Это, разумеется, *названия* — у элементарных частиц никакого цвета не бывает. Тем не менее я не буду брать слово «цвет» в кавычки, которых и так уже много, и предлагаю просто помнить, что цвет — это указание на тип заряда по отношению к сильному ядерному взаимодействию. В природе таких типов зарядов оказалось три, причем (последний раз с кавычками) одна единица «красного» заряда, одна единица «зеленого» заряда и одна единица «синего» заряда вместе составляют *нулевой* заряд (отсутствие заряда). Даже не знаю, как были бы устроены электросети, если бы что-то похожее имело место для электрических зарядов.

Правило (закон природы, относящийся к зарядам сильного взаимодействия)

$1 \cdot (\text{красный}) + 1 \cdot (\text{зеленый}) + 1 \cdot (\text{синий}) = 0$

легко запомнить, потому из-за физиологических особенностей человеческого зрения сложение красного, зеленого и синего света воспринимается как белый свет. Стоит только дополнительно договориться, что нейтральное (обладающее нулевым зарядом по отношению к сильному взаимодействию) *называется* бесцветным (или белым), как правило смешения цветов на мониторе «красный + зеленый + синий = бесцветный (белый)» окажется отличной мнемоникой для математического соотношения между зарядами сильного взаимодействия. Из-за этого практика именовать заряды красным, зеленым и синим очень быстро прижилась — настолько, что сам заряд сильного взаимодействия стали даже называть цветовым или цветным зарядом. Наряду с приведенным соотношением с равным успехом сумма трех противоположных («анти») цветов тоже дает нуль. И, как мы уже говорили, выполнено доброе старое правило 1 · (красный) + 1 · (антикрасный) = 0 (и еще два аналогичных равенства).

Каждый кварк, например $\frac{2}{3}$, может находиться в одном из трех цветовых состояний: $\frac{2}{3}$к, $\frac{2}{3}$з, $\frac{2}{3}$с; это же относится и к кваркам из серой и темной мастей. Антикварки несут соответствующие антицвета: античастица к красному кварку — антикрасная и т.д. (в том, чтобы запоминать, что, скажем, дополнительный к синему цвет — желтый, большого смысла уже нет). Но в свободном состоянии — «по отдельности» — в природе могут существовать только бесцветные комбинации кварков, т.е. такие, где цвета в сумме дают нуль в соответствии со сформулированными правилами. Частицы, несущие цвет — ненулевой заряд сильного взаимодействия, не наблюдаются в природе поодиночке. Протон и нейтрон, а также все многочисленные короткоживущие частицы, которые можно собрать из кварков, должны быть бесцветными: их полный цветовой заряд должен быть равен нулю. Поэтому, когда мы говорим, что протон = $\frac{2}{3}\frac{2}{3}\frac{1}{3}$ нам надо дополнительно раздать по цвету на каждый из кварков таким образом, чтобы все вместе было бесцветным по правилу сложения трех цветов. В общем, цветные карты, представляющие кварки, оказываются немного шулерскими: их больше, чем кажется, и, я бы сказал, они мельтешат перед глазами так, что не все разглядишь: кварки непрерывно обмениваются цветами. В случае протона это «мельтешение» устроено так. Один из трех кварков, который мы временно снабдим меткой 1, может находиться в одном из цветовых состояний К[расный], З[еленый] или С[иний]; чтобы помнить, что это состояния «первого» кварка, обозначим их как $|К\rangle_1$, $|З\rangle_1$, $|С\rangle_1$, и аналогично поступим с двумя другими кварками; тогда математика, определяющая правила обращения с кварками, предписывает такое цветовое *состояние* трех кварков внутри протона:

$$|К\rangle_1|З\rangle_2|С\rangle_3 + |З\rangle_1|С\rangle_2|К\rangle_3 + |С\rangle_1|К\rangle_2|З\rangle_3 - |К\rangle_1|С\rangle_2|З\rangle_3 - |З\rangle_1|К\rangle_2|С\rangle_3 - |С\rangle_1|З\rangle_2|К\rangle_3.$$

И при этом каждый из кварков, обозначенных как 1, 2, 3, может быть *u*- или *d*-кварком (при условии, что всего имеются два *u* и один *d*), а кроме того, каждый может находиться в одном из двух спиновых состояний — в результате полная картина того, как три кварка складываются в протон, *еще* усложняется.

Вторая колода, с буквой **B** на рубашках, не содержит никаких мастей. Все частицы там — бозоны (рис. B.4). Они заняты тем, что переносят какое-то из известных взаимодействий. Важны для устройства Вселенной все они без исключения, но мы лучше всего знакомы с фотонами, причем не в роли переносчика взаимодействия, а просто в виде света. Переносчиками же взаимодействия, скажем, между двумя электронами работают не совсем настоящие, а виртуальные фотоны. Слово «виртуальный» часто опускают, но его всегда следует подразумевать, когда речь идет именно о передаче взаимодействий; виртуальные кванты (виртуальные фотоны, виртуальные электроны) — это возбуждения поля с несколько «непостоянным» статусом существования, и главное их отличие от настоящих квантов — отсутствие фиксированной массы. (В ваш фотоаппарат и на сетчатку глаза, наоборот, попадают вовсе не виртуальные, а «полноценные» фотоны; в атоме сидят «полноценные» электроны и т.д.)

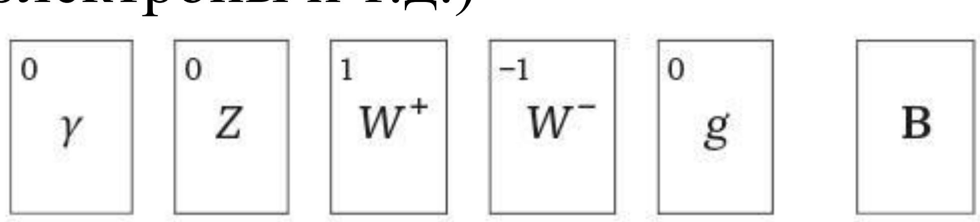



**Рис. B.4.** Бозоны, входящие в Стандартную модель элементарных частиц. Числа слева вверху указывают электрический заряд. Обозначения: γ — фотон, $Z$ — зет-бозон, $W^+$ и $W^-$ — дубльвэ-бозоны, $g$ — глюон(ы). Одна

Взаимодействие одного поля с другим — факт, который мы умеем учитывать в нашем описании природы, но про который мы не спрашиваем, почему именно такие взаимодействия есть в нашей Вселенной, а каких-то других нет; наши представления о взаимодействии полей — это очередное обобщение наблюдений. Согласно этим наблюдениям, взаимоотношения бозонов, показанных на рис. В.4, с фермионами на рис. В.3 отчасти выборочны: бозоны, переносящие какое-либо взаимодействие, вступают в контакт не со всеми фермионами, а только с теми, у которых не равен нулю заряд по отношению к данному взаимодействию. «Вступить в контакт» здесь означает быть испущенным или поглощенным. И поглощение, и испускание — элементарные процессы, которые не раскладываются ни на какие составные части: это описание на языке частиц того, как поля обмениваются энергией. Через обмен агентами и реализуется каждое из взаимодействий: электромагнитное, слабое и сильное. Но агенты из колоды **B** «немножко козыри» в том смысле, что им безразличны масти карт из колоды **F** — они обращают внимание только на значения. Вот что они делают.

• Фотон (γ) — переносчик электромагнитного взаимодействия. Он вступает в контакт только с теми элементарными частицами, у которых есть электрический заряд. На рис. В.3 это все, кроме трех нейтрино. Сам же фотон электрического заряда не имеет, из-за чего при испускании и поглощении фотона электрический заряд участников этого процесса не меняется. Фотон — античастица сам себе.

• Зет-бозон ($Z$) и дубльвэ-бозоны ($W^{\pm}$) — частицы, которые не получили хороших названий, а вместо этого содержат в своем имени технический термин «бозон»; они являются переносчиками слабого взаимодействия. Один из них ($Z$) нейтральный по электрическому заряду (и античастица сам себе). Два других ($W^{\pm}$) имеют заряды +1 и –1 (и являются античастицами друг для друга) — единственный случай, когда переносчик некоторого взаимодействия сам чувствителен к другому взаимодействию (в данном случае — электромагнитному). Слабое взаимодействие *слабое*, но чрезвычайно универсальное: зарядом по отношению к нему обладают *все* фермионы. В моих игорных терминах карты $\boxed{Z}$, $\boxed{W^+}$ и $\boxed{W^-}$ «совсем козыри», потому что способны «контактировать» с каждой картой из колоды **F**. Однако это довольно специфические козыри: испускание или поглощение $W^{\pm}$ бозонов всегда происходит с изменением не только заряда, но и типа участвующего фермиона, т.е. с изменением значения карты: например, $d$-кварк $\boxed{-\frac{1}{3}}$ испустив $W^-$-бозон, превращается в $u$-кварк $\boxed{\frac{2}{3}}$. Собственно говоря, все приведенные выше примеры превращений кварков происходят в действительности в два этапа (которые крайне быстро сменяют один другой): сначала кварки превращаются по схемам типа

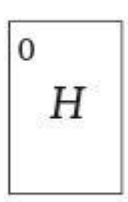
$$\boxed{-\tfrac{1}{3}} \to \boxed{\tfrac{2}{3}}\,\boxed{W^-} \quad \text{и} \quad \boxed{\tfrac{2}{3}} \to \boxed{-\tfrac{1}{3}}\,\boxed{W^+}$$

(где можно по-разному распределять масти), после чего $\boxed{W^+}$ и $\boxed{W^-}$ распадаются одним из (многих) возможных способов.

• Глюоны ($g$) переносят сильное взаимодействие между кварками. Они испускаются и поглощаются кварками, причем процесс устроен опять интереснее, чем в случае электромагнитного взаимодействия и фотонов. Переходя от кварка к кварку, глюоны переносят между ними цветовой заряд; цветовые заряды кварков при этом меняются. Цветовой заряд, как и электрический, сохраняется, и из-за этого каждый глюон переносит что-то вроде разности двух зарядов. Например, кварк с зеленым зарядом может испустить глюон и приобрести красный заряд; глюон должен тогда унести с собой зеленый-антикрасный заряд. Встретив красный кварк и поглотившись им, такой глюон превратит этот кварк в зеленый. Встретив же антизеленый антикварк, такой глюон превратит его в антикрасный [316]. Довольно ключевое свойство глюонов состоит в том, что они не только осуществляют обмен цветами между кварками, но и сами взаимодействуют друг с другом: по три или даже по четыре за один раз. Один глюон может разделиться на два или на три, два или три могут слиться в один, и два могут превратиться в два других; все это происходит с сохранением цветового заряда.

Наши представления о кварках и глюонах позволяют дать превосходное описание всего, что с ними происходит, когда кварки весьма близки друг к другу, но мы плохо понимаем, как распространить это описание на случаи, когда расстояние между кварками увеличивается — например, если один из кварков подвергается воздействию, выдергивающему его из протона. В наблюдениях, однако, твердо установлено, что свободные кварки в природе не встречаются; не встречаются вообще никакие образования из кварков, которые несли бы ненулевой цветовой заряд. Это свойство получило название конфайнмент (пленение) кварков.

В колоде бозонов **B** осталась одна карта, которая на рис. B.4 лежит рубашкой вверх. Перевернув ее, видим что-то вроде джокера:




Это бозон Хиггса (и предмет для отдельной истории).

# Литература [317]

[1] Александров Е. Б., Александров П. А., Запасский В. С., Корчуганов В. Н., Стирин А. И. Эксперименты по прямой демонстрации независимости скорости света от скорости движения источника (демонстрация справедливости второго постулата специальной теории относительности Эйнштейна) // УФН. 2011. Вып. 12. Т. 181. С. 1345–1351.

[2] Белецкий В. В. Очерки о движении космических тел. 2-е изд. — М.: Наука, 1977.

[3] Брайсон Б. Краткая история почти всего на свете. — М.: Гелеос, 2007. 2-е изд. — М.: АСТ, 2018. — Сер.: Элементы.

[4] Вайнберг С. Гравитация и космология. — М.: Мир, 1975.

[5] Вигнер Е. Непостижимая эффективность математики в естественных науках // УФН. 1968. Вып. 3. Т. 94. С. 535–546.

[6] Вигнер Е. Этюды о симметрии. — М.: Мир, 1971.

[7] Габсер С., Преториус Ф. Маленькая книга о черных дырах. — СПб.: Питер, 2019.
[8] Галилей Галилео. Пробирных дел мастер/Пер. Ю. А. Данилова. — М.: Наука, 1987.
[9] Гарднер М. Теория относительности для миллионов. — М.: Атомиздат, 1967.
[10] Гейзенберг В. Часть и целое/Пер. с нем. В. В. Бибихина // Гейзенберг В. Физика и философия. Часть и целое. — М.: Наука, 1989.
[11] Дирак П. А. М. Принципы квантовой механики/Пер. 4-го изд. — М.: Наука, 1979.
[12] Дирак П. А. М. Воспоминания о необычайной эпохе. — М.: Наука, 1990.
[13] Дмитриев И. С. Упрямый Галилей. — М.: Новое литературное обозрение, 2015.
[14] Кирсанов В. С. Научная революция XVII века. — М.: Наука, 1987.
[15] Конвей Дж. Х., Смит Д. А. О кватернионах и октавах, об их геометрии, арифметике и симметриях. — М.: МЦНМО, 2009.
[16] Кумар М. Квант. Эйнштейн, Бор и великий спор о природе реальности. — М.: АСТ; Corpus, 2013. — Сер.: Элементы.
[17] Левантовский В. И. Механика космического полета в элементарном изложении. 3-е изд. — М.: Наука, 1980.
[18] Мизнер Ч., Торн К., Уилер Дж. Гравитация: в 3 т. — М.: Мир, 1977.
[19] Норт Дж. Космос. Иллюстрированная история астрономии и космологии. — М.: Новое литературное обозрение, 2020.
[20] Попов С. Вселенная. Краткий путеводитель по пространству и времени: от Солнечной системы до самых далеких галактик и от Большого взрыва до будущего Вселенной. — М.: Альпина нон-фикшн, 2018.
[21] Попов С. Сверхсветовое разбегание галактик и горизонты Вселенной: путаница в тонкостях. http://www.astronet.ru/db/msg/1194830

[22] Пономарев Л. И. Под знаком кванта. 4-е изд. — М.: Физматлит, 2012.
[23] Ровелли К. Срок времени. — М.: АСТ, 2020.
[24] Сасскинд Л. Битва при черной дыре. Мое сражение со Стивеном Хокингом за мир, безопасный для квантовой механики. — СПб.: Питер, 2015.
[25] Спектр-Рентген-Гамма: астрофизический проект. http://srg.iki.rssi.ru/?page_id=2&lang=ru.
[26] Сурдин В. Г. Динамика межзвездного зонда // Бюллетень Спец. астрофиз. обсерв. 2007. Т. 60–61. С. 254–259.
[27] Сурдин В. Г. Вселенная от А до Я. — М.: Эксмо, 2012.
[28] Солнечная система/Ред.-сост. В. Г. Сурдин. — М.: Физматлит, 2009.
[29] Путешествия к Луне/Ред.-сост. В. Г. Сурдин. — М.: Физматлит, 2015.
[30] Сурдин В. Г. Астрономия. Популярные лекции. 2-е изд. — М.: МЦНМО, 2019.
[31] Тегмарк М. Наша математическая Вселенная. — М.: АСТ, 2016.
[32] Тейлор Э. Ф., Уилер Дж. А. Физика пространства-времени. 2-е изд. — М.: Мир, 1971.
[33] Топоренский А. В., Попов С. Б. Хаббловский поток в картине наблюдателя // УФН. 2014. Вып. 7. Т. 184. С. 767–774.
[34] Фейнман Р. Характер физических законов. — М.: АСТ, 2020.
[35] Фейнман Р., Лейтон Р., Сэндс М. Фейнмановские лекции по физике. — М.: Мир, 1976.
[36] Хокинг С. Краткая история времени: от Большого взрыва до черных дыр. — СПб.: Амфора, 2001.
[37] Циолковский К. Э. Исследование мировых пространств реактивными приборами. Переиздание работ 1903 и 1911 гг. с некоторыми изменениями и дополнениями. — Калуга, 1926.
[38] Шевченко М. Ю. Луна. Наблюдая за самым знакомым и невероятным небесным объектом. — М.: АСТ, 2020.

[39] Шил М. А., Торн К. С. Геометродинамика: нелинейная динамика искривленного пространства-времени // УФН. 2014. Вып. 4. Т. 184. С. 367–378.

[40] Штернфельд А. А. Введение в космонавтику. 2-е изд. — М.: Наука, 1974.

[41] Штернфельд А. А. История моей первой книги // Вопросы истории естествознания и техники. 1981. № 3. С. 134–139.

[42] Эйнштейн А. Физика и реальность: сборник статей. — М.: Наука, 1965.

[43] Bacciagaluppi G. (2003) *The role of decoherence in quantum mechanics.* In *Stanford Encyclopedia of Philosophy*, E. N. Zalta (ed.); https://plato.stanford.edu/archives/fall2020/entries/qm-decoherence/

[44] Batygin K., Adams F. C., Brown M. E., Becker J. C. (2019) *The Planet Nine hypothesis*. *Physics Reports* 805: 1–53; arXiv:1902.10103.

[45] Bell J. S. (1982) *On the impossible pilot wave*. *Foundations of Physics*, 12: 989–999.

[46] Bobrick A., Martire G. (2021) *Introducing physical warp drives*. *Classical and Quantum Gravity*, 38: 105009; arXiv:2102.06824.

[47] Boya L. J. (2003) *The thermal radiation formula of Planck* (1900). *Review Real Academia de Ciencias de Zaragoza*, 58: 91–114.

[48] Brozović M., Showalter M. R., Jacobson R. A., French R. S., Lissauer J. J., de Pater I. (*2020) Orbits and resonances of the regular moons of Neptune*. *Icarus*, 338: 113462; arXiv:1910.13612.

[49] Buser M., Kajari E., Schleich W. P. (2013) *Visualization of the Gödel universe*. *New Journal of Physics*, 15: 013063, DOI:10.1088/1367–2630/15/1/013063; arXiv:1303.4651.

[50] Capano C. D., Tews I., Brown S. M., Margalit B., De S., Kumar S., Brown D. A., Krishnan B., Reddy S. (2020) *Stringent constraints on neutron-star radii from multimessenger observations and nuclear theory*. *Nature Astronomy*, 4: 625–632; arXiv:1908.10352.

