

ШОН КЭРРОЛЛ

.....
ВЕЧНОСТЬ
.....

В поисках
окончательной
теории времени



SEAN CARROLL



From Eternity to Here



The Quest for the Ultimate Theory
of Time



DUTTON

ШОН КЭРРОЛЛ



ВЕЧНОСТЬ



В поисках
окончательной
теории времени



Москва · Санкт-Петербург · Нижний Новгород · Воронеж
Киев · Екатеринбург · Самара · Минск

2016

ББК 22.68
УДК 524.8
К98

Кэрролл Ш.

К98 Вечность. В поисках окончательной теории времени / Пер. с англ. Е. Шикаревой. — СПб.: Питер, 2016. — 512 с.: ил. — (Серия «New Science»).

ISBN 978-5-496-01017-7

Что такое время в современном понимании и почему оно обладает именно такими свойствами? Почему время всегда движется в одном направлении? Почему существуют необратимые процессы? Двадцать лет назад Стивен Хокинг пытался объяснить время через теорию Большого Взрыва. Теперь Шон Кэрролл, один из ведущих физиков-теоретиков современности, познакомит вас с восхитительной парадигмой теории стрелы времени, которая охватывает предметы из энтропии квантовой механики к путешествию во времени в теории информации и смысла жизни.

Книга «Вечность. В поисках окончательной теории времени» не просто следующий шаг на пути к пониманию почему существует Вселенная — это прекрасное чтение для широкого круга читателей, которые интересуются физикой и устройством нашего мира.

12+ (В соответствии с Федеральным законом от 29 декабря 2010 г. № 436-ФЗ.)

ББК 22.68
УДК 524.8

Права на издание получены по соглашению с A Plume book, a division of Penguin Books USA Inc. Все права защищены. Никакая часть данной книги не может быть воспроизведена в какой бы то ни было форме без письменного разрешения владельцев авторских прав.

ISBN 978-0452296541 англ.
ISBN 978-5-496-01017-7

© Plume; Reprint edition (October 26, 2010)
© Перевод на русский язык ООО Издательство «Питер», 2016
© Издание на русском языке, оформление
ООО Издательство «Питер», 2016
© Серия «New Science», 2016



Династия

Фонд некоммерческих программ

«Династия»

основан в 2002 году

Дмитрием Борисовичем Зиминим,

почетным президентом компании «Вымпелком».

Приоритетные направления деятельности Фонда —
поддержка фундаментальной науки и образования в России,
популяризация науки и просвещение.

«Библиотека Фонда «Династия» — проект Фонда
по изданию современных научно-популярных книг,
отобранных экспертами-учеными.

Книга, которую вы держите в руках, выпущена
под эгидой этого проекта.

ОГЛАВЛЕНИЕ

Пролог	12
Время после Большого взрыва	13
Мы видим далеко не всё.....	14
Всегда останутся скептики.....	16
Примечания.....	18
Часть I. Время, опыт и Вселенная	19
Глава 1. Прошлое — это воспоминания настоящего.....	19
Что мы понимаем под временем.....	20
Примечания.....	38
Глава 2. Тяжелая рука энтропии.....	41
В Зазеркалье.....	41
Стрела времени	43
Будущее и прошлое как верх и низ.....	46
Самый надежный закон природы.....	48
Возвышение атомов	51
Энтропия и беспорядок	53
Энтропия и жизнь	55
Почему мы не помним будущее?	57
Искусство возможного	59
Примечания.....	61
Глава 3. Начало и конец времени.....	64
Видимая Вселенная.....	65
Большая и всё больше.....	67
Большой взрыв	70
Горячее однородное начало.....	72
Подкрутим контраст во Вселенной.....	74
Вселенная не стационарна	76
Она ускоряется.....	78
Загадка энергии вакуума.....	82
Глубочайшее будущее.....	84
Энтропия Вселенной.....	86
Примечания.....	88

Часть II. Время во Вселенной Эйнштейна	94
Глава 4. Время — штука личная	94
Потерянные в пространстве	96
Ключ к относительности	100
Пространство—время	102
Оставаясь в своем световом конусе	106
Самое знаменитое уравнение Эйнштейна	110
Примечания	112
Глава 5. Время гибкое	116
Искривляя прямые линии	118
Главное уравнение Эйнштейна	121
Дыры в пространстве—времени	123
Белые дыры: черные дыры наоборот	127
Примечания	128
Глава 6. Петля во времени	130
Жульничество с пространством—временем	131
Круги во времени	133
Врата во вчера	136
Одно простое правило	139
Энтропия и машины времени	141
Предсказания и причуды	143
Флатландия	146
Изучение машин времени во Флатландии (и в Кембридже)	147
Кротовые норы	152
Машина времени без особых затрат	155
Защита от машин времени	156
Примечания	159
Часть III. Энтропия и ось времени	165
Глава 7. Время, назад!	165
Шахматный мир	168
Ставя время с ног на голову	171
В Зазеркалье	173
Адрес состояния системы	176
Запуск частиц в обратном направлении	184
Три отражения природы	187
Сохранение информации	190
Примечания	193