[51] Carroll S. (2010) *From Eternity to Here: The Quest for the Ultimate theory of Time*. New York: Dutton.
[52] Carroll S. M. (1997) *Lecture Notes on General Relativity*. arXiv: gr-qc/9712019.
[53] Casimir H. B. G. (1999) *Some remarks on the history of the so called Casimir effect*. In *Proceedings of the Fourth Workshop on Quantum Field Theory under the Influence of External Conditions*, ed. M. Bordag. World Scientific.
[54] Chabukswar R., Mukherjee K. (2018) *Longest straight line paths on water or land on the Earth*. arXiv:1804.07389.
[55] Chenciner A., Montgomery R. (2000) *A remarkable periodic solution of the three body problem in the case of equal masses*. *Annals of Mathematics*, 152(2): 881–901; arXiv: math/0011268.
[56] Chou C. W., Hume D. B., Rosenband T., Wineland D. J. (2010) *Optical clocks and relativity*. *Science*, 329: 1630–1633, DOI:10.1126/science.1192720.
[57] Ciufolini I. (2007) *Dragging of inertial frames*. *Nature*, 449: 41–47; https://doi.org/10.1038/nature06071
[58] Clemence G. M. (1947) *The relativity effect in planetary motions*. *Reviews of Modern Physics*, 19: 361–364.
[59] Collins M. (1974); (2019) *Carrying the Fire; An Astronaut's Journeys*. Cooper Square Press; Farrar, Straus & Giroux; Pan Books.
[60] Commins E. D. (2012) *Electron spin and its history*. *Annual Review of Nuclear and Particle Science*, 62: 133–157; https://doi.org/10.1146/annurev-nucl-102711–094908
[61] Davis T., Lineweaver C. (2004) *Expanding confusion: common misconceptions of cosmological* h*orizons and the superluminal expansion of the universe*. *Astronomical Society of Australia*, 21(1): 97–109; arXiv: astro-ph/0310808.
[62] Dokuchaev V. I. (2011) *Is there life inside black holes? Classical and Quantum Gravity*, 28: 235015; arXiv:1103.6140.
[63] Eddington A. S. (1927) *The Nature of the Physical World* (*Gifford Lectures*). Brooklyn: AMS Press.
[64] Egan G. (2006–2007) *The Rindler Horizon*. https://www.gregegan.net/SCIENCE/Rindler/RindlerHorizon.html

[65] Einstein A. (1905) *Zur Elektrodynamik bewegter Körper*. *Annalen der Physik*, 17: 891.

[66] Einstein A. (1905) Ist die Trägheit eines Körpers von seinem Energieinhalt abhängig? *Annalen der Physik (Leipzig)* 18 [323]: 639–641.

[67] Farina C. (2006) *The Casimir effect: some aspects. Brazilian Journal of Physics*, 36: 1137–1149; DOI:10.1590/S0103–97332006000700006; arXiv: hep-th/0612232.

[68] Faye J. (2002) *Copenhagen interpretation of quantum mechanics*. In *Stanford Encyclopedia of Philosophy*, E. N. Zalta (ed.); https://plato.stanford.edu/archives/win2019/entries/qm-copenhagen/

[69] Fernflores F. (2001) *The equivalence of mass and energy*. In *Stanford Encyclopedia of Philosophy*, E. N. Zalta (ed.); https://plato.stanford.edu/archives/fall2019/entries/equivME/

[70] Fine A. (2004) *The Einstein–Podolsky–Rosen argument in quantum theory*. In *Stanford Encyclopedia of Philosophy*, E. N. Zalta (ed.); https://plato.stanford.edu/archives/sum2020/entries/qt-epr/

[71] Fowler M. (2008) *Planck's route to the black body radiation formula and quantization*. http://galileo.phys.virginia.edu/classes/252/PlanckStory.pdf

[72] Fragione G. (2019) *Dynamical origin of S-type planets in close binary stars*. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 483: 3465–3471; arXiv:1812.02754.

[73] de la Fuente Marcos C., de la Fuente Marcos R. (2016) *A trio of horseshoes: past, present and future dynamical evolution of Earth co-orbital asteroids 2015 XX169, 2015 YA and 2015 YQ1*. *Astrophysics and Space Science*, 361: 121; DOI:10.1007/s10509–016–2711–6; arXiv:1603.02415.

[74] Ghirardi G., Bassi A. (2002) *Collapse theories.* In *Stanford Encyclopedia of Philosophy*, E. N. Zalta (ed.); https://plato.stanford.edu/archives/sum2020/entries/qm-collapse/

[75] Goudsmit S. A. *The discovery of the electron spin*. https://www.lorentz.leidenuniv.nl/history/spin/goudsmit.html

[76] Griffiths R. B. (2003) *Consistent Quantum Theory*. Cambridge University Press.
[77] Hahn O., Strassmann F. (1939) Über den Nachweis und das Verhalten der bei der Bestrahlung des Urans mittels Neutronen entstehenden Erdalkalimetalle. *Naturwissenschaften*, 27(1): 11–15.
[78] Hammer D., Romashchenko A., Shen A., Vereshchagin N. (2000) *Inequalities for Shannon* e*ntropy and Kolmogorov complexity*. *Journal of Computer and System Sciences*, 60: 442–464.
[79] Hensen B. et al. (2015) *Experimental loophole-free violation of a Bell inequality using entangled electron spins separated by* 1.3 *km*. *Nature*, 526: 682–686.
[80] Hohenberg P. C. (2010) *An introduction to Consistent Quantum Theory*. *Reviews of Modern Physics*, 82: 2835–2844; arXiv:0909.2359.
[81] Hohmann W. (1925) *Die Erreichbarkeit der Himmelskörper*. Verlag Oldenbourg in München.
[82] Holoien T. W.-S. et al. (2019) *Discovery and early evolution of ASASSN-19bt, the first TDE detected by* TESS. *The Astrophysical Journal*, 883: 11.
[83] Jacobson T. (2018) *Entropy from Carnot to Bekenstein*. arXiv:1810.07839.
[84] Right. Hon. Lord Kelvin G. C.V.O. D.C.L. LL.D. F.R.S. M.R.I. (1901) *Nineteenth century clouds over the dynamical theory of heat and light. The London, Edinburgh, and Dublin Philosophical Magazine and Journal of Science*, 2(7): 1–40.
[85] Kokkotas K. D. (2008) *Gravitational wave astronomy*. *Reviews in Modern Astrophysics*, 20: 140; arXiv:0809.1602.
[86] Leleu A. et al. (2021) *Six transiting planets and a chain of Laplace resonances in TOI-178*. *Astronomy & Astrophysics*, 649: A26; arXiv:2101.09260.
[87] Levin J., Perez-Giz G. (2008) *A periodic table for black hole orbits*. *Physical Review D*, 77: 103005; DOI:10.1103/PhysRevD.77.103005; arXiv:0802.0459.
[88] Lobo F. S. N. (2008) *Exotic solutions in General Relativity: Traversable wormholes and 'warp drive' spacetimes.*

*Classical and Quantum Gravity Research*, 1–78. Nova Sci. Pub. ISBN 978–1–60456–366–5; arXiv:0710.4474.

[89] Maroney O. (2009) *Information processing and thermodynamic entropy*. In *Stanford Encyclopedia of Philosophy*, E. N. Zalta (ed.); https://plato.stanford.edu/archives/fall2009/entries/information-entropy/

[90] Maudlin T. (2019) *Philosophy of Physics: Quantum Theory* (*Princeton Foundations of Contemporary Philosophy*). Princeton and Oxford: Princeton University Press.

[91] Moore C. (1993) *Braids in classical dynamics*. *Physical Review Letters*, 70: 3675–3679.

[92] Moore W. (2015) *Schrödinger: Life and Thought*. Cambridge University Press, 2015.

[93] Musielak Z. E., Quarles B. (2014) *The three-body problem*. *Reports on Progress in Physics*, 77: 065901; arXiv:1508.02312.

[94] Myrvold W., Genovese M., Shimony A. (2004) *Bell's theorem*. In *Stanford Encyclopedia of Philosophy*, E. N. Zalta (ed.); https://plato.stanford.edu/archives/fall2020/entries/bell-theorem/

[95] Nichols D. A., Owen R., Zhang F., Zimmerman A., Brink J., Chen Y., Kaplan J. D., Lovelace G., Matthews K. D., Scheel M. A., Thorne K. S. (2011) *Visualizing spacetime curvature via frame-drag vortexes and tidal tendexes I. General theory and weak-gravity applications*. *Physical Review D*, 84: 124014; arXiv:1108.5486.

[96] Norsen T. (2017) *Foundations of Quantum Mechanics. An Exploration of the Physical Meaning of Quantum Theory*. Springer.

[97] Norsen T. (2013) *The pilot-wave perspective on quantum scattering and tunneling*. *American Journal of Physics*, 81: 258; arXiv:1210.7265.

[98] Norsen T. (2014) *The pilot-wave perspective on spin*. *American Journal of Physics*, 82: 337–348; arXiv:1305.1280.

[99] Penrose O. (1970) *Foundations of Statistical Mechanics*. Oxford: Pergamon Press.

[100] Scholtz J., Unwin J. (2019) *What if planet 9 is a primordial black hole?* arXiv:1909.11090l.

[101] Shoshany B. (2019) *Lectures on faster-than-light travel and time travel*. *SciPost Physics Lecture Notes*, 10; DOI:10.21468/SciPostPhysLectNotes.10; arXiv:1907.04178.

[102] Sternfeld A. J. (1934) Sur les trajectoires permettant d'approcher d'un corps attractif central à partir d'une orbite keplérienne donnée. *Comptes rendus de l'Académie des sciences, Paris*, 198 (1): 711–713.

[103] Thorne K. S., Blandford R. D. (2017) *Modern Classical Physics*: *Optics, Fluids, Plasmas, Elasticity, Relativity, and Statistical Physics*. Princeton University Press.

[104] Tiscareno M. S., Thomas P. C., Burns J. A. (2009) *The rotation of Janus and Epimetheus*. *Icarus*, 204: 254–261; arXiv:0904.3515.

[105] Toretti R. (1983) *Relativity and Geometry*. Pergamon Press.

[106] Wallace D. (2012) *Decoherence and its role in the modern measurement problem*. *Philosophical Transactions of the Royal Society A*, 370: 4576–4593; arXiv:1111.2187.

[107] Westfall R. (1981) *Never at Rest: A Biography of Isaac Newton*. Cambridge: Cambridge University Press.

[108] Wheeler J. A., Ford K. (2000) *Geons, Black Holes, and Quantum Foam: A Life in Physics*. Norton.

[109] Williams R. (2009) *September, 1911—The Sackur–Tetrode equation: how entropy met quantum mechanics. APS News August/September*, 18(8); https://www.aps.org/publications/apsnews/200908/physicshistory.cfm

[110] Witten E. (2020) *Searching for a black hole in the outer Solar System*. arXiv:2004.14192.

[111] Xiaoming Li, Yipeng Jing, Shijun Liao. (2018) *The* 1223 *new periodic orbits of planar three-body problem with unequal mass and zero angular momentum*. *Astronomical Society of Japan*, 70 (4): 64; DOI:10.1093/pasj/psy057; arXiv: 1709.04775.

[112] Zurek W. H. (2018) *Quantum theory of the classical: quantum jumps, Born's rule, and objective classical reality via

*quantum Darwinism. Philosophical Transactions of the Royal Society A*, 376: 20180107; arXiv:1807.02092.

# Источники

**Прогулка 1**

Рис. 1.3: NASA/Ames/JPL-Caltech
Рис. 1.6: European Southern Observatory/M. Kornmesser
Рис. 1.7: Shutterstock

**Прогулка 2**

Рис. 2.2: NASA, Apollo 8 Crew, Bill Anders, Jim Weigang
Рис. 2.5: China National Space Agency
Рис. 2.6: ИПМ им. М. В. Келдыша РАН
Рис. 2.7: NASA
Рис. 2.15: Tesla
Рис. 3.1: C. Madsen/ESO

**Прогулка 3**

Рис. 3.3: Smithsonian Institution, University of St Andrews Library, University of Cambridge
Рис. 3.5: NASA
Рис. 3.7: NASA/JPL-Caltech
Рис. 3.9: Lexicon/Wikipedia/CC BY-SA 3.0
Рис. 3.10: NASA, ESA, Caltech, Southwest Research Institute
Рис. 3.13: Event Horizon Telescope collaboration
Рис. 3.14: NASA, ESA, STScI/AURA, Hubble collaboration
Рис. 3.15: NASA, ESA, T. Brown and J. Tumlinson/STScI
Рис. 3.16: Max Planck Institute for Astrophysics
Рис. 3.17: Shutterstock

**Прогулка 4**

Рис. 4.4: А. Семихатов
Рис. 4.5: NASA/Johns Hopkins University Applied Physics Laboratory/Southwest Research Institute
Рис. 4.6: NASA/JPL-Caltech/Space Science Institute
Рис. 4.7: International Centre for Global Earth Models

Рис. 4.8: NASA/JPL-Caltech/MIT/GSFC
Рис. 4.11: Alan Chamberlin/JPL-Caltech
Рис. 4.12: NASA/JPL/Space Science Institute
Рис. 4.13: Legion-Media
Рис. 4.14: NASA//JPL-Caltech
Рис. 4.16: Shijun Liao/Shanghai Jiao Tong University

**Прогулка 5**
Рис. 5.2: Legion-Media
Рис. 5.6: CERN, GeoEye/e-GEOS
Рис. 5.9: Shutterstock
Рис. 5.13: Andrew Z. Colvin/Wikipedia/CC BY-SA 3.0
Рис. 5.14: NASA, JPL, Exoplanet Travel Bureau
Рис. 5.15: Shutterstock
Рис. 5.16: NASA

**Прогулка 6**
Рис. 6.3: Tesla
Рис. 6.5: Neil Kaye
Рис. 6.8 и 6.9: Rohan Chabukswar/United Technologies Research Center Ireland
Рис. 6.17 и 6.18: Janna Levin, Gabe Perez-Giz/Columbia University
Рис. 6.19: SpaceX
Рис. 6.20: NASA, ESA, STScI, Hubble
Рис. 6.23: Роскосмос
Рис. 6.25: Яндекс/Геоцентр-Консалтинг

**Прогулка 7**
Рис. 7.2: Olga Guryanova/Unsplash
Рис. 7.6: NASA, ESA, Z. Levay and R. van der Marel/STScI, T. Hallas, A. Mellinger
Рис. 7.7, 7.8 и 7.9: Institute of Quantum Physics/Ulm University
Рис. 7.10: Shutterstock
Рис. 7.11: Barak Shoshany/Perimeter Institute for Theoretical Physics

Рис. 7.12: ESO/MPE/S. Gillessen, UCLA Galactic Center Group

Рис. 7.13: UCLA Galactic Center Group

Рис. 7.14: H. Marshall/MIT, CXC, NASA, F. Zhou, F. Owen/NRAO, J. Biretta/STScI, E. Perlman/UMBC

**Прогулка 9**

Рис. 9.1: Shutterstock

Рис. 9.4: Shutterstock

Рис. 9.5: Legion-Media

Рис. 9.7: Shutterstock

Рис. 9.12: Shutterstock

Рис. 9.16: Shutterstock

Рис. 9.17: Shutterstock

**Прогулка 10**

Рис. 10.2: Shutterstock

Рис. 10.4: NASA/SDO/GSFC

Рис. 10.6: Ralejs Tepfers/Chalmers University of Technology, Shirley Chiang/University of California, Berkeley

Рис. 10.13: Legion-Media

**Прогулка 11**

Рис. 11.3: CERN

Рис. 11.10: ГМИИ им. А. С. Пушкина

Рис. 11.11: Benjamin Couprie/Institut International de Physique Solvay

Рис. 11.13: Smithsonian Institution

[1] Что до некоторой степени оправдывает мою любовь к примечаниям.

[2] Никто, конечно, не отменял сложные явления, в которых задействовано несколько ключевых механизмов сразу, из-за чего не получается построить картину происходящего, начав с какого-то одного из них. В подобных случаях нам все-таки приходится оперировать современными вариантами рассуждений о «смешанном» поведении. — *Здесь и далее примечания автора, если не указано иное.*

[3] Кеплерова «Новая астрономия» (Astronomia Nova) вышла в 1609 г. Впрочем, все три закона, о которых речь чуть ниже, обрели свою окончательную форму ближе к 1621 г.
[4] Пер. А. М. Френка.
[5] То есть на таком удалении от светила, при котором на планете не слишком холодно и не слишком жарко, так что там может существовать вода в жидкой фазе при не слишком высоком давлении.
[6] Этот эпизод придумал Винченцо Вивиани для первой официальной биографии Галилея, которую он сочинял по заказу великого герцога Тосканского, ориентируясь на пример «Жизнеописаний» Вазари; духу Вазари эта история действительно вполне соответствует.
[7] Последнее обстоятельство, как выяснилось впоследствии, может служить проводником глубоко в природу мира, и на дальнейших прогулках нам предстоит познакомиться с впечатляющим развитием событий.
[8] Галилею удалось выразить закон равноускоренного движения («естественно ускоренного», в его трактовке), не вводя никакой количественной меры для ускорения; собственно говоря, при естественно ускоренном движении тело проходит все градусы скорости, но никаких градусов ускорения нет.
[9] Пер. Ю. А. Данилова.
[10] Ньютоновы «Начала» (Philosophiæ Naturalis Principia Mathematica) вышли в 1687 г.
[11] Тема, привлекающая к себе неослабевающее внимание: а каким уравнениям подчиняются функции, определяющие доходность финансовых инструментов? Сама постановка этой задачи навеяна успехом стратегии «выразим наши представления о причинах в виде уравнений, а потом будем их решать».
[12] «Если я видел дальше других, то потому, что стоял на плечах гигантов». Ньютон родился в год смерти Галилея. Я бы оценил разницу между ними в три поколения.
[13] Конечно, если бы поле для воздушного хоккея имело размер хоккейного-с-шайбой, то по мере движения шайбы было бы заметно ее замедление из-за сопротивления воздуха,

но в общепринятых вариантах воздушного хоккея это сопротивление никак не успевает себя проявить.
[14] Еще более странно, что одно и то же число — масса тела — измеряет *два* совершенно разных свойства: степень инертности и гравитационный заряд, но мы вынуждены отложить обсуждение этой загадки до одной из следующих прогулок.
[15] Привычная для нас формулировка «закон всемирного тяготения» содержит неидеальный, с моей точки зрения, перевод слова *universal* (*lex universalis*, если с латыни). Лучше было бы говорить «всеобщего», но калька в виде «универсальный закон тяготения» была бы еще лучше, подчеркивая ключевую идею универсальности: в гравитационном взаимодействии участвуют все тела, причем универсальным образом, а именно вне зависимости от того, из чего они сделаны, и любых других особенностей.
[16] Письмо Ньютона к Бентли, 1692 г.
[17] «Гипотез же я не измышляю» (пер. А. Н. Крылова) — знаменитые слова из «Общего поучения» в финале «Математических начал натуральной философии». — *Прим. ред.*
[18] Речь идет о системе «Солнце плюс одна планета»; про остальные планеты мы временно забываем. Эта задача на профессиональном жаргоне, кстати, называется задачей Кеплера.
[19] Его редко упоминают, видимо, ввиду его тривиальности с теоретической точки зрения; с практической же точки зрения направить корабль с околоземной орбиты по прямой к Солнцу намного труднее, чем за пределы Солнечной системы.
[20] А также и что было в прошлом: уравнения таковы, что их можно с равным успехом решать в обе стороны по времени, предсказывая будущее и описывая прошлое с одинаковой степенью надежности.
[21] Приближение к Солнцу делает комету заметной еще и потому — и даже в первую очередь потому, — что испаряемое с ее поверхности вещество образует *хвост*. При удалении от Солнца испарение прекращается и хвост

исчезает, делая наблюдение кометы особенно трудной задачей.
[22] После себя Палич оставил три с половиной тысячи книг, часть из которых были переписанными от руки научными трудами, приобретение которых было ему не по карману.
[23] Пьяцци назвал открытое им тело Cerere Ferdinandea, почтив не только римскую богиню сицилийского происхождения, но и короля Неаполя Фердинанда IV, и короля Сицилии Фердинанда III (это одно и то же лицо). Королевская часть имени не прижилась (да и Фердинанд был в 1805 г. смещен Наполеоном и снова сделался королем, на этот раз Фердинандом I в Королевстве обеих Сицилий, лишь в 1816 г.). Сейчас мы относим Цереру — диаметр которой чуть меньше 1000 км — к классу карликовых планет. Они нам еще встретятся, но не на этой прогулке: все, кроме Цереры, пребывают намного дальше от Солнца — за орбитой Нептуна, так что до них еще надо добраться.
[24] Пер. А. М. Френка.
[25] Мы помним и о гиперболах, но не будем упоминать их каждый раз; в конце концов, что прилетело по гиперболе, то и улетело.
[26] Мы встретимся со свободным падением в космосе на одной из более поздних прогулок и рассмотрим его в разнообразных подробностях. Стоит сразу оговориться, что оно почти никогда не является равноускоренным, его скорость изменяется во времени более сложными способами (равноускоренное падение происходит только тогда, когда сила притяжения не меняет величину и направление, а это условие, *строго* говоря, не выполнено никогда, хотя с хорошей точностью имеет место вблизи поверхности планеты или звезды).
[27] Причина появления тут квадратного корня — закон обратных квадратов для тяготения. При этом расстояния надо брать до центра каждого небесного тела.
[28] В качестве дополнительной меры безопасности корабль был исходно направлен по траектории свободного возвращения — так, чтобы при невозможности дальнейших маневров он, обогнув Луну, вернулся бы к Земле.

[29] Несколько неожиданные последствия действий по изменению *орбиты* обсуждаются далее на этой прогулке. Там все намного интереснее.
[30] Это жаргон, которому непросто сопротивляться. Имеется в виду неустойчивость орбиты *тела*, помещенного в точку Лагранжа, — но изъясняться каждый раз с такими подробностями едва ли возможно.
[31] Пример обратной ситуации: шкаф, стоящий в вашей комнате, надо надеяться, устойчив, потому что *малые* наклоны не приводят к его опрокидыванию, наоборот — шкаф возвращается в исходное положение. Легкость «сваливания» из точки Лагранжа зависит от направления: при сдвиге в некоторых направлениях даже возникает сила, возвращающая тело к точке Лагранжа, но при этом сдвиг в любом другом направлении неизбежно ведет к сваливанию. Картина хорошо описывается термином «седловина»: высыпанная на седловую поверхность крупа скатится вниз не по всем направлениям, но при небольшой встряске в конце концов упадет вся.
[32] Аппараты WMAP (NASA, 2001–2009) и «Планк» (Европейское космическое агентство ESA, 2009–2013) собрали фундаментальные данные о развитии Вселенной, сделав фактически «фотографию» ранней Вселенной, только-только остывшей до 3000 K, из-за чего электроны смогли удерживаться в атомах, а свет наконец смог распространяться. Мир не содержал тогда элементов тяжелее лития и ни единой звезды. Детали, которые испущенный в то время свет донес до космических аппаратов, выражаются в относительных вариациях в интенсивности величиной в несколько миллионных долей. Чтобы проводить измерения с такой чувствительностью, требовались тщательно продуманные условия.
[33] Задачи аппарата «Спектр-РГ» — картирование Вселенной в рентгеновском диапазоне, наблюдение скоплений галактик и центральных черных дыр в галактиках, звезд и белых карликов, испускающих рентгеновское излучение. Возможности обсерватории должны существенно уточнить наше понимание эволюции Вселенной.

[34] James Webb Space Telescope, разработка NASA с участием ESA и Канадского космического агентства.
[35] Она называется силой Кориолиса; я произношу фамилию Кориолис с ударением на последнем слоге, но не знаю, правильно ли это.
[36] У Жуковского, переводившего поэму Шиллера, «презрительный» означает «презренный» или «презираемый»:

*Скольких бодрых жизнь поблекла!*
*Скольких низких рок щадит!*
*Нет великого Патрокла!*
*Жив презрительный Терсит!*

[37] Идея об использовании попутных тел — например, спутников планет — для ускорения в дальних перелетах принадлежит пионеру космонавтики Ю. В. Кондратюку (под этим именем с 1921 г. жил А. И. Шаргей): он описал ее среди прочего в своей рукописи «Тем, кто будет читать, чтобы строить», написанной, вероятно, около 1919 г., но ставшей известной значительно позже.
[38] Правильное название — «Кассини — Гюйгенс»; это аппарат NASA, ESA и Итальянского космического агентства.
[39] В отличие от гравитационной пращи, маневр Оберта — это активный маневр с использованием реактивной тяги. Другое существенное отличие состоит в том, что гравитационная праща требует гиперболической траектории относительно планеты-«пращи», а маневр Оберта работает на эллиптических орбитах — хотя его можно, конечно, использовать и для того, чтобы «сорваться» с эллипса и быстро улететь по гиперболе.
[40] Работает это так: полная энергия тела на эллиптической орбите (энергия движения в сумме с энергией в поле притяжения) определяет большую полуось эллипса, да еще таким образом, что увеличение энергии означает увеличение большой полуоси (хоть и способом, далеким от прямой пропорциональности). Конечно, в зависимости от того, как вы развернете сопло двигателя по отношению к направлению движения, ваш корабль может перейти на разные эллипсы, включая и очень вытянутые, или, наоборот, с вытянутого

эллипса вы можете перебраться на тот, который ближе к окружности. Но в случае почти круговых орбит большая полуось — это примерно радиус, и поэтому добавка к энергии за счет сгорания топлива означает неизбежное увеличение радиуса.

[41] Идею применить для высадки на другое небесное тело отделяемую часть космического корабля первым высказал, по-видимому, Кондратюк в уже упоминавшейся рукописи «Тем, кто будет читать, чтобы строить».

[42] «Аполлон-8» — самый рискованный полет NASA из-за количества новых элементов, которые предстояло испробовать (и, по-видимому, первый в истории случай, когда жизнь людей доверили компьютеру — он управлял включениями двигателя). Космический телескоп JWST, упомянутый ранее на этой прогулке, назван по имени «администратора» (руководителя) NASA в 1961–1968 гг. Джеймса Вебба (Уэбба), который не сразу согласился на изменение программы, в результате которого «Аполлон-8» отправился к Луне.

[43] Планеты в Солнечной системе тоже можно открыть с относительно большого расстояния, если там есть кому этим заняться, — и, конечно, малые планеты тоже оказываются дискриминированными. Из-за наличия Юпитера Солнце совершает движение с характерной скоростью 13 м/с, но на существование Земли оно откликается скоростями только около 9 *сантиметров* в секунду.

[44] Гершель согласился, что это планета, в 1783 г.; он же и получил пожизненную стипендию от короля Георга III в знак признания этого открытия. Гершель предложил для новой планеты название «Звезда Георга», которое некоторое время употреблялось, но не закрепилось (не стало популярным и предложение «Гершель»). Современное название утвердилось не ранее чем через 40 лет. Космический телескоп «Гершель» Европейского космического агентства, работавший с 2009 по 2013 г. вблизи точки Лагранжа $L_2$ системы Солнце — Земля, назван в честь самого сэра Уильяма Гершеля, а также его сестры и сотрудницы Каролины Гершель. Уранианский год длится около 84

земных, а от Солнца Уран находится почти в 20 раз дальше, чем Земля.
[45] В его поддержку в самом конце 1846 г. высказался и первый директор Пулковской обсерватории Friedrich Georg Wilhelm von Struve — Василий Яковлевич Струве.
[46] А другая пара спутников Нептуна, Протей и Гиппокамп, находится в резонансе 13 : 11. Для орбит, близких к круговым, такой резонанс означает, что радиус большей превышает радиус меньшей примерно на 12%. Ах, если бы Марс находился в таком резонансе с Землей — и само путешествие туда было бы проще, и мотивировка для него была бы несравненно сильнее, потому что условия там, вероятно, не так сильно отличались бы от земных.
[47] Совсем строго говоря, они обмениваются моментом количества движения — это количество движения, умноженное на радиус орбиты. Я рискнул не утяжелять текст нагромождениями терминов.
[48] Уже знакомый нам аппарат «Кассини» наблюдал, как Янус и Эпиметей поменялись орбитами 21 января 2006 г.
[49] Планеты обозначаются прибавлением буквы к названию звезды; при этом используются буквы начиная с b.
[50] Transiting Exoplanet Survey Satellite — в переводе «космический телескоп [предназначенный] для открытия экзопланет транзитным методом». Это метод поиска экзопланет, альтернативный измерению скорости вдоль луча зрения по спектрам.
[51] С поворачивающимися эллипсами мы очень скоро встретимся по другому поводу; этот эффект показан на рис. 3.12.
[52] Трудно удержаться и не отметить обстоятельство, вообще неприменимое к Леверье, но не лишенное иронии в ретроспективе: сейчас мы знаем, что такие «горячие сверхземли» в изобилии встречаются у звезд типа Солнца!
[53] Радиоволны с каким-то похожим распределением интенсивностей не пришли ни в один конкретный радиотелескоп: эта картина *восстановлена* из того, что получала система синхронизированных между собой радиотелескопов. Сколько бы пикселей ни содержалось в

готовой «фотографии», это не идет ни в какое сравнение с объемом исходных данных: их нельзя было передать через интернет, вместо этого приходилось пересылать жесткие диски самолетами.
[54] Встречаясь с какой-нибудь попыткой опровержения фундаментальной физической теории — скажем, теории гравитации Эйнштейна — домашними средствами (а такие попытки почему-то не иссякают), стоит помнить, что в науку уже встроен организованный скепсис. Вопросы «А если?..» задаются постоянно, и разнообразные варианты модификации имеющихся теорий уже опробованы и отвергнуты как внутренне непоследовательные или противоречащие наблюдениям; те же, которые не отвергнуты, продолжают оставаться в поле зрения действующих ученых.
[55] Развитые методы наблюдений позволили, например, открыть в 2013 г. самую большую из известных структуру во Вселенной, получившую название «Великая стена Геркулес — Северная Корона». Это уже не совсем филамент, потому что он имеет выраженные размеры — 10 млрд и 7,2 млрд световых лет — в *двух* направлениях.
[56] Пожалуй, немного странно, что никто этому не удивляется; а представим себе, что вы с детства видите меняющуюся картинку, да так, что за одну лунную ночь перед глазами проходят много «морей» и гор! С другой стороны, какую композицию тогда написали бы Pink Floyd?
[57] Приливы проявляют себя у берега по той же причине, что и цунами: плавный подъем уровня воды в открытом океане незаметен, а когда вся масса воды упирается в крутой береговой склон, эффекты прилива могут даже стать туристической достопримечательностью, как, например, в норвежских фьордах.
[58] Трение воды о дно приводит к тому, что момент максимального прилива несколько отстает от момента наивысшего подъема Луны над горизонтом: наблюдатель на берегу океана на Земле сначала видит Луну в точке ее наибольшего подъема, а уже затем фиксирует максимальный прилив («горб»). Другими словами, ближайший к Луне горб в

океане находится не строго под Луной, а несколько впереди по направлению вращения Земли вокруг своей оси. Лунное притяжение тянет за него в сторону, противоположную вращению Земли, таким образом замедляя это вращение (притягивая дальний горб, Луна готова ускорить вращение Земли, но именно из-за того, что он находится далеко, суммарный эффект оказывается тормозящим).

[59] Пара Земля — Луна тоже не вполне обычна из-за относительных размеров Луны: она *великовата* для спутника такой планеты, как Земля; иногда этот факт включают в список факторов, которые могли повлиять на развитие жизни на Земле.

[60] В таком порядке они идут по мере увеличения расстояния от Сатурна; алфавитный же порядок — это порядок их открытия.

[61] Ценность происходящего для исследования Юпитера была очень велика; чем еще можно «ткнуть» в поверхность планеты так, чтобы ее температура повысилась с –143 °C до примерно 24 000 °C и материал планеты, находящийся на некоторой глубине под поверхностью, стал испускать электромагнитное излучение, выдавая тем самым свой состав? Шлейф от ударов поднимался на несколько тысяч километров, а темное пятно от самого сильного удара имело размер 12 000 км. В течение месяцев после столкновения следы от ударов были видны в телескоп даже лучше, чем Большое красное пятно Юпитера.

[62] Регистрация этого события была для TESS чистым везением. Его резонансная орбита, которую мы обсуждали на предыдущей прогулке, имеет и свои недостатки: телескоп обменивается данными с Землей не постоянно, а в более низкой части орбиты (где, впрочем, все равно находится выше, чем большинство спутников связи; максимальное сближение составляет около 108 000 км). Это не позволяет быстро настраивать телескоп на наблюдение непредвиденных единовременных событий, каким и был разрыв звезды сверхмассивной черной дырой.

[63] Первый искусственный спутник Луны — беспилотная станция «Луна-10» (весна 1966 г.); с интервалом в считаные месяцы за ней последовали «Лунар орбитер-1» и «Луна-11».
[64] И восходит к латинскому слову, означающему «рот» или «поцелуй», с тем же индоевропейским корнем, что в слове «уста».
[65] Это тот же эффект, которым грешит орбита Меркурия! В случае Меркурия самое интересное — вклад неньютоновской гравитации, но и вклад реальной несферичности Солнца тоже имеется: он приводит к прецессии на 0,0286″ в столетие. На более далекие планеты несферичность Солнца влияет крайне слабо (соответствующая компонента в силе притяжения сходит на нуль на больших расстояниях), но к тому же эффекту — как будто бы несферичности притягивающего тела — сводится влияние больших планет Солнечной системы на обособленные транснептуновые объекты (прогулка 3). Из-за этого, например, орбита Седны (см. рис. 3.10) должна прецессировать на 0,054″ в столетие. За время существования Солнечной системы перигелии обособленных объектов должны были разойтись кто куда, но не сделали этого, предположительно из-за влияния Планеты 9.
[66] Из-за влияния атмосферы «прощупывать» гравитационное поле Земли надо на достаточных расстояниях, где эффекты неоднородности не теряются на фоне эффектов атмосферного трения (правда, на таких расстояниях вклады с большими обратными степенями расстояния, скажем $1/R^{12}$, уже совсем ничтожны). А разобравшись с тонкими деталями гравитационного поля Земли, можно опуститься ниже (ведь радиус орбиты $R$ в формулах полностью в нашей власти!) и «прощупать» уже устройство атмосферы. Эффекты, которые здесь наблюдаются и затем применяются к прогнозированию реальных орбит, включают, например, некоторое распухание атмосферы на дневной стороне планеты. Снова движение позволяет судить о том, что иначе и заметить трудно.
[67] Орбита МКС регулярно корректируется; каждая коррекция требует точности, но в целом это рутинные операции, проводимые несколько раз в год. Например, после

коррекции 20 мая 2021 г. минимальная и максимальная высота над поверхностью Земли стали равными 417,66 и 438,13 км, а средняя высота орбиты станции увеличилась на 350 м. Для этого потребовалось включение двигателя пристыкованного «Прогресса» на 180,7 с, сообщившее станции прибавку в скорости $\Delta v$ величиной 0,2 м/с. (Наклонение орбиты МКС, кстати, составляет 51,66°.)
[68] А как же резонанс, *спасающий*, скажем, Нептун и Плутон? Или орбиту TESS? Все дело в угловой синхронизации. На своей сильно вытянутой орбите с резонансом 2 : 1 TESS — *единственный* спутник, специальным образом синхронизированный с Луной. Когда спутник дальше всего от Земли (и ближе всего к орбите Луны), Луна опережает его или отстает от него на 90°. Пусть, для определенности, опережает; тогда, пройдя половину своей орбиты за то же время, что Луна пройдет четверть своей, спутник будет как раз «обгонять» Луну, но окажется при этом в точке своего наибольшего приближения к Земле и дальше всего от лунной орбиты. Когда он снова доберется до точки максимального удаления от Земли, Луна будет уже отставать от него на 90°. Из-за такой синхронизации влияние Луны не разрушительно, но при попытке летать по той же орбите с другой угловой синхронизацией с Луной TESS не просуществовал бы долго. То же самое верно и для Нептуна с Плутоном: «мир» между ними зависит от того, где на орбите происходят обгоны. Если по резонансной орбите распределить много спутников или астероидов, то сохранятся лишь немногие — те, которые окажутся близки к правильной синхронизации по углу.
[69] Системы, где малые изменения на входе приводят с течением времени не к умеренным изменениям их состояния, а к радикальной, качественной смене картины, называются неустойчивыми. Это несколько более общее понятие, чем неустойчивость, с которой мы встречались в главе «прогулка 2», но слово все равно кажется подходящим; с течением времени состояние системы склонно радикально измениться «из-за любой ерунды».

[70] Технически: сохраняющийся полный момент количества движения.
[71] Мы встречались с экзопланетами на предыдущих прогулках. Больше всего экзопланет открывают по ослаблению света из-за прохождения планеты через диск звезды, на втором месте — измерение скорости звезды вдоль луча зрения.
[72] В (выборочном) списке таких планет, обращающихся вокруг одной из звезд в двойной системе — Kepler-693, Kepler-420, HD 59686, OGLE-2013-BLG-0341, HD7449, HD87646, HD 41004A, Gliese 86, HD 196885, HD 164509, K2–136, WASP-11, OGLE-2008-BLG-092L [см. № 72 в списке литературы]. Размеры орбит (большие полуоси) звезды-компаньона и планеты относятся, в том же порядке, как 26, 14, 12, 22, 21, 163, 12, 192, 8, 42, 335, 1060, 3. Малые числа, особенно последнее, вселяют тревогу за судьбу планеты из-за развития неустойчивости.
[73] Альфа Центавра — это вариант: *если* одна из звезд A или B имеет свои планеты, то картина закатов и восходов там должна быть поистине впечатляющей из-за тесного сближения звезд. Проксима же от них так далека, что не только не вносит никакого вклада в освещенность, но и разглядеть ее оттуда невооруженным глазом непросто. Зато у самой Проксимы нашлась планета, несильно превосходящая Землю по размеру, и на таком расстоянии от звезды, что там возможна жидкая вода. Но при этом она в 30 раз ближе к своей звезде, чем Земля к Солнцу, и оборачивается вокруг нее за 11 с небольшим земных суток. Весьма вероятно, что на таком близком расстоянии планета гравитационно («приливно») захвачена своей звездой, а это считается не очень хорошей новостью для возможной жизни.
[74] Сам закон тяготения Ньютона — не точный закон природы, как мы уже упоминали и как еще увидим на последующих прогулках. В тех случаях, когда он оказывается лишь «слегка» неточным (как, например, при вычислении орбиты Меркурия), его точность можно повысить, также добавляя определенные поправки. Эти последние имеют фундаментальную природу, поскольку

отражают правила, по которым работает гравитация. Везде на этой прогулке речь идет о других поправках: к закону тяготения Ньютона мы относимся как к точному (потому что его точности нам достаточно), а поправки отражают распределение масс в конкретной планете.

[75] Например, выбрав для буквы *t* значение 25° и переведя его в радианы перед подстановкой в формулу, получаем расхождение в *двенадцатом* знаке после запятой. Но для угла 115° расхождение наступает уже в пятом знаке, а после 200° начинает резко нарастать. (Но, правда, это только первые пять слагаемых.)

[76] Эх, как бы отнесся к этому Ньютон?! Ведь он, собственно, и изобрел идею представления решений в виде подобных «бесконечных сумм», и успешно ее использовал в разнообразных задачах.

[77] Умирая, назгул был, видимо, немало удивлен. Удивление теорией относительности, в которой зафиксированы «неожиданные» свойства скорости света, тоже некогда имело место; сейчас, впрочем, уже не та героическая эпоха.

[78] Намного более мощными, чем электрические (и в несравненной степени — чем гравитационные, о которых мы в основном говорили до сих пор). Задача «получения золота из свинца» химическими методами неразрешима именно потому, что химические связи — электромагнитные в своей основе, а атомные ядра, определяющие «личности» элементов, находятся в ведении ядерных сил.

[79] Употребление слова «наблюдатель» здесь и далее не имеет никакого отношения к человеку, мышлению, сознанию или чему бы то ни было его заменяющему. Правильнее было бы говорить «система отсчета»; обычно так и говорят, но я останусь с «наблюдателями». Для повышения драматизма я иногда ставлю на место наблюдателя себя или обращаюсь с этим предложением к своим спутникам по прогулкам. Основное, что нужно знать тем, кто на это соглашается, — это что каждый наблюдатель, как правило, считает себя неподвижным и, разумеется, измеряет скорости, энергии и все остальное относительно себя. Отсюда и вопрос о том, как же согласуются картины мира разных наблюдателей.

[80] *Относительно чего* равномерно и прямолинейно? Короткий ответ: относительно других наблюдателей, движущихся равномерно и прямолинейно, но это звучит странно, потому что выражает непонятное через то же самое. Чтобы сделать высказывание содержательным, к нему надо добавить ключевое заявление, что *существует* специальный класс наблюдателей. Буквально на несколько строк я перестану говорить «наблюдатель», а вместо этого буду, как это и полагается по правилам, говорить «система отсчета». Тогда ко второму из приведенных пунктов надо добавить утверждение, что *существует* такой класс систем отсчета (каждая из которых движется относительно всех других равномерно и прямолинейно), что в них все происходит так, как в этом пункте и сказано. Весь этот бесконечный класс систем отсчета называют инерциальными. Охват всех других видов движения потребовал обобщения, неоригинально названного «*общая* теория относительности»; она стоит в плане на следующую прогулку.

[81] И что-то еще, обсуждение чего приходится отложить до прогулки 7, чтобы сейчас не отвлекаться.

[82] Это рассуждение надо, строго говоря, сопроводить дополнительным аргументом о том, что расстояния в направлении, перпендикулярном скорости, одинаковы для наблюдателя на тротуаре и велосипедиста; это тоже быстро следует из принципа относительности, но мы не будем перегружать изложение.

[83] Совсем другое дело — эффект *конечности* скорости света, из-за которого возникает задержка сигнала при радиообмене: примерно 384 000 км от Земли до Луны радиосигнал, как и свет, проходит чуть больше чем за секунду, и столько же требуется на ответ. «Вояджер-1» покидает Солнечную систему со скоростью более 62 000 км/ч относительно Солнца, так что в его гамма-факторе 1,0000000165 забор из нулей оказывается на один нуль короче, но эффект все равно ничтожный — зато «Вояджер» наконец улетел далеко, более чем на 22 млрд километров, и радиосигнал путешествует в одну сторону более 20 часов!

[84] При этом подержать в руках «чистую энергию» нельзя: у нее всегда есть какой-то носитель (например, электромагнитная волна); да и сказать, что же такое энергия вообще, — задача не из простых. Соображения по этому поводу приведены в приложении Б, но и там не стоит искать однозначного определения.
[85] Разгон в ускорителе происходит за счет электрического поля, на которое протон реагирует потому, что несет положительный электрический заряд; при этом движение по кольцу ускорителя обеспечивается магнитным полем, которое отклоняет движущиеся электрические заряды. Технических тонкостей в этой схеме очень много.
[86] ГИБДД будущего, в сотрудничестве с Министерством финансов, вполне могла бы позаимствовать у природы способ введения предельной скорости (заодно объединив его с транспортным налогом): не взимать штраф за превышение постфактум, а сделать само приближение к пределу вопросом бюджета, только не энергетического, а самого настоящего. При таком профилактическом подходе со счета владельца транспортного средства в реальном времени по мере приближения к заявленной предельной скорости списывалась бы все большая сумма. Одним словом, ГИБДД могла бы разработать свой собственный гамма-фактор, только денежный.
[87] Замедление света в среде (с применением современных технологий до буквально черепашьих скоростей) — это коллективный эффект в физике конденсированного состояния. Оно решительно никак не противоречит обсуждаемому здесь поведению света в пустоте.
[88] Мы видели, чему скорость света равна в километрах в секунду; а число секунд в году для этих целей принимается равным 31 557 600; получается, что световой год — это довольно много километров, без малого 9,5 триллиона: 299 792,458 км/с × 31 557 600 с = $9{,}46073 \times 10^{12}$ км.
[89] В действительности требуется даже значительно больше энергии, потому что, во-первых, бозон Хиггса рождается после возникновения и взаимодействия друг с другом некоторых промежуточных элементарных частиц, а во-

вторых, и эти последние появляются как результат взаимодействия составных частей протона — кварков, а контроля за тем, как именно перераспределится энергия сталкивающихся протонов между составляющими их кварками, нет. В итоге энергия, которая «идет в дело» (на производство бозона Хиггса), — это далеко не вся энергия движения сталкивающихся протонов.

[90] «По́езда Эйнште́йна», как его иногда называют.

[91] Некто отправляется в прошлое и — в несмягченном варианте истории — убивает свою бабушку до того, как она познакомилась с дедушкой; в вариантах, включающих «6+», — мешает им встретиться.

[92] Здесь подразумевается цепочка рассуждений, наметить которую сейчас можно только минимальным образом (уточнения появятся на более поздних прогулках, хоть и не в связи с тахионами). Элементарные частицы — это возбуждения полей над некоторым состоянием с минимальной энергией, называемым вакуумом. Перестройка вакуума меняет и характер возбуждений, которые «над ним» могут происходить. Предполагается, что за счет разбалансированного обмена энергией тахионы должны истребить сами себя, вызвав перестройку вакуума, после которой их (тахионов) уже нет.

[93] Не обнаружены. С тех пор измерения скоростей вдоль луча зрения несколько сузили возможности для существования планет у Тау Кита: там нет, в частности, горячих юпитеров. Впрочем, оптимистичная интерпретация этого примерно такова: «Если бы горячие юпитеры там были, они вносили бы сильные возмущения в орбиты возможных планет земного типа; тем лучше, что их нет». Определенно установлено, что вокруг этой звезды много пыли. После 2012 г. начали появляться свидетельства о возможном существовании там планет с массами в несколько масс Земли. Прояснение картины — числа планет, их масс и возможности их нахождения в зоне, пригодной для жизни, — требует определения лучевых скоростей с точностью до 10 сантиметров в секунду.

[94] См. главу «прогулка 4». Термин, заимствованный из «Звездных войн», можно встретить в научных статьях; более распространенное английское определение, *circumbinary*, имеет в качестве перевода «обращающийся вокруг двойной звезды», что, конечно, дает веский аргумент в пользу «татуина».
[95] Я подозреваю, что даже предположение о 50-процентной эффективности процесса по степени своей реалистичности сравнимо с идеей о «баке антивещества», но останемся пока и с тем и с другим; по крайней мере, они показывают границу возможного.
[96] Аналогии тем и опасны, что попытка их продолжения все дальше и дальше приводит ко все более абсурдному описанию; солнце у наших существ должно, видимо, постоянно находиться в зените, иначе по изменяющейся тени они заподозрят что-то про возможные наклоны.
[97] Слабо — в смысле бесстрастных наблюдений за окружающей Вселенной, а не в отношении других переживаний выброшенного за борт космонавта, отстающего от ракеты с ускорением полтора $g$.
[98] Серьезные эксперименты готовят заранее. Года за два до запуска надо было озаботиться синхронизацией часов между космодромом и пунктом, где расположена лампа, а потом отправить указания, при каком показании часов включать двигатель и лампу.
[99] Дополнительная деталь здесь в том, что земное и небесное управляются, оказывается, одним законом — не самая ординарная идея для времени, когда способов оторваться от поверхности Земли вообще не предвиделось.
[100] Ваш *вес* — скажем, показания напольных весов — определяется вашей массой и тем, насколько сильное притяжение вы испытываете: стоя на поверхности Луны, вы будете весить в шесть раз, а на поверхности Марса в 2,6 раза меньше, чем на Земле (притом что ваша *масса*, разумеется, останется той же самой). Но для того чтобы сенсор в весах почувствовал воздействие, требуется что-то еще, кроме силы тяжести: весы должны во что-то упираться тем или иным образом. Если бы меня взяли в космонавты и я попытался бы

при старте встать на весы, то они показали бы вес раза в четыре больше обычного, потому что в данном случае весы «упираются» слишком сильно, а точнее, их толкает работающий двигатель. В падающем же свободно лифте или, что то же самое, в космическом корабле на орбите упираться совершенно не во что и вес равен нулю.

[101] В 2017 г. французский спутник Microscope определил совпадение массы, отвечающей за инерцию, и массы, отвечающей за гравитацию, с точностью $10^{-15}$ (одна миллионная от одной миллиардной). Спутник летал по почти круговой орбите на высоте около 712 км, и эксперименты на его борту требовали учета «всего известного» об орбитальном движении: трения о (практически незаметные) остатки атмосферы, давления солнечного света и влияния магнитного поля Земли, а также детального анализа притяжения со стороны трех тел — Земли, Луны и Солнца.

[102] Здесь есть место для небольшой словесной путаницы. «Плоский» в данном случае означает «не искривленный», а вовсе *не* «двумерный, как лист бумаги». На этой и следующей прогулке мы говорим о трехмерном пространстве и четырехмерном пространстве-времени, не имея в виду ничего двумерного. Но дополнительный источник путаницы возникает из-за того, что представить себе четырехмерие (хоть искривленное, хоть плоское) едва ли возможно, и приходится прибегать к двумерным аналогиям: например, сфера *не* плоская (искривленная), а лист бумаги, да, плоский (неискривленный) — и ненужная ассоциация «плоский значит двумерный» возникает снова. Итак: «плоская геометрия» значит неискривленная.

[103] На своем северном маршруте Транссибирская магистраль имеет *станции* Москва-Пассажирская-Ярославская, Ярославль-Главный, Данилов, Буй, Шарья, Киров, Балезино, Верещагино, Пермь-2, Кунгур, Первоуральск, Екатеринбург-Пассажирский, Тюмень, Называевская, Омск-Пассажирский, Барабинск, Новосибирск-Главный, Юрга I, Тайга, Анжерская, Мариинск, Боготол, Ачинск-1, Красноярск-Пассажирский, Канск-Енисейский, Иланская, Тайшет, Нижнеудинск, Зима,

Иркутск-Пассажирский, Слюдянка-1, Улан-Удэ, Петровский Завод, Чита-2, Карымская, Чернышевск-Забайкальский, Могоча, Сковородино, Белогорск, Архара, Биробиджан-1, Хабаровск-1, Вяземская, Ружино, Уссурийск, Владивосток.

[104] Стрелок, как те, что изображены на рис. 6.6, должно быть «очень много», что, конечно, подразумевает математическое описание соответствия между приграничными областями на двух картах.

[105] Одноименный фантастический роман Грега Игана назван по этой математической процедуре, а не наоборот.

[106] Вот подробности. Тот наблюдатель, в чью зону ответственности попадает точка $A_0$, бросает из нее камень вдоль заданного направления и дает камню свободно пролететь до какой-то не слишком далекой точки $X_0$. Затем он выбирает «следующую», не слишком далекую, точку на кривой ($A_1$ на рис. 6.11 в центре) и проводит геодезическую между ней и точкой $X_0$, что означает бросание предмета так, чтобы он свободно падал из $X_0$ в $A_1$; на этот раз предмет — часы! Требуется узнать время, которое по ним пройдет, пока они путешествуют, поделить его пополам и вспомнить, где были часы в этот половинный момент. Так возникает «средняя» точка $P_1$. Теперь надо бросить еще одни часы по геодезической из $A_0$ в $P_1$, засечь время, которое они покажут, долетев до $P_1$, а потом, не трогая их, оставить их свободно летящими еще столько же времени по их собственным показаниям. Точка $X_1$, где они в результате окажутся, — это завершение работы первого наблюдателя. Он передает следующему наблюдателю точку $A_1$ и направление, под которым из нее выходит геодезическая, ведущая в $X_1$. *Это и есть искомый параллельный перенос* исходно заданного направления (рис. 6.11 справа). В точке $A_1$ в дело вступает следующий наблюдатель и так далее.

[107] Мы говорим «геометрия», а из-за угла вдруг появляются уравнения?! Да, геометрия — это почти всегда уравнения, но только такие, которые возникают как продолжение слов с геометрической начинкой (параллельный перенос; кривизна и т.д.). Уравнения, собственно, и придают этим словам точный смысл.

[108] Правильное название — «момент количества движения». Оно/он вычисляется как произведение радиуса (расстояния от оси вращения) на количество движения, перпендикулярное радиусу. Смысл этого произведения в том, что вклад вносят и скорость, и масса, и радиус — все то, из-за чего в обычной жизни трудно остановить массивный раскрученный маховик.
[109] Эффекты полноценной эйнштейновской гравитации решительно *не* сводятся к одному слагаемому в дополнение к Ньютонову закону для силы притяжения, но в данном случае это так из-за принятого условия, что кривизна (а потому и притяжение) не зависит от направления из центра и, кроме того, не зависит от времени. Слагаемое, зависящее от расстояния как обратная четвертая степень, убывает по мере удаления от центра быстрее, чем Ньютонов обратный квадрат, поэтому на достаточно больших расстояниях все происходит практически по Ньютону. Кроме того, это слагаемое, которым, в частности, можно объяснить поворот орбиты Меркурия, содержит в качестве множителя скорость гайки в квадрате, деленную на скорость света в квадрате, из-за чего оно крайне мало при небыстрых движениях.
[110] Не совсем. Во-первых, полностью обесценился бы Новый год как праздник. Во-вторых, Земля была бы в опасной близости к разрыву приливными силами.
[111] Помещение тела на неустойчивую круговую орбиту требует большей энергии, чем на устойчивую, и эта разница в энергии тем значительнее, чем больше выбранное количество вращения.
[112] Наблюдение гравитационного линзирования — один из действенных способов получать информацию о скоплениях темной материи. Она выдает себя тем, что создает кривизну, которая определяет световые геодезические, а мы в результате наблюдаем свет, «заворачивающий» по дороге от источника к нам.
[113] Круговых орбит такого радиуса для света много, ведь кривизна в рассматриваемом нами случае одинакова по всем направлениям (нет никакого выделенного «экватора»). Значит, по сфере этого радиуса свет бегает по разным

большим окружностям в зависимости от направления своего прибытия.

[114] «Событий» добавляют все реже; впрочем, проект, в рамках которого создано изображение, приведенное на рис. 3.13, называется EHT — Event Horizon Telescope, «Телескоп горизонта событий».

[115] Варианты образования реальных (как говорят, астрофизических) черных дыр во Вселенной — это интересная и разветвленная тема, в которую мы не можем здесь углубляться.

[116] Участие времени в этом определении означает, что выйти наружу нельзя *никогда* в будущем, что, вообще-то, требует знания всего этого будущего. В искривленном пространстве-времени разделение на абсолютное прошлое, абсолютное будущее и безразличное может оказаться более сложным, чем мы это видели на прогулке 5: то, что попало за горизонт, уже не находится в абсолютном прошлом ни для каких событий снаружи горизонта, которые могут случиться в будущем, даже сколь угодно отдаленном; это, кстати, другой способ сказать, что попавшее под горизонт никогда не сможет повлиять ни на что «здесь у нас».

[117] Для определения местоположения приемник получает от нескольких спутников сигналы с указанием времени их отправки; кроме того, раз в несколько дней передается и информация о координатах спутников — в виде «альманаха», содержащего в себе расписание их движения. Приемник, сравнив время получения и отправки сигналов, умножает разности времен на скорость света и таким образом узнает расстояния до спутников. Их положения известны, и из трех расстояний, решая простые уравнения, можно найти три координаты самого приемника (скажем, широту, долготу и высоту над уровнем моря). Правда, при отсутствии в приемнике высокоточных (атомных) часов время определяется с недостаточной точностью, а ошибка в одну микросекунду приводит к характерной неточности положения около 300 м. Проблема решается получением сигнала с четвертого спутника: из четырех времен

распространения сигнала можно найти заодно и точное время на приемнике.

[118] Из-за множителя 2/3 может показаться, что падающий предмет пролетит, скажем, 90 км за 60 км времени, что означало бы движение быстрее света. Это не так, потому что координата вдоль радиуса здесь относится к картине мира удаленного наблюдателя, а она не выражает напрямую расстояния вдоль радиуса, которые измеряют падающие наблюдатели. Соответствующие преобразования между различными картинами мира «восстанавливают порядок»: все тела, пролетающие вблизи любого наблюдателя, имеют, с его точки зрения, досветовые скорости.

[119] Удаленные наблюдатели, бросившие предмет по радиусу в черную дыру, сначала, конечно, видят, что предмет ускоряется в своем падении, но, достигнув неслучайного расстояния $r_{\text{БУКО}}$ от центра, он начинает (быстро) тормозить и практически замирает.

[120] При должном упорстве и здесь удается разобраться, хотя бы частично. Орбиты делятся на два класса в зависимости от того, вращаются ли тело и сама черная дыра в одном и том же или в противоположных направлениях (это если не считать полярных орбит, с которыми всегда получается отдельная история). Когда орбиты спроектированы на плоскость экватора, они демонстрируют те же картины «лепесток-намотка», что и для невращающейся черной дыры, но, конечно, надо дополнительно выяснять, как по мере прохождения лепестков и намоток тело поднимается над экватором и опускается под него. Все это определенным образом зависит от количества вращения самой черной дыры, что добавляет разнообразия. Собственно экваториальные орбиты сохраняют многое от невращающихся черных дыр, хотя некоторые эффекты «раздваиваются»: например, при заданном количестве вращения самой черной дыры имеются две БУКО с заметно различающимися радиусами — для тел, вращающихся по направлению и против направления вращения черной дыры.

[121] Мне известна единственная работа, в которой говорится о существовании устойчивых(!) орбит для «планет» внутри внутреннего горизонта вращающейся черной дыры [см. № 62 в списке литературы]. По-видимому, это математическая идеализация, а в реальных черных дырах окрестности внутреннего горизонта — область неустойчивости из-за того, сколь большую энергию приобретает все, что туда упало, включая свет, и об устойчивости орбит там едва ли можно говорить.
[122] «Большое спасибо! И напоследок скажите, пожалуйста, сколько всего законов, развивая ваш успех с первыми тремя, вы планируете сформулировать?»
[123] Практичность забора, доски которого уложены в том же направлении, в каком мы обходим «участок», можно поставить под сомнение, но математике — как и гравитационному полю — до этого дела нет; да и мы сейчас забавляемся с правилом параллельного переноса, а не зарабатываем постройкой заборов.
[124] Снова по числу измерений пространства-времени. Не все они независимы, если доску требуется только *поворачивать*, но не растягивать, и это одна из причин, почему не все числа, попадающие в таблицу кривизны, независимы.
[125] Так *никто* не делает. Я хотел выразиться как можно менее математично даже по форме, но есть риск, что некоторые теперь откажутся пожимать мне руку.
[126] Да-да, Пифагора Самосского (ум. ок. 490 г. до н.э.). Правда, если бы он мог проследить за следующим шагом в развитии всей истории, он узнал бы немало нового.
[127] А остальные нули в таблице говорят, что больше ничего делать не надо. Но погодите немного!
[128] Время надо сейчас измерять в километрах, или в метрах, или в микронах — одним словом, так же, как и расстояния; см. главу «прогулка 5».
[129] Пер. Н. Я. Смородинской.
[130] На поверхности Солнца — уже не миллиардные доли, а четыре с небольшим миллионных (–0,999996 вместо –1); слабая гравитация, как и было сказано. По мере удаления от

поверхности отличия указанных двух чисел от единицы и минус единицы, и так небольшие, становятся все меньше. Именно *разность* между такими числами у поверхности Земли и на высоте около 19 000 км над поверхностью требуется учитывать в спутниках глобальной системы навигации.

[131] Эвклид жил и работал (в основном в Александрии) лет на 250 позже Пифагора. В течение последующих столетий его «Начала» (или «Элементы»), с непрекращающимися методико-педагогическими усовершенствованиями, изучают в школах в качестве геометрии. Неевклидовы геометрии появились у Бойяи и Лобачевского (и Гаусса); самый общий взгляд на геометрию, который и оказался позднее востребованным для описания гравитации, восходит к великому докладу Римана «О гипотезах, лежащих в основании геометрии» (Über die Hypothesen, welche der Geometrie zu Grunde liegen, 1854).

[132] Важное умение найти все расстояния требует серьезных знаний, а геодезия — деятельность намного более древняя, чем наука о геодезических. Гаусс одно время курировал геодезическую съемку в Ганноверском королевстве, что *могло* побудить его задуматься о внутренних способах описания геометрии; кроме того, геодезические работы тогда хорошо финансировались. Гаусс присутствовал на знаменитом докладе Римана в 1854 г., где такой способ описания геометрии был представлен; после смерти Гаусса Риман занял его профессорскую кафедру.

[133] За пределами этой прогулки вас поймут скорее, если вы будете говорить «тензор энергии-импульса».

[134] Если соседняя точка — следующий момент времени, то это буквально скорость изменения; но если соседняя точка получена маленьким сдвигом в «ширину», «глубину» или «высоту», то это не скорости, потому что в их определении участвует не время, а пространство; обиходного названия для такого я не знаю.

[135] Вот этот славный рецепт в его самой ударной части. Мы имеем «таблицу таблиц» — сейчас удобно называть ее таблицей блоков — и хотим сделать из нее новую просто-

таблицу. Чтобы узнать, что мы поместим в этой новой таблице на пересечении, скажем, второго столбца и третьей строки, мы смотрим в таблице блоков на вторую строку *блоков*, а там, внутри нее, на третью *просто*-строку. На рис. 7.5 на этой третьей строке во второй блочной строке, кроме нулей, живут *Б, Г, —Е, —И, —Р, Т, —К, —С, Ф*. Их — все, что мы найдем, следуя рецепту «строка блоков и в ней просто-строка», — надо *сложить*, но только предварительно умножив каждый элемент на некоторую вспомогательную конструкцию из *абвгдежзик*, содержащую знание о том, в каком блочном столбце и в каком, внутри него, просто-столбце жил каждый из встреченных персонажей. Аналогичным образом заполняем всю новую таблицу 4 × 4.

[136] А входящая в них Специальная упаковка кривизны — тензором Эйнштейна.

[137] Термин «холодная» в отношении обычной материи вовсе не исключает звезды, а выражает именно тот факт, что «среда», заполняющая Вселенную, обладает пренебрежимым давлением. К слову, для «сред», обладающих давлением, по-английски часто используют слово *fluids*, которое обычно — не в применении к «заполнению» Вселенной — переводится на русский как «жидкости» или изредка «газы». К всплывающим время от времени в неспециализированных СМИ сообщениям типа «ученые установили, что Вселенная заполнена жидкостью» стоит относиться с пониманием: пишущие так невольно подставляют вместо узкого научного значения слова его общеупотребительное значение, к тому же в несколько буквалистском переводе.

[138] Сейчас мы знаем это, например, из анализа реликтового излучения, но в то время, когда предположения об «одинаковости» Вселенной делал Эйнштейн, наблюдательных оснований для них было немного и они скорее составляли часть философского убеждения.

[139] Само время выбирается таким образом, чтобы в каждой «типичной галактике» оно шло так же, как на часах живущих там наблюдателей. Технически это отражается в присутствии минус единицы, как будто заимствованной из плоского

пространства-времени, а не какой-то новой буквы на ее месте.
[140] Мегапарсек — это $3{,}086 \times 10^{19}$ км. Поэтому постоянная Хаббла равна $\frac{70\ \text{км/с}}{3{,}086 \times 10^{19}\ \text{км}}$, где мы можем, конечно, сократить километры, что дает $\frac{70}{3{,}086} \times 10^{-19} \frac{1}{\text{с}}$, или $\frac{70 \times 31536000}{3{,}086} \times 10^{-19} \frac{1}{\text{год}}$, где новый множитель — число секунд в году, принятое для подобных расчетов. Перемножаем и получаем указанное значение.
[141] Словосочетание *big bang*, когда оно было впервые, причем устно, использовано сэром Фредом Хойлом, носило пренебрежительный оттенок. Звучало это примерно так: «И что же, у вас там был большой бах?» Хойлу — известному и влиятельному астроному — не нравилась эта идея.
[142] *Много* меньше, если пытаться поддерживать относительное соответствие масштабов с настоящей Вселенной. *Микрон* просто звучит выразительно, но является колоссальным завышением размера моей «вселенной от А до Я» в момент ее Большого взрыва.
[143] Этот момент в биографии нашей Вселенной, когда она была плотной, горячей и уже «разлеталась в стороны» в соответствии с тем, как росло со временем значение буквы *a*, оставил наблюдаемые следы в космосе. Их несколько, и они хорошо согласуются друг с другом, поэтому статус Большого взрыва как стадии плотной, горячей, расширяющейся Вселенной, несмотря на отдаленность от нас во времени, близок к экспериментальному факту.
[144] Прошло 217 лет от построения Галлея, выполненного на бумаге, до появления расширяющейся вселенной на бумаге и 171 год от возвращения кометы до экспериментального открытия расширения Вселенной. В вычислительном плане, когда все уравнения уже придуманы, определить поведение Вселенной даже проще, чем определить траекторию кометы.
[145] «Расширяется ускоренно», как часто говорят. Это явление называют еще космологическим ускорением, а *совсем* на жаргоне можно иногда услышать, что «Вселенная ускоряется» — что довольно смешно в сравнении, скажем, с ускоряющимся автомобилем.

[146] По выражению Уилера, «называть его величайшим логиком со времен Аристотеля — значит недооценивать его истинный масштаб». Сказано это было в Принстоне, где Гёдель жил с 1940 г. В связи с появлением на прогулке 6 Транссибирской магистрали стоит заметить, что Гёдель именно по ней выбрался из Австрии в США. В Принстоне он проводил немало времени в совместных прогулках с Эйнштейном. (Дирак, кстати, в 1929 г. вернулся по Транссибу в Европу после чтения лекций в Японии.)
[147] Хороший повод еще раз подчеркнуть, что антивещество имеет положительную, а не отрицательную плотность энергии и для ворп-драйва совершенно бесполезно.
[148] К началу 1916 г. по итогам наступления Германии совместно с Австро-Венгрией Россия перешла в оборону, потеряв Польшу, Западную Украину, часть Прибалтики и Западную Белоруссию и оставив Галицию. Шварцшильд вскоре вернулся на фронт, где весной у него развилось аутоиммунное заболевание, от которого он скончался в мае.
[149] Прояснить происходящее там может и по распространенному мнению даже должна теория квантовой гравитации, когда и если она появится. Слово «квантовый» употреблено потому, что на очень малых расстояниях уравнения Эйнштейна должны ломаться из-за вступления в действие законов квантового мира. Уравнения Эйнштейна никак не выражают знания о том, что мир в основе своей квантовый, и поэтому не могут оставаться верными там, где квантовые свойства должны играть существенную роль. Тем или иным способом материя, попавшая в черную дыру, не сосредоточена в одной математической точке, но достигается это за счет неизвестных нам законов. Не до конца ясно при этом, в какой степени такие законы могут повлиять на доступные нашему восприятию эффекты по эту сторону горизонта. Это еще одна причина живого интереса к деталям устройства реальных — как говорят, астрофизических — черных дыр.
[150] Воспринимать это стоит не как производство экзотической материи (столь потребной для ворп-драйвов), а как поведение обычной материи в экзотическом окружении.

[151] Удачливые тунеядцы без особого труда заберут все имевшееся количество вращения, а вот массы/энергии им удастся отобрать только часть — ту, которая в некотором роде была связана с вращением черной дыры, никак не больше $1-\frac{1}{\sqrt{2}}\approx 0{,}29$ее полной первоначальной энергии.
[152] Для вращающихся черных дыр размер горизонта зависит от степени их раскрученности, но «невращающаяся» оценка — неплохой ориентир: мы ошибаемся в сторону увеличения, но не сильнее, чем в два раза.
[153] Чтобы представить себе, что происходит сильно ближе к Стрельцу А* — скажем, на расстоянии, примерно равном радиусу земной орбиты, — подойдет придуманная черная дыра, которую мы на предыдущей прогулке поместили вместо Солнца, выбрав для нее массу в 5 млн солнечных масс. Масса реального объекта Стрелец А* примерно такая же, и, хотя придуманная черная дыра была невращающейся, она годится для оценок — пусть достаточно грубых, но вполне осмысленных. На прогулке 6 БУКО пролегала на расстоянии около трети радиуса земной орбиты, а на самой земной орбите год занимал три с половиной часа.
[154] Его изучают с помощью космических телескопов. Живой интерес среди прочего привлекают к себе поиски сигналов от *попадания падающего вещества в поверхность или, скорее, отсутствие таких сигналов* — необходимый признак, что в центре находится действительно черная дыра, а не *тело*.
[155] Гигантские черные дыры, которые занимаются всем этим, называются квазарами. По ним даже названа целая эпоха в жизни Вселенной, когда они массово «работали» в ядрах галактик: воздействуя излучением на газ в своих галактиках, они тем самым влияли на скорость и характер звездообразования в них.
[156] Идея разгонять «гайки» лазерным светом обсуждается для их отправки от нас к Альфе Центавра, «когда будут созданы необходимые технологии». Потренироваться сначала на дальних окрестностях Солнечной системы было бы очень логично.

[157] Измеряются добавки к расстоянию, которое прошел лазерный луч, многократно отражающийся между зеркалами.
[158] Закон обратных квадратов возникает как решение полученного уравнения в специальном случае точечных масс. Присутствующая в уравнениях
Эйнштейна *ньютонова* постоянная $G$, кстати, только и ждет этого момента, чтобы именно в таком качестве появиться в воспроизведенном законе Ньютона. Одновременно с этим несколько неожиданные 8π из уравнений Эйнштейна сокращают обратную степень того же множителя, появляющуюся по математическим причинам, когда закон Ньютона возникает как решение уравнения. Присутствие скорости света в комбинации $8\pi G/c^4$ в правой части уравнений Эйнштейна тоже имеет прозрачное объяснение, но в любом случае едва ли должно вызывать удивление под конец этой прогулки.
[159] Этот визит был возможен из-за того, что Нидерланды сохраняли нейтралитет в Первой мировой войне; Эйнштейн с 1914 г. был профессором в Берлинском университете им. Гумбольдта.
[160] Строго говоря, следует отдельно рассматривать световые геодезические: по ним нельзя отправить в путешествие часы, но для них тоже есть способ определить, продолжаются ли они.
[161] Bobrick A., Martire G. Introducing Physical Warp Drives. *Classical and Quantum Gravity* (2021), http://iopscience.iop.org/article/10.1088/1361–6382/abdf6e; [https://arxiv.org/abs/2102.06824]
[162] Партия в *по-настоящему идеальный* бильярд состояла бы из одного удара. Постепенно все шары приходили бы в движение, и некоторые с течением времени начинали бы проваливаться в лузы. Победителя можно было бы определять, например, по времени, в течение которого половина шаров исчезнет со стола.
[163] Из сценария документального сериала Би-би-си «Возвышение человечества» (The Ascent of Man, 1973), написанного Дж. Броновски. Оглядываясь назад, я бы не стал однозначно клеймить тогдашних скептиков как ретроградов.

Во-первых, наука вообще есть организованный скепсис, а спор был в своей основе научным (что не отменяет трагизма судьбы Больцмана). Во-вторых, в то же самое время в качестве неотъемлемой части картины мира предлагался и светоносный эфир — тоже ненаблюдаемый, но, как утверждалось, необходимый. От него не осталось и следа. Мах активно критиковал не только атомизм, но и идею абсолютного ньютонова пространства, которое тоже мыслилось многими как необходимая концепция, но исчезло при появлении теории относительности в 1905 г.

[164] Очень мало кто говорит, а еще меньше тех, кто пишет «брауновское». Работа Брауна, опубликованная в 1828 г., сообщает о «…наблюдениях с помощью микроскопа, сделанных в месяцы Июнь, Июль и Август 1827 года» — не самый плохой способ провести лето. Браун отмечает, что это явление было известно задолго до его собственных исследований, но сам он подошел к предмету максимально тщательно, обсудив заодно несколько возможных его причин.

[165] Можно попытаться представить себе, насколько сузились бы окрестности каждого из нас, если бы время на путешествие зависело от расстояния подобным образом. Пусть, скажем, первый километр вы преодолели за минуту: $s\,[\text{км}] = \sqrt{t\,[\text{мин}]}$. Плохая новость состоит в том, что на 10 километров у вас уйдет больше полутора часов, а на 100 — почти семь суток. Впрочем, не так легко вообразить себе причины, которые определяли бы такой характер движения. В реальности вариант случайного движения, хотя и не в точности броуновского, демонстрируют посетители торговых центров: если они не имеют цели как можно быстрее дойти от входа именно до магазина X, то они периодически попадают в «ловушки» магазинов, встречаемых по пути, и «топчутся» там некоторое время, из-за чего средняя скорость их продвижения невелика.

[166] Эйнштейн отдавал себе отчет, что если предсказания, сделанные им на основе модели случайных блужданий, не подтвердятся экспериментально, то всем идеям об атомно-молекулярном устройстве мира придется нелегко: «Появился

бы веский аргумент против молекулярно-кинетической концепции теплоты». Они подтвердились экспериментально несколько позднее, в 1908-м, и критики атомизма отступили. Но по злой иронии судьбы как раз тогда, когда наметился окончательный поворот в сторону атомизма и развитого Больцманом понимания законов движения молекул, сам Больцман чувствовал себя все более теснимым оппонентами, что в сочетании с другими факторами привело к его кончине (1906).

[167] Словом «диффузия» часто называют едва ли не всякое «случайное» распространение почти любой «субстанции» (вещества или даже идей) в среде. Та диффузия, которая есть вариант случайных блужданий, имеет вполне строгое определение, и в ее основе — *независимость* одних причин или воздействий (пинков) от других (предыдущих пинков).

[168] И в том и в другом случае речь идет о средней энергии движения, что в полтора раза отличается от наивного перевода кельвинов в энергетические единицы.

[169] Возможно, стоит сказать явно то, что подразумевается в большинстве случаев (за исключением очень специальных), когда говорят о температуре: это не свойство одной молекулы, у которой скорость и энергия движения есть, но температуры нет; это среднее по большому числу молекул, проявление их *массового* поведения. Есть и более технические условия, определяемые тем, что среднее сколько-нибудь информативно, только если спонтанные отклонения от него (флуктуации) не слишком велики.

[170] Еще для успеха всех подобных рассуждений требуется, чтобы внутреннее движение было *достаточно неистовым*: в частности, чтобы температура была не слишком маленькой. Комнатная температура, да и все зимние температуры в наших широтах в этом смысле прекрасно подходят.

[171] Например, три исхода А, Б, В могут иметь относительные вероятности 1, 2, 3. Чтобы сделать из них настоящие, надо сначала сложить 1 + 2 + 3 = 6, а потом поделить каждую относительную вероятность на эту шестерку. Получаем, что три исхода А, Б, В имеют вероятности 1/6, 2/6, 3/6 (т.е. 1/6, 1/3, 1/2).

[172] Если доступные значения энергии — только целые в каких-то единицах (скажем, …, 98, 99, 100, …), то нас и правда интересуют вероятности того, что взятая наугад молекула обладает одним из этих значений энергии. Но если значения энергии могут быть совершенно любыми, например 98,039502 или 98,03950199, то мы спрашиваем, с какой вероятностью энергия молекулы окажется в некотором *интервале*, скажем, от 98 до 99 или от 123 до 124 и т.д. (в рулетке, собственно говоря, шарик останавливается в пределах какого-то интервала, после чего объявляется целочисленная *метка*, обозначающая этот интервал). Когда что-то распределено непрерывно или почти непрерывно, всегда подразумевается подобный интервал или более строгое математическое оформление идеи вероятностей. Выразительный пример, как всегда, связан с деньгами: годовой доход какого-то одного домохозяйства может измеряться числом типа приведенного только что 98,039502, но довольно бессмысленно интересоваться, какая доля домохозяйств имеет в точности этот доход, потому что других таких почти наверняка не найдется. Зато вполне содержательны сведения о том, какое количество домохозяйств имеет доход от 80 до 85, какое — от 86 до 90 и т.д.
[173] Вообще-то известное нам из «обычного» опыта могло бы и не работать далеко за его границами, в мире молекул (не работает же это $mv^2/2$ для очень быстрого движения). Но здесь пока обошлось.
[174] А когда мы все-таки попытаемся в нее вникнуть, нам понадобится демон, но об этом чуть позже.
[175] Он известен под своим третьим именем (полное — Николя Леонар Сади Карно). Его отец Лазар Карно был инженером и математиком, создателем французской революционной армии, членом Конвента и Директории (именно он назначил Наполеона Бонапарта командующим армией в Италии), обладателем неофициального титула «организатор победы», а недолгое время — наполеоновским министром, причем даже два раза. Второй из них случился в период «Ста дней», из-за чего потом Карно-старший был

вынужден покинуть Францию, а служба его сына складывалась непросто. Сади Карно скончался от холеры в возрасте 36 лет (в 1832 г.); многие его бумаги были сожжены в качестве карантинной меры. Его племянник Карно, в честь дяди также получивший третье имя Сади, был президентом Французской республики с 1887 г. до своего убийства в 1894-м.

[176] Холодное тело — необходимая часть схемы. Газ нагревается, совершает работу, а затем возвращается в исходное состояние, чтобы начать цикл снова. Чтобы полезная работа действительно получилась, надо организовать дело так, чтобы расширение газа (когда он толкает поршень) происходило при более высокой температуре, чем сжатие газа (когда поршень, наоборот, вдавливают в газ внешней силой). Для уменьшения объема газа без повышения его температуры и требуется контакт с холодным телом.

[177] В качестве синонима Клаузиус использовал и Verwandlungsinhalt.

[178] Холодильник забирает тепло у продуктов и отдает его окружающему воздуху, но это не единственный результат: вы еще платите за электричество — за затраты *энергии*. И холодильник отдает воздуху существенно больше тепла, чем забирает его у продуктов.

[179] 0,693147... — натуральный логарифм числа 2.

[180] И вместо 0,693 *X* написано log *W*, что *намного* изящнее. Формула для энтропии появилась на надгробии в 1930-х гг.; иногда вспоминают, что на бумаге ее первым записал в таком виде не сам Больцман, а Планк около 1900 г., отдавая при этом приоритет работам Больцмана, опубликованным начиная с первой половины 1870-х. Больцман оборвал свою жизнь в конце лета 1906 г.

[181] Если приведенные числа не кажутся по-настоящему малыми, то это потому, что они еще не совсем вероятности, а только относительные вероятности. Сумма вероятностей по всем исходам должна быть равна единице, а поэтому надо дополнительно поделить на сумму аналогичных чисел по всем возможным исходам — включая те исходы, где

энтропия возрастает. Например, если среди исходов есть такие, где *X* увеличивается на 20, то дополнительно делить понадобится примерно на $2^{20}$ или несколько большее число, т.е. от каждого из умеренно небольших чисел взять миллионную долю или даже меньше. Это превращает приведенные умеренно небольшие числа в ничтожно малые вероятности.

[182] Джеймс Клерк Максвелл (1831–1879) — пожалуй, мой герой среди всех персонажей истории науки. Чтобы не увлечься и не уйти в сторону, я старался не упоминать его в нескольких местах, где это можно было бы сделать; я сдержался даже там, где речь шла о распределении молекул по скоростям (а оно называется распределением Максвелла). Но не сейчас.

[183] Это совсем другая штука, чем «вечный двигатель первого рода», который есть синоним нарушения закона сохранения энергии. Демон Максвелла прекрасно осведомлен о том, что он невозможен, и ничего подобного делать не собирается.

[184] Szilárd Leó: Силард, если читать по венгерским правилам, но в нашей литературе прочно укоренилось произношение Сцилард. Его родители вскоре после его рождения взяли в качестве фамилии относительно распространенное венгерское имя, заодно являющееся словом, которое означает «твердый» в том же смысле, в каком мы говорим о твердом состоянии вещества.

[185] Не стоит удивляться «внезапному» появлению темы компьютеров на этой прогулке, начавшейся совсем с другой истории. Демон, вознамерившийся победить энтропию, борется с незнанием: он приобретает и обрабатывает информацию. Компьютер же представляет собой устройство для обработки информации. Ну а тот факт, что дело дошло до энтропийной цены за обработку информации, — напоминание о том, что дьявол в деталях.

[186] Темой, которая исходно привлекла интерес Ландауэра, было создание мощных компьютеров, которые потребляли бы как можно меньше энергии. Компьютер, который стоит у меня на столе, колоссально далек от идеального предела по

рассеянию энергии (иначе он работал бы от батарей примерно вечность), но, как и в случае с рассуждениями Карно о тепловых машинах, принципиальная постановка вопроса позволяет продвинуться в понимании природы.

[187] Аспирант Уилера в это время.

[188] Для всех сколько-нибудь крупных черных дыр это излучение ничтожно слабо, но ценность его не в интенсивности, а в том, что это ключ к квантовым аспектам гравитации, о которых мы мало что знаем. Теоретическое (пока не подтвержденное) предсказание Хокинга сделано с учетом квантовых законов, по которым работает Вселенная; дополнительный азарт появляется здесь из-за того, что последовательное соединение квантовых законов и теории гравитации нам не дается. Тем не менее несколько различных рассуждений, проходящих буквально «по грани» в смысле соединения трудносоединимого, говорят нам, что такое излучение должно иметь место.

[189] С черной дырой Шварцшильда происходить может не слишком многое, и горизонт растет вместе с поглощаемой массой. Интереснее с вращающимися черными дырами. Форма их горизонта — не сферическая (см. рис. 6.29) и зависит от количества вращения самой черной дыры. Из эргосферы вращающейся черной дыры можно забрать часть вращения, унеся с собой энергию; горизонт при этом меняет свою форму. А можно и добавить вращения, бросая вещи под горизонт, и горизонт при этом тоже изменит свою форму. В результате любого из этих действий площадь горизонта упрямо растет. И при слиянии двух черных дыр площадь новообразовавшегося горизонта больше, чем суммарная площадь горизонтов до слияния.

[190] Словами Бекенстайна и Уилера, «у черной дыры нет волос» — фраза, которую Фейнман находил малоприличной, но которая в какой-то мере прижилась.

[191] За свои законы излучения, сформулированные в 1893–1896 гг., Вин стал лауреатом Нобелевской премии (1911). Очень хочется забежать вперед: эти законы уже содержали фундаментальную постоянную, которую на наших глазах вот-вот откроет Планк и которая, как мы теперь знаем,

представляет собой безошибочный указатель на квантовые эффекты. Но Вина никто не называет «отцом квантового мира», этот титул принадлежит Планку (Нобелевская премия 1918 г.).

[192] Излучение на определенной частоте — это одновременно излучение волн определенной длины. Частота и длина волны связаны однозначным образом, и в зависимости от обстоятельств удобно использовать одну или другую. Полезно помнить, что высокие частоты означают малые длины волн, а низкие частоты, наоборот, отвечают длинным волнам.

[193] Латинское *quantus* (м. р.), *quanta* (ж. р.), *quantum* (ср. р.) — вопросительное (недаром тут начальное *qu*) местоимение: насколько большой/-ая/-ое, насколько много, сколько (напр., *quantum satis* — «[столько,] сколько достаточно»). Сама по себе *буква h*, которая используется для постоянной Планка практически всегда, довольно невзрачна; выразительнее выглядит часто употребляемое обозначение $\hbar$ для величины $h/(2\pi)$; оно распространено достаточно широко для того, чтобы в ряде шрифтов имелся специальный символ. Я не знаю, когда дело дойдет до появления клавиши $\hbar$ на клавиатуре компьютера, но это, без сомнения, на некоторое время повысило бы интерес к фундаментальному устройству мира; в компьютерных играх она могла бы включать некий «квантовый режим».

[194] В 1911–1912 гг. были проведены даже два независимых исследования. Проверка достаточно абстрактной концепции переплелась здесь с жизненными реалиями. Автор одной из двух работ — 17-летний Хуго Тетроде, приходившийся сыном директору Национального банка Нидерландов. Ясность рассуждений, приведших его к ответу, такова, что его вывод продолжает воспроизводиться в большинстве курсов и сейчас. В дальнейшем он написал еще несколько научных статей, но не прилагал больших усилий для поддержания контакта с научным сообществом, вплоть до легендарного эпизода, когда Эйнштейн и Эренфест решили навестить его в Амстердаме, но служанка сказала, что хозяин никого не принимает. В возрасте 35 лет Тетроде умер от

туберкулеза. Параллельное исследование выполнил уже достаточно известный 31-летний Отто Саккур. С началом войны в 1914 г. он вместе с рядом известных ученых работал в Берлине под руководством Фрица Хабера (нобелевский лауреат по химии за 1918 г.) над разработкой отравляющих газов для применения на фронте и в конце 1914-го погиб при взрыве в лаборатории. Формула Тетроде — Саккура оказалась точнейшим способом определения энтропии одноатомных газов исходя из температуры, давления и атомного веса и применяется до сих пор.
[195] Она, между прочим, скрытым образом присутствовала в чудовищно малой Специальной площади при подсчете энтропии черных дыр, но в том обличье была перепутана с двумя другими мировыми постоянными. Чтобы освободить Специальную площадь от всего гравитационного, надо поделить ее на мировую постоянную $G$. То, что получится, надо освободить еще и от всей теории относительности, от закодированного там знания о скорости света $c$, дополнительно умножив на $c^3$ (именно в кубе; так *получается*). В результате возникает в точности постоянная Планка $h$.
[196] Затраты здесь — это *порции* (то, что вы тратите раз за разом), а Р[адость] — не порции, а текущее значение, свидетельствующее о вашем состоянии в каждый данный момент времени.
[197] Температура сама меняется в зависимости от всего происходящего, поэтому поделить «один раз» на температуру нельзя. Энтропия — это *не* отношение теплоты к температуре.
[198] Что еще через 35 лет привело и к «взрыву наружу», т.е. к настоящему взрыву, энергия которого черпалась из недр этих новых освоенных масштабов.
[199] Если представить себе, что употребление слова «квант» по каким-то причинам попало под запрет, квантовую механику можно было бы называть порционной механикой; это не значит, впрочем, что *всё* в ней разбито на порции.

[200] Необходимо прибавлять «джей-джей», чтобы не путать сэра Джозефа Джона Томсона с Уильямом Томсоном, в равной мере известным как лорд Кельвин.
[201] А энергия, которой занимается авторитетное агентство, — ядерная, так что она вся сидит в той одной триллионной части атома, к которой электроны вообще не имеют отношения.
[202] Похожая буква — дьжервь, ђ — присутствует в сербском алфавите (где она шестая по счету) и тоже является изобретением одного человека (Лукиан Мушицкий, первая половина XIX в.); в заглавном варианте Ђ просматривается сходство с буквой ять. Фамилии типа Павич так и пишутся: Павиђ. Близкое начертание имеет и буква в алфавите мальтийского языка (единственного семитского языка среди официальных языков Евросоюза), где она изображает фарингальный согласный «х».
[203] Это важное обстоятельство: предсказания любой новой теории должны переходить в предсказания «старой» теории в тех областях, где последняя хорошо работает. Специальная теория относительности, например, превращается в ньютонову механику при скоростях, много меньших скорости света. Для квантовой механики аналогичный *принцип соответствия* соблюдается, когда некоторые величины — обсуждаемые чуть ниже — много больше постоянной Планка.
[204] Я продолжаю для краткости называть так момент количества движения.
[205] Как мы помним из прогулки 9, не все участники теплового движения имеют одну и ту же энергию движения, поэтому некоторая «недостача» в средней энергии сама по себе не фатальна, если найдется достаточное число протонов, обладающих требуемой более высокой энергией. Но в данном случае разница между имеющейся и требуемой энергиями столь велика, что этих «особо быстрых» протонов просто нет.
[206] В первую очередь между электронами, потому что ядра сидят глубоко внутри атомов, но идея тут та же, и силы тоже

электромагнитные; даже принцип запрета — забегая вперед — действует в обоих случаях.

[207] Прочность выражается в сравнительно большой энергии, которую требуется затратить, чтобы разобрать альфа-частицу на части; это значит, что при образовании альфа-частицы такая же энергия выделяется и может добавиться к энергии движения самой альфа-частицы, что улучшает ее стартовые условия для туннелирования.

[208] Шрёдингер сначала хотел записать уравнение, которое сразу учитывало бы специальную теорию относительности, но столкнулся с серьезными трудностями и оставил это намерение. Получилось все равно здорово.

[209] Есть, правда, и распространенный пример вполне обычного явления, которое может происходить только в дискретном наборе случаев: колебания (идеально) упругой струны, оба конца которой закреплены. Частоты этих колебаний могут иметь лишь дискретные значения, кратные основной частоте. Здесь стоит, пожалуй, подчеркнуть пространственную протяженность системы, в которой это происходит.

[210] И это фантастически точный определитель состава вещества практически по всей Вселенной. По набору *линий излучения* мы частично восстанавливаем подходящий список энергий и узнаем, какие атомы имелись там, откуда свет пришел; а по линиям поглощения — через что свет прошел по дороге. У атома каждого элемента свой список разрешенных энергий, но для всех атомов данного элемента, находящихся в одних и тех же условиях, список строго один и тот же.

[211] Далекие края ямы, где притяжение уже практически не ощущается, отвечают нулевой энергии, а находиться глубже в яме означает иметь меньшую энергию, т.е. меньше нуля.

[212] Rydberg: вторая буква обозначает звук, средний между «у» и «и», который трудно дается нешведам. Если в общей формуле выбрать число *k* равным не 2, как в серии Бальмера, а чему-то другому, формула описывает другие серии линий; экспериментально они были открыты уже в начале XX в., но до появления полноценного объяснения. Серия Лаймана

состоит из спектральных линий, про которые мы теперь знаем, что они отвечают переходам электрона в состояние с минимальной энергией (число $k$ надо взять равным 1); эти линии лежат в ультрафиолетовой области. Переходы от больших энергий к третьей энергии из списка ($k = 3$) дают линии, лежащие с другой стороны от видимого света — в инфракрасной части спектра; они были открыты экспериментально как серия Пашена.
[213] При этом остается несколько загадочным, что в нашем вроде бы непрерывном мире возникают дискретные свойства. Как это получается? С разгадкой придется подождать до следующей прогулки.
[214] *Чудовищная* скупость в сравнении с планетными системами. Даже одна и та же планета может в принципе летать вокруг своего светила по множеству различных орбит. Ничего похожего на это разнообразие в атомах нет. На секунду вернувшись к одиозному рис. 10.1, стоит еще раз отметить, что атом — это *определенно не* «планетная система».
[215] В другой сфере деятельности переход к дискретному называют оцифровкой: оцифровывают условно непрерывную информацию, чтобы надежнее ее передавать, легче обрабатывать и проще хранить. Пожалуй, было бы преувеличением сказать, что квантовое описание мира — цифровое; однако Уилеру принадлежит идея «It from bit» (что-то вроде «сущее из битов»), согласно которой в *самой-самой* основе мира лежит информация. Эта и ей подобные идеи пока остаются на уровне философских — что, впрочем, не лишает их некоторого интереса.
[216] Молекулы часто принимают некоторую дополнительную энергию и оказываются в возбужденных состояниях, отличных от основного. Возбужденные состояния тоже дискретны и тоже являются источником *молекулярных* спектральных линий. Когда я говорю о единственной конфигурации данной молекулы, я имею в виду ее основное состояние — без «лишней» энергии. Другая оговорка состоит в том, что при заданном порядке атомов часто имеются стереоизомеры — геометрически

различные варианты сборки (например, представляющие собой зеркальное отражение друг друга). Это важное обстоятельство, о нем следует помнить, но сейчас нет необходимости в него погружаться; сейчас важно, что имеющиеся варианты конфигураций все равно остаются дискретными: их лишь несколько, и нет никаких промежуточных форм или плавных деформаций одной конфигурации в другую.

[217] Что вообще-то стало известно вовсе не во времена Менделеева, а только спустя некоторое время после опытов Резерфорда, с которых мы начали эту прогулку.

[218] Почему нельзя занимать занятые состояния и почему на первом уровне поселились сразу два электрона, мы увидим ближе к концу этой прогулки; не будем сейчас разрушать интригу.

[219] Такие молекулы встречались нам на прогулке 9, когда мы говорили, что части молекулы могут вести себя так, *как если бы* они были соединены чем-то вроде пружин; тогда мы не интересовались их квантовыми свойствами, а сейчас увидим, насколько это в действительности необычные «пружины». Примеры двухатомных молекул — HF (фтороводород, при растворении в воде становится плавиковой кислотой), HCl (хлороводород, при растворении в воде становится соляной кислотой), CO (угарный газ) и NO (окись азота).

[220] Именно поэтому для сверхпрецизионных экспериментов по проверке теории относительности, упомянутых в главе «прогулка 5», требовались переохлажденные ионы.

[221] Корень «электро» присутствует в названиях не очень удачным образом, способствуя смешению понятий. Электромагнитное поле само по себе не имеет отношения к электрону, а его кванты — фотоны — лишены электрического заряда. Но фотоны *поглощаются и испускаются* любыми элементарными частицами, обладающими электрическим зарядом, в частности электронами и позитронами (квантами электрон-позитронного поля).

[222] Х. Б. Г. Казимир занимался и более практическими вещами: с 1942 г. он работал в Лаборатории физики компании Philips в голландском Эйндховене, а с 1946-го уже был одним из директоров лаборатории (а впоследствии — членом совета директоров компании).
[223] *Отрицательная* энергия, которая «появляется» между пластинами в сравнении с тем, что снаружи, иногда обсуждается в связи с возможным применением в ворп-драйве (см. рис. 7.11 и сопутствующие пояснения) — разумеется, в подчеркнуто сослагательном наклонении.
[224] Здесь можно привести аналогию из области настольных игр. Пусть мы хотим проследить за движением нескольких одинаковых точек на плоскости. Мы рисуем их положения через очень короткие промежутки времени, но каждый раз на новом листе бумаги. Пока смещение точек за выбранный промежуток времени много меньше расстояния между точками, мы в состоянии однозначно сказать, перебирая листы, какая точка как движется. Но если из стопки листов брать каждый сотый лист, смещения точек окажутся столь значительны, что мы потеряем возможность их индивидуализировать. В квантовой механике, впрочем, невозможность индивидуализации не связана с пренебрежением какой-то информацией, а имеет фундаментальный характер. — *Прим. науч. ред.*
[225] Правда, первые, кто показал, что действительно можно, удостоились за это Нобелевской премии в 2001 г. В их опытах потребовалась температура всего на 200 *нано*кельвинов выше абсолютного нуля, а использовались в них атомы рубидия или натрия, которые вели себя как неразличимые частицы (все в одном и том же «внутреннем» состоянии) и, более того, как бозоны. Атомы, собравшиеся в бозе-эйнштейновский конденсат, *ведут себя как один* и движутся как один — манера, пожалуй, в максимальной степени противоположная всему, что мы обсуждали про поведение большого числа частиц на предыдущей прогулке. Капица еще в 1938 г. наблюдал гелий в (жидком) сверхтекучем состоянии (Нобелевская премия

1978 г.); как стало ясно позднее, оно тоже несет в себе черты бозе-эйнштейновского конденсата.
[226] Z-бозоны — элементарные частицы, обмен которыми составляет часть слабого ядерного взаимодействия. О них говорится также в приложении В.
[227] Мы уже записывали такое выражение для интенсивности вращения, используя в нем букву $\ell$, но ее не употребляют никогда, если речь идет о спине, чтобы ни в коем случае не спутать спин с количеством вращения, которое определяется состоянием электрона внутри атома.
[228] И для сколько-угодно-мерного пространства и пространства-времени; в пространстве-времени, как мы не раз говорили, часть поворотов — это гиперболические повороты, но сейчас это не большая помеха, да, в общем, даже и совсем не помеха: гиперболические засчитываются наравне с обычными — чем я и пользуюсь, специально этого не оговаривая.
[229] Расстояние же между линиями зависит от величины магнитного поля. Когда механизмы расщепления стали хорошо понятны, эти эффекты сыграли немалую роль в исследовании Вселенной; например, с их помощью мы измеряем магнитное поле Солнца и других объектов в космосе, в том числе очень далеком космосе.
[230] Это принесло Дираку Нобелевскую премию (совместно со Шрёдингером) с формулировкой «за открытие новых продуктивных форм квантовой теории». Дирак намеревался отказаться от премии, чтобы избежать слишком большого внимания к себе, но Резерфорд заметил, что отказ привлечет к нему еще больше внимания.
[231] Процесс включает еще и аннигиляцию возникших в процессе позитронов (они быстро встречаются с электронами, которых внутри Солнца столько же, сколько протонов), и энергия, которую после исчезновения пары электрон — позитрон получают два возникших фотона, дает небольшую добавку к основному источнику энергии солнечного излучения — дефекту массы, сопутствующему образованию каждой альфа-частицы из четырех протонов.

[232] Разумеется, распадаются *ядра*. Но совершенно невозможно противиться стандартным выражениям вроде «радиоактивный атом» и «распад атома». Причина, конечно, в том, что в обычной жизни ядра окружают себя электронами и таким образом образуют полноценные атомы. Манипуляции с электронами, при которых ядра остаются неизменными, лежат в основе всех *химических* превращений, но мы сейчас заняты ядерными превращениями. Именно ядро — и в первую очередь заряд ядра, т.е. число протонов в нем, — определяет индивидуальность атома. Ядра, разнящиеся только числом нейтронов в ядре, называются изотопами (по той причине, что относятся к одной и той же клетке в Периодической таблице) и могут очень сильно различаться по степени своей радиоактивности (периоду полураспада).
[233] Вспоминается стихотворение, которое в одной из своих реприз читал А. Райкин, насколько я помню — как пародию на поэта Роберта Рождественского:

Спи, усни, мой Роберт.
Завтра встанем рано,
Мама нам расскажет,
Если мы попросим,
Про ядро урана
Двести тридцать восемь.

[234] Паули — которому, кстати, в момент описываемых событий не исполнилось еще 25 лет — был известен тем, что едва ли хоть когда-нибудь сдерживал себя в критике, и Кронигу должно было достаться. Помимо физики, в более поздний период Паули поддерживал общение с К. Г. Юнгом; у меня нет квалификации, чтобы сказать, в какой степени они *сотрудничали* по вопросам психоанализа.
[235] В предыдущем декабре Гайзенбергу исполнилось 23 года. За несколько лет до этого он сдавал экзамен, являвшийся частью процедуры получения ученой степени; экзаменатором был Вин. Вопросы включали и экспериментальную часть, и Вин спросил, чем определяется разрешение микроскопа, но не получил ясного ответа. Не лучше обстояло дело и с вопросом о разрешении телескопа,

после чего Вин был склонен завалить соискателя, и только после вмешательства других влиятельных фигур Гайзенберг получил проходной балл, хотя и наименьший из возможных.
[236] Кроме того, на этой прогулке нам будут часто требоваться арифметические действия; попытаться обойтись без них означало бы обречь себя на серию натянутых аналогий, тогда как хочется изъясняться с существенно большей точностью. Придется потерпеть и сложение, и умножение, и даже связывающее их правило раскрытия скобок.
[237] И я не подразумеваю *никакой* степени одушевленности, стоящей за идеей «высказываний». Повторюсь: «высказывания» — это в первую очередь метафора.
[238] Время от времени возникает потребность *прочесть* какое-нибудь $|q\rangle$; «рамки», в которые помещена буква $q$, называются словом «кет», и все вместе можно произносить как «$q$-кет» или «кет-$q$», а при большом желании и как «$q$ в кете».
[239] На этой прогулке встречаются обозначения с индексами. Запись типа $q_1$, $q_2$, $q_3$ указывает на (как правило, различные) значения некоторой величины; использование одной и той же буквы подчеркивает их однотипность, а номер чуть ниже строки позволяет их различать.
[240] Примерно так и обстоит дело в задаче о туннелировании сквозь стену: частица не находится в состоянии с определенным положением, но в это ее состояние входят положения и внутри ямы, и снаружи, причем неравноценным образом — тем более неравноценным, чем толще и выше стенки.
[241] Имеется еще несколько более технических условий, которые можно отнести к определению терминов «сложение» и «умножение»: результат сложения не зависит от порядка, $|r\rangle + |s\rangle = = |s\rangle + |r\rangle$. Кроме того,

умножать на два числа можно или «постепенно», $a \cdot (b \cdot |r\rangle)$, или «сразу», перемножив два числа заранее, $(a\, b) \cdot |r\rangle$; получается одно и то же. И да, умножение на единицу ничего не меняет: $1 \cdot |r\rangle = |r\rangle$.

[242] Подразумеваются небольшие волны на глубокой воде. Опрокидывающиеся волны, волны на мелкой воде и волны в ряде других ситуаций, включая картины маринистов разного уровня одаренности, — прекрасные волны сами по себе, но не модель явления, которое здесь обсуждается.

[243] Здесь, как всегда, для простоты подразумевается, что входные данные дискретны: цвета можно перечислить в виде списка. Получающаяся функция тогда тоже умеет применяться только к дискретному набору значений. На реальные ситуации, где входные данные — это точки в пространстве (или значения координат), больше похожа палитра, цвет в которой меняется непрерывно. Математика при этом делается несколько сложнее, рассуждения и формулы требуют некоторых поправок. Но все необходимые поправки *можно* произвести, поэтому я не буду загромождать изложение дополнительными усложнениями; сумма по дискретным значениям координаты вполне адекватно передает идею. Время от времени я уже позволял себе такую вольность и буду делать это и дальше без дополнительных оговорок.

[244] А если написано просто $|x_1\rangle$? Это надо прочитать как $1 \cdot |x_1\rangle$ и увидеть

здесь функцию, которая в качестве исходных данных берет различные значения координаты $x$, но большим разнообразием не балует: значение координаты, равное $x_1$, она превращает в 1, а все остальные значения — в нуль.

[245] Воспринимая состояния $|*\rangle$ как векторы, уместно спросить себя: в пространстве какой размерности живут эти векторы? Если в описание вовлечено положение в пространстве, то, поскольку возможных положений $q_1$, $q_2$, $q_3$, … неопределенно много, пространство получается «бесконечномерным». А если описывается спин электрона, то всего лишь двумерным, потому что возможных значений (компоненты) спина только два. В любом случае это пространство не имеет отношения к нашему обычному трехмерному. Оно, если угодно, не физическое, а, как я и предупреждал, абстрактное, математическое.

[246] *Для тех, кто к нам только что присоединился*: как мы говорили, сложение состояний, например $|\uparrow\rangle + |\downarrow\rangle$, не имеет никакого отношения к сложению самих чисел 1/2 $\hbar$ (именно его изображает стрелка ↑) и –1/2 $\hbar$ (стрелка ↓); там результат равняется нулю — числу, вообще не являющемуся возможным значением для компоненты спина электрона.

[247] В обоих случаях — с точностью до множителя 2, который возникает по простым арифметическим причинам и никакого эффекта на рассуждения не оказывает. Я систематически игнорирую общие множители перед состояниями, включая и $1/\sqrt{2}$ перед суммой или разностью, чтобы не утяжелять формулы. Это не очень большое прегрешение.

[248] Фамилия фокусника — Фурье. Это Жозеф Фурье (1768–1830), которого стоит отличать от его современника

Шарля Фурье — философа и одного из создателей утопического социализма (и заодно изобретателя слова «феминизм»). В парижской Политехнической школе Ж. Фурье занял место Лагранжа. Наполеон назначил его управлять департаментом Изэр, префектура которого находится в Гренобле. Там Фурье разрабатывал теорию распространения тепла в твердом теле, для которой изобрел и стал использовать математический метод, постепенно (и в ходе своего дальнейшего развития)
приобретший *чрезвычайно* широкое, поистине универсальное применение, в том числе и в квантовой механике. Изучая распространение тепла по планете Земля, Фурье впервые обратил внимание на явление, которое сейчас называют парниковым эффектом. Он скончался за 95 лет до появления квантовой механики, но, если бы ему рассказать немного о том, что происходит в ней «под капотом», он бы шутя определил, что площадь прямоугольников, связывающих неопределенности в координате и в количестве движения, равна именно $\hbar/2$ (см. рис. 10.3).

[249] И здесь есть свобода для маневра. Поскольку координаты и компоненты количества движения, относящиеся к разным электронам, не враждуют друг с другом, вполне возможно «гибридное» описание: состояния одного из электронов отвечают определенным значениям координат, а состояния другого — определенным значениям количества движения. Более того, поскольку нет вражды между координатой электрона $x$ и компонентой его же количества движения вдоль $y$ или $z$, можно делать «гибридные» состояния даже для одного электрона.

[250] Пер. с нем. В. В. Бибихина.

[251] И кроме того, как мы обсуждаем чуть ниже, волновая функция системы из более чем одной частицы вообще *не определена* в физическом трехмерном пространстве.

[252] В ответ на сдавленно звучащее «почему?» я могу сказать только, что ничего вместо этого никто не придумал. И кстати, ранее в главе ведь было размещено предупреждение.

[253] Строго говоря, требуется не одно только раскрытие скобок, но и прохождение предписания «сквозь» умножение на числа: применить предписание к $a \cdot |q\rangle$ — это все равно что сначала применить предписание к волновой функции $|q\rangle$, а результат потом умножить на число $a$.

[254] Вот на всякий случай переизложение описанной чуть выше процедуры применительно к количеству движения вдоль $x$. Мы снова начинаем с состояний, отвечающих определенному значению количества движения (вдоль $x$, что далее подразумевается). Предписание $\hat{P}_x$, которое мы желаем построить, обходится с каждым из них максимально «мягко» — всего лишь умножает на свое собственное число, равное тому количеству движения, которому отвечает состояние. Как и раньше, ничего больше изобретать не надо: предписание $\hat{P}_x$ уже полностью определено, потому что любое другое состояние можно сконструировать из этих собственных состояний в виде «длинных сумм с умножениями», а предписание $\hat{P}_x$, видя перед собой сумму, применяется к каждому из слагаемых по отдельности, производит из него новое состояние, после чего все новые состояния складываются. Правило раскрытия скобок продолжает играть ключевую роль.

[255] Волновая функция (состояние) Ψ присутствует и в левой, и в правой частях, что существенно отличает уравнение Шрёдингера от уравнений, с которыми мы встречались раньше. Законы Ньютона содержат изменение количества движения в одной части уравнения и силы — в другой. В уравнениях Эйнштейна в левой части — кривизна, в правой — энергия и остальное, относящееся к материи. Здесь не так.

[256] С первого взгляда только что сформулированное свойство не обещает большого постоянства: темп изменения величины пропорционален самой величине. Хитрость здесь в *комплексной* математике, благодаря которой буквально «величина» волновой функции остается неизменной, а вся зависимость ее от времени описывает явление сродни обеганию окружности — собственно, буквально обегание окружности, только в некотором «математическом» пространстве.
[257] Какова, для ясности, связь между двумя уравнениями, нестационарным и стационарным? Нестационарное более общее: оно выполнено *всегда*. Но если волновая функция зависит от времени способом, который я здесь называю несущественным и который имеет строгое определение, то нестационарное уравнение Шрёдингера превращается в стационарное.
[258] Для неограниченного в пространстве движения дискретность обычно не наблюдается, и собственную функцию удается найти для каждого значения энергии из некоторого интервала. Я подчеркиваю дискретность, потому что она *имеет* место для «пойманного» движения и потому что она все-таки более удивительна; к тому же, как мы обсуждали на предыдущей прогулке, она во многом лежит в основании мира.
[259] Средство, которое обеспечивает смещение в одну или другую сторону в зависимости от компоненты спина, — неоднородное магнитное поле.
[260] Я определенно сбиваюсь на жаргонное «спин вверх» вместо «*компонента* спина, направленная вверх». Это очень удобный жаргон; даже странно, что я так долго продержался, избегая его.
[261] Перемножаемые части состояний должны относиться к разным, не зависящим друг от друга свойствам. Если еще раз привлечь цвета и заодно с ними другие свойства, которые тоже *не* являются результатами измерений в квантовой механике, то среди возможных произведений окажутся

$|\text{красный}\rangle\,|\text{тонкий}\rangle$, $|\text{красный}\rangle$

|толстый⟩ и |черный⟩ |тонкий⟩. И скажем, |черный⟩ |тонкий⟩ |тяжелый⟩. При этом подразумевается, что при умножении на числа не имеет значения, какую часть мы умножили на число: (5 · |красный⟩)|толстый⟩ — это то же самое, что и |красный⟩(5 · |толстый⟩). Поэтому скобок никто не ставит и пишут просто 5 · |красный⟩ |толстый⟩. Чего-то такого мы от умножения, в общем, и ожидаем.

[262] Приготовить такое состояние несложно, используя другой прибор Штерна — Герлаха, ориентированный по направлению *x*: магнитное поле в нем разделит электроны на два пучка в зависимости от того, направлен ли их спин вдоль *x* или в противоположном направлении; один из этих пучков и поступает далее в прибор Штерна — Герлаха, ориентированный вдоль *z*.

[263] Относительные вероятности сами по себе нам уже встречались: это заготовки для настоящих вероятностей. Настоящие вероятности получаются, если поделить все относительные вероятности на одно и то же число так, чтобы сумма их всех равнялась 1. В приведенном случае поделить

надо на $10^2 + (0,1)^2 = 100,01$, и две вероятности окажутся равными примерно 0,9999 и 0,0001.

[264] В мысленных экспериментах, например, можно радикально упростить прибор Штерна — Герлаха, взяв в качестве его ключевого элемента единственный протон. В нейтральном состоянии протон располагается «посередине», но затем сдвигается в зависимости от того, куда отклонился электрон. Из-за своего положительного заряда протон испытывает притяжение к пролетающему электрону, и, если тот пролетел сверху, протон перемещается вверх и в конце концов попадает в экран, расположенный сверху, вызывая химическую реакцию, приводящую к появлению пятна.

[265] Эта проблема озадачивает меня в связи с визуализациями «распределения электронов» — скажем, в молекуле $H_2$ с двумя электронами. Обычно изображают «облака», распределенные по пространству: более густые там, где вероятность обнаружить электрон больше, и более разреженные там, где эта вероятность невелика. Проблема не в условности густоты облака и не в том, что про положения двухатомных ядер предлагается забыть, а рассматривать только положения электронов. Проблема в том, каким образом зависимость $\Psi(q_1,q_2)$ от положений *двух* электронов — от двух пространственных точек — может сообщать, какова «густота» в какой-нибудь *одной* точке пространства?

[266] Требуется определить локальные «существовалки», если вольно передавать труднопереводимый английский термин *beables*, изобретенный для этой цели Беллом.

[267] Но в гражданской организации, что позволяло обойти ограничения в зарплате, действовавшие в военном ведомстве. Эверетт вскоре возглавил математический отдел Группы оценки систем вооружений, к мнению которой прислушивались; математические методы применялись там в первую очередь к выработке стратегии ядерного противостояния с СССР и даже стратегии ведения ядерной войны; там же, видимо, работали и над концепцией гарантированного взаимного уничтожения. Номер как часть полного имени, кстати, означает, что его отца звали Хью Эверетт-мл.

[268] Между ними есть различия, в которые мы не будем погружаться. Сейчас популярна многомировая интерпретация, но сам Эверетт таких слов не употреблял, зато оставил идиоматические выражения несогласия на полях принадлежавшего ему экземпляра более позднего текста других авторов на эту тему.
[269] Я понимаю ее несколько расширительно, не вдаваясь в различия между взглядами самого Бора и Гайзенберга, а также фон Неймана и других. Часто говорят о «квантовой механике из учебника», что точнее, но я позволю себе легкое злоупотребление термином «копенгагенская».
[270] Лично Бору (нобелевскому лауреату 1922 г.) принадлежит пионерская формулировка в 1913 г. того, что позже стали называть «старой квантовой теорией». Он попытался объяснить существование атома с центральным положительно заряженным ядром, как это следовало из опытов Резерфорда, приняв несколько ad hoc постулатов, очевидным образом противоречивших известным законам движения. В этих постулатах фигурировала постоянная Планка $h$, а успехом их применения стало объяснение спектральных линий атома водорода, и в частности определение постоянной в формулах Бальмера и Ридберга для спектральных линий. Однако для других атомов постулаты Бора не работали, несмотря на некоторые сделанные в них уточнения. Когда в более поздние времена Бор сталкивался со случаями применения «старой квантовой теории», он восклицал: «Они что, никогда не слышали про квантовую механику?!»
[271] Все, что он сделал в этой области, относится к периоду 1955–1956 гг. (в начале которого, в декабре 1954-го, он прочитал в Вашингтоне лекцию о применении теории игр в военной науке, а в конце, в октябре 1956-го, погрузился в военную тематику уже полностью, лишь ненадолго оторвавшись от нее весной следующего года для получения ученой степени). Правда, попытки Уилера вернуть Эверетта к занятиям наукой включали организацию его встречи с Бором весной 1959 г. Эверетт провел в Копенгагене шесть недель, но беседы с Бором произвели на него гнетущее впечатление

(Бор, по-видимому, вообще не был склонен всерьез обсуждать странную теорию, возникшую, казалось, на пустом месте). Быть может, стоит упомянуть еще два биографических обстоятельства. Двенадцатилетний Эверетт написал письмо Эйнштейну, на которое тот даже коротко ответил. Не дожив до 52 лет, Эверетт скончался во сне; упоминают его пристрастие к непрерывному курению и к алкоголю, но не реже говорят и о крайней степени его эмоциональной отчужденности, в том числе от жены и детей. По крайней мере, в этой вселенной.

[272] Трудно удержаться и не высказать спекулятивную и едва ли проверяемую идею, что на своей основной работе Эверетт мог раз-другой задуматься о сходстве между соображениями о делящихся вселенных и перспективах предотвращения ядерной войны.

[273] Это, конечно, ничуть не отменяет того факта, что по дороге ваша установка произвела немалое число вселенных, где вы прискорбным образом перестали существовать. Если я в чем-то и согласен с Тегмарком без единой оговорки, так это в предупреждении «Не пытайтесь повторить это дома».

[274] Во времена Шрёдингера эксперименты с частицами, сохраняющими свою запутанность, могли быть только мысленными, а сейчас создание и поддержание запутанности — одна из главных проблем, постепенно решаемых для построения квантового компьютера и осуществления квантовой криптографии.

[275] Запутанность «разошлась» по измерительным приборам в первом же раунде взаимодействий, и восстановить ее можно, только скрупулезно проследив за состояниями *всех* элементарных составляющих этих приборов — если они, конечно, в свою очередь изолированы от остальной вселенной. Такое «можно» означает, разумеется, «нельзя».

[276] Я не большой поклонник антропоморфности в метафорах вроде «электрон стремится», «атомы хотят» и т.п., не говоря уж о «и тогда электрон видит, что…», и определенно не наделяю такие высказывания никаким

смыслом, кроме метафорического, но сейчас *очень* удобно так говорить.

[277] Подозрения Эйнштейна, что если квантовая механика локальна, то она не является полной теорией, в некоторых изложениях превратились в высказывания, что Эйнштейн «не принимал», а иногда — и «не понимал» квантовой теории. Одна из причин этого, возможно, в том, что незадолго до выхода из печати статьи ЭПР 4 мая 1935 г. в *The New York Times* появилась статья под заголовком «Эйнштейн критикует квантовую теорию» или, в несколько буквалистском переводе, «Эйнштейн нападает на квантовую теорию». В самом начале статьи сообщалось, что вывод Эйнштейна состоит в том, что если теория «верна», то она не «полна», но хлесткий заголовок, видимо, оказался сильнее. Утечку сведений о еще неопубликованной научной работе организовал Подольский; газете пришлось впоследствии напечатать письмо Эйнштейна, в котором говорилось, что информация, полученная от Подольского, была передана без согласия Эйнштейна и что он, Эйнштейн, такую практику осуждает. С Подольским Эйнштейн больше не разговаривал.

[278] В реальных экспериментах намного проще иметь дело не с электронами, а с фотонами, у которых тоже два спиновых состояния, а ЭПР-состояние устроено очень похожим образом. Для наших мысленных экспериментов это не имеет значения. Актуальный опыт с электронами тоже был успешно осуществлен, хотя и потребовал достаточно сложной схемы; расстояние между «А.» и «Я.» превысило километр.

[279] Среднее равно –1, когда направления параллельны, т.е. рассогласование составляет 0°, — это опыты, которыми Аня и Яша занимались накануне. Среднее несильно отличается от –1, если рассогласование двух направлений невелико, и приближается к нулю по мере того, как угол между двумя направлениями увеличивается до 90°. Рассогласование 90° как раз и означает, что на каждый +1 у Ани результаты Яши с равной вероятностью равны +1 и –1. Если угол между направлениями увеличивается и дальше, от 90° до 180°, то среднее растет от нуля до +1.

[280] Это не оригинальная схема Белла 1964 г., а вариант, предложенный на ее основе в 1969 г. Математическое утверждение, которое здесь получается, называется CHSH-неравенством по фамилиям его авторов Clauser, Horne, Shimony, Holt. Но часто и про это неравенство говорят как про «одно из неравенств Белла»; оно, кстати сказать, присутствует на доске в 19-м эпизоде 10-го сезона «Теории Большого взрыва». Я буду продолжать говорить о неравенствах Белла.

[281] «Означает» ли что-нибудь эта комбинация из четырех средних? Только то, чем она является. Почему именно такую комбинацию надо брать? Потому что тогда удается получить желаемый результат. Но как такое придумать? Лучше всего поинтересоваться у тех, кто придумал.

[282] Время от времени, впрочем, появляются статьи, пугающие перспективой такой угрозы, но дальше этого дело не продвигается.

[283] Не столько перевод, сколько калька с английского *pilot wave* — «волна-пилот». Слово *pilot* (заимствование через французский из итальянского, где было заимствованием из греческого) существовало задолго до появления *пилотов* и означало в первую очередь лоцмана — по существу, проводника. Жаль, что не установился перевод «волна-руководитель».

[284] Речь идет о (плотности) вероятности «рассаживания» всех частиц сразу. Вероятности, другими словами, относятся к комбинациям «протон здесь, электрон там, а еще один электрон вон там, а…». Если для простоты частиц две — скажем, электрон и протон, — то волновую функцию $\psi(q_э, q_п)$, зависящую от их положений, надо возвести в квадрат: $(\psi(q_э, q_п))^2$ и есть тогда плотность вероятности, что приключения электрона начинаются в точке $q_э$ и одновременно с этим приключения протона начинаются в точке $q_п$.

[285] Уравнение Шрёдингера — тоже уравнение, в которое не встроены эффекты специальной теории относительности (их можно учитывать в качестве поправок, руководствуясь очень правдоподобными соображениями, но это не то же

самое, что иметь их встроенными в исходную формулировку, как это имеет место для уравнения Дирака). «Женитьба» квантовой механики на специальной теории относительности приводит к квантовой теории поля — формализму, пусть и сложному, но чудесно эффективному. Добиться этого союза было не очень просто, но для него нет формальных препятствий; в случае же бомовской механики они есть, уже в самой ее формулировке.
[286] Мое личное, отчасти безответственное мнение о бомовской механике разделяют заведомо не все.
[287] В отличие от волновой функции, для пиксельного изображения алгоритм свертки дискретен, но это не меняет его математического содержания.
[288] Утверждал ли я где-нибудь, что такое положение дел совсем не кажется мне странным?
[289] Это же делал и Шрёдингер в своих первых попытках привязать волновую функцию к реальности, только вместо массы он рассуждал об электрическом заряде. Идея «не взлетела» из-за того, что зависимость волновой функции от положения в пространстве имеет тенденцию со временем «расплываться» по пространству, а это привело бы к потере остролокализованных зарядов, например, в атомном ядре — в очевидном противоречии с наблюдениями. (Никаких самопроизвольных коллапсов Шрёдингер при этом не обсуждал.)
[290] *Consistent quantum theory*; первое слово не так просто выразить одним русским словом, и я признаю, что среди напрашивающихся переводов — последовательная, (внутренне) согласованная, логичная, систематическая. Нередко говорят и о *consistent histories* — в данном случае это *непротиворечивые* истории.
[291] Но и — надо ли говорить? — без экстремизма многих вселенных. В заведомо неточном, но выразительном смысле вариативность многих вселенных здесь удается вместить в одну.
[292] Я обозначаю выбранные возможности, указывая характерное состояние; техническое определение тут

несколько более изощренное, но и указание состояния/волновой функции вполне передает идею.

[293] Например, если одна из выбранных возможностей — это присутствие электрона в любой точке с координатой $x > 0$, то соответствующие волновые функции вырезаются — «высекаются» — следующим образом: с волновой функцией $\psi(x)$ не надо ничего делать, пока $x > 0$, но ее следует умножить на нуль, т.е. попросту заменить нулем, для всех $x \leq 0$. Для других признаков процедура может быть более сложной, но она всегда хорошо определена математически.

[294] День упражнений в переводе насыщенных английских слов. Вместо «каркаса» (*framework*) с равным успехом мог бы быть фрейм, рамка, схема, платформа, парадигма, обрамление или даже *оклад*.

[295] Но «наложение» каркасов друг на друга не запрещено в принципе. Например, если в одном из них состояния колебательной системы разбиты на два класса «с энергией $E_1$» (из списка допустимых энергий, превышающих энергию нулевых колебаний) и «с энергией $E_2$ или выше», а в другом каркасе в тот же момент времени состояния разбиты на два класса «с энергией $E_2$ или ниже» и «с энергией $E_3$ или выше», то «наложение» их друг на друга даст разбиение на три класса «с энергией $E_1$», «с энергией $E_2$» и «с энергией $E_3$ или выше».

[296] Здесь есть элемент жаргона, по поводу которого стоит оговориться. Квадрат волновой функции в данном случае — это *число*. Если (аналогично тому, как это делалось в бомовской и ГРВ-интерпретациях) перед нами волновая функция, зависящая от положений всех частиц, скажем $\Psi(q_э, q_п)$ для электрона и протона, то, чтобы получить это число, надо сначала просто возвести волновую функцию в квадрат, а затем усреднить по всем положениям электрона и протона. Если волновая функция задана как-то иначе, то усреднять надо по другим переменным, но усреднение в любом случае необходимо, чтобы в результате получилось число, ни от каких переменных не зависящее.

[297] Ее автор — по совместительству автор книги [см. № 23 в списке литературы].

[298] Любое измерение, которое Аня может произвести над электроном-посылкой, даст или $|\uparrow\rangle$, или $|\downarrow\rangle$ — с вероятностями, пропорциональными $a^2$ и $b^2$. Это совсем не то же самое, что числа $a$ и $b$. Чтобы получить некоторое приближение к значениям этих чисел, Ане пришлось бы создать электрон в одном и том же состоянии в огромном числе копий и лишь *примерно* определить вероятности, с которыми встречаются $|\uparrow\rangle$ и $|\downarrow\rangle$, — фактически $a^2$ и $b^2$. Однако все равно останется проблема знака: если известен квадрат числа, то само число определено с точностью до знака. Это очень унылый план действий.

[299] Квантовые компьютеры определенно лежат за пределами наших прогулок, но происходящее в них в известной степени похоже на то, что делается в схеме квантовой телепортации. Носителями информации там являются системы с двумя состояниями, условно $|\uparrow\rangle$ и $|\downarrow\rangle$, а потому и с бесконечным числом состояний $a \cdot |\uparrow\rangle + b >\cdot |\downarrow\rangle$ на каждую такую систему, которую в этом контексте называют кубитом. Из-за наличия двух слагаемых с произвольными коэффициентами кубит

выражает собой «смесь нуля и единицы», недоступную цифровому компьютеру. Способы обработки информации включают запутывания кубитов и вспомогательные действия с состояниями отдельных кубитов; все это происходит по правилам, которые применимы вне зависимости от конкретных коэффициентов перед состояниями. Заранее придуманная последовательность преобразований составляет квантовый алгоритм для решения той или иной задачи. Сложность при этом состоит в том, что, когда все действия выполнены, прочтение ответа требует измерения, а его результатом являются не накопившиеся перед состояниями коэффициенты, а сами состояния, коэффициенты же определяют вероятности исходов. Если, например, финальные $|\uparrow\rangle$ и $|\downarrow\rangle$ представляют собой ответы «да» и «нет» в какой-либо задаче, то требование к алгоритму состоит в том, чтобы измерение кубита, получившегося в итоге работы алгоритма, давало бы правильный ответ с заметно большей вероятностью, чем неправильный.

[300] Шрёдингер родился в Австрии, но его «государственная» должность в Берлинском университете уравнивала его статус со статусом гражданина Германии.

[301] Профессорская позиция Шрёдингера была защищена от экономических невзгод начала 1930-х; но, например, Казимир вспоминал, что, заехав в Берлин в 1932 г., он вместе с Лизе Майтнер присутствовал на лекции Шрёдингера, за вход на которую брали плату, чтобы собрать средства на помощь студентам.

[302] В предыдущие годы Шрёдингера многократно номинировали на премию ведущие ученые, но в течение нескольких лет Нобелевский комитет проявлял достаточно

стойкое нежелание отмечать работы по созданию квантовой механики. В 1933 г. премию наконец разделили Дирак и Шрёдингер, и одновременно Гайзенбергу была присуждена отложенная премия за предыдущий год. (В том же году Нобелевскую премию по литературе получил Иван Бунин.)
[303] Электростанция — это то место, где энергия другого, неэлектрического, вида и происхождения тратится на разделение зарядов; *создать* нескомпенсированный электрический заряд нельзя даже на электростанции.
[304] Многие известные уравнения почему-то не часто называют законами природы, но, конечно, все фундаментальные уравнения таковыми являются, даже если, как в случае уравнения Шрёдингера, ясно видны границы их области применения.
[305] Здесь нет ничего магического. Например, энергия двух отталкивающихся электрических зарядов, которой они обладают в силу своего взаимного расположения, возрастает по мере уменьшения расстояния между ними. Это знание и позволяет сказать, до какого расстояния смогут реально сблизиться два заряда в зависимости от сообщенной им энергии движения.
[306] С неустранимым дополнительным знаком минус, который заслуживает отдельной истории.
[307] На сей счет имеются самые разнообразные изобретения, потому что именно на доставке энергии в той или иной форме основаны все без исключения виды поражающего воздействия, начиная от удара кулаком, — тогда как средства защиты, от доспехов до бункера и до «защитного поля» из множества фантастических циклов, призваны, наоборот, этой доставке воспрепятствовать.
[308] С тех пор о нейтрино (мн. ч.) стало известно еще многое — многое, но не все. Трудное экспериментальное изучение их свойств и сейчас раздвигает границы фундаментального знания.
[309] Когда Оле Семихатовой было четыре года, она самостоятельно освоила преобразование энергии из одной формы в другую. Время от времени она получала в подарок очередной вариант небольшой куклы, заключенной в

пластиковую сферу; сфера состояла из двух половин, собранных в одно целое способом, который предусматривал разборку. Как только вся конструкция оказывалась у нее в руках, девочка без промедления бросала ее на пол. Кинетическая энергия переходила в энергию деформации, сфера открывалась «сама», и можно было начинать играть в куклу. В ускорителях и коллайдерах применяется сходная идея: использовать энергию движения, чтобы добраться до внутренней структуры. Существенное различие, однако, состоит в том, что «куклы внутри» тут нет, зато множество довольно разнообразных «кукол» рождаются непосредственно в процессе столкновения, в прямом смысле слова из энергии движения. (Слово *коллайдер*, впрочем, указывает на встречные пучки. Бросать одну куклу в другую не так легко, а кроме того, надо, чтобы подарили сразу две.)

[310] Физики любят энергию и иногда измеряют массу в единицах, удобных для измерения энергии, но не наоборот; «иногда» надо заменить на «почти всегда», если речь идет об элементарных частицах.

[311] Стандартная модель *не полна*: мы знаем, что она не описывает некоторые существующие во Вселенной элементарные частицы, но не знаем, какие именно. Поиск эффектов, которые неточно описываются Стандартной моделью и потому могут служить указанием на то, как ее следует расширить, — передний край науки и одновременно непростая задача, потому что там, где мы умеем извлекать предсказания из Стандартной модели, эти предсказания получаются *хорошими*, и отклонения от них нелегко зафиксировать. В оптимистическом сценарии существенные новые данные ожидаются начиная с 2022 г.

[312] Это «рабочее» употребление слова *материя* можно критиковать с философских позиций, но я буду его придерживаться; так говорит значительное число работающих в этой области специалистов. Попутно можно отметить, что две эти функции — из чего сложен мир и что соединяет его части — в значительной степени разделены; наша Вселенная совсем не похожа на конструктор «Лего», где эти функции реализованы одновременно.

[313] За одним исключением $\boxed{-\frac{1}{3}} \to \boxed{\frac{2}{3}}\ \boxed{-1}\ \boxed{\bar{0}}$, которое обсуждается чуть ниже.
[314] Темная минус единица в среднем живет всего 0,29 пикосекунды из-за своей огромной массы — в 3477 раз большей, чем у светлой минус единицы. Серая минус единица массивнее, чем светлая, лишь в 207 раз, что позволяет ей жить намного дольше, в среднем около 2,2 микросекунды.
[315] Из-за принципа Паули. Получившийся протон должен занять подходящий энергетический уровень в ядре, но они уже заняты другими протонами. В тех случаях, когда нейтрон все-таки распадается в ядре, ядро оказывается радиоактивным: испуская электрон (исторически — «бета-лучи»), оно превращается в ядро другого элемента — следующего по порядку в Периодической таблице; явление называется бета-распадом.
[316] Как кажется, имеется девять (3 × 3) возможностей для таких «двойных» цветов, переносимых глюонами, но это только потому, что мы переупростили картину. Имеется действительно шесть вариантов, когда глюон переносит цвет вместе с каким-то *другим* антицветом. Но далее, в силу определенных математических требований, глюон не может переносить только один цвет и *отвечающий ему* антицвет, из-за чего имеются еще два (а не три) глюона с более сложными цветовыми состояниями. В итоге различных по цвету глюонов оказывается не 9, а только 8.
[317] Все ссылки вида arXiv:1902.10103 надо воспринимать как https://arxiv.org/abs/1902.10103; впрочем, поисковики быстро приводят к цели, если задать им просто: arXiv:1902.10103.

Научные редакторы *Владимир Сурдин, канд. физ.-мат. наук, Сергей Нечаев, д-р физ.-мат. наук*

Редактор *Петр Фаворов*

Издатель *П. Подкосов*

Руководитель проекта *А. Шувалова*

Ассистент редакции *М. Короченская*

Корректоры *Е. Барановская, О. Петрова*

Компьютерная верстка *А. Фоминов*

Художественное оформление и макет *Ю. Буга*
Фоторедактор *П. Марьин*
Иллюстрации *О. Любчанская, П. Марьин*



**Семихатов А.**

Всё, что движется: Прогулки по беспокойной Вселенной от космических орбит до квантовых полей / Алексей Семихатов. — М.: Альпина нон-фикшн, 2022.

ISBN 978-5-0013-9803-5