Глава 8. Энтропия и беспорядок	199
Огрубление	202
Энтропия по Больцману	205
Контейнер с газом возвращается	208
Полезная и бесполезная энергия	211
Не заикливайтесь на деталях	214
Прокрутка энтропии в обратную сторону	219
Деконструкция Бенджамина Баттона	221
Энтропия как беспорядок	224
Принцип безразличия	226
Другие энтропии, другие стрелы	230
Доказательство второго начала термодинамики	233
Когда законов физики недостаточно	236
Гипотеза о прошлом	238
Примечания	241
Глава 9. Информация и жизнь	246
Картинки и воспоминания	247
Когнитивная нестабильность	250
Причина и следствие	252
Демон Максвелла	254
Записываем и стираем	256
Информация — физическая величина	258
Есть ли у жизни смысл?	260
Жизнь в движении	264
Свободная энергия, а не свободный доступ к пивному крану	267
Сложность и время	271
Примечания	273
Глава 10. Повторяющиеся кошмары	276
Хаос Пуанкаре	277
Цермело против Больцмана	281
Проблемы вечной Вселенной	283
Флуктуации вокруг равновесия	287
Антропный принцип	289
Отклонение в древние времена	293
Собирая яйцо из осколков	295
Мозг Больцмана	298
Кто мы такие в Мультиленной?	302
Финал	304
Примечания	305

Глава 11. Квантовое время	310
Квантовая кошка	313
Как работают волновые функции	315
Интерференция	317
Коллапс волновой функции	322
Необратимость	324
Неопределенность	327
Волновая функция Вселенной	329
Запутывание	331
ЭПР-парадокс	333
Много миров, много умов	335
Декогеренция	338
Коллапс волновой функции и стрела времени	340
Примечания	343
Часть IV. Из кухни в Мультиленную	346
Глава 12. Черные дыры: конец времени	346
Черные дыры — это реальность	348
У черных дыр нет волос	349
Законы механики черных дыр	352
Гипотеза Бекенштейна об энтропии	355
Хокинговское излучение	357
Испарение	361
Потеря информации?	364
Сколько состояний поместится в контейнер?	367
Голографический принцип	369
Хокинг сдается	372
Сюрприз из теории струн	375
Примечания	378
Глава 13. Жизнь Вселенной	382
Наши горячие, однородные первые дни	383
Что мы подразумеваем под «нашей Вселенной»	385
Сохранение информации в расширяющемся пространстве—времени ..	387
Комковатость	391
Эволюция энтропии	396
Максимизация энтропии	399
Пустое пространство	401
Реальный мир	406
Энергия вакуума	407
Почему мы живем не в пустом пространстве?	411
Примечания	415

Глава 14. Инфляция и Мультиленная	419
Кривизна пространства	420
Магнитные монополи	423
Инфляция	424
Проблема горизонта	427
Истинный и ложный вакуумы	430
Вечная инфляция	434
Мультиленная	437
Чего хорошего в инфляции?	440
Возвращаясь к нашему сопутствующему объему	443
Подготавливая почву	445
Примечания	447
Глава 15. Прошлое сквозь будущее	451
Эволюция пространства состояний	452
Необратимые движения	454
Особое начало	458
Симметричная Вселенная	460
До Большого взрыва	463
Стрела всего времени	466
Гипотеза о середине	468
Новорожденные Вселенные	470
Неугомонная Мультиленная	475
Собирая все вместе	481
Примечания	483
Глава 16. Эпилог	488
Каков ответ?	489
Эмпирический круг	492
Мультиленная — это не теория	493
Поиск смысла в абсурдной Вселенной	496
Следующие шаги	498
Примечания	499
Приложение. Математика	501
Возведение в степень	501
Большие числа	504
Логарифмы	505
Примечания	508
Благодарности	509

Дженни за все время

ПРОЛОГ

Кто-нибудь на самом деле знает, сколько времени?

Чикаго, *Does Anybody Really
Know What Time It Is?*

Эта книга — о природе времени, о зарождении Вселенной и о фундаментальной структуре физической реальности. Мы здесь не мыслим какими-то мелкими, незначительными категориями. Мы рассматриваем вековые, основательные проблемы. Откуда взялись время и пространство? Действительно ли все ограничивается той Вселенной, которую мы видим, или же существуют другие «Вселенные» за пределами доступного нашему взору? Чем будущее отличается от прошлого?

Согласно авторам Оксфордского словаря, *время* — наиболее часто используемое существительное в английском языке. На протяжении своей жизни мы движемся сквозь время, с одержимостью следим за ним и ежедневно пытаемся перегнать, — и все же, как ни удивительно, мало найдется людей, которые смогут простыми словами объяснить, *что же такое время*.

Мы живем в эпоху Интернета, поэтому логично будет обратиться за помощью к свободной энциклопедии Wikipedia. На момент написания этой книги статья *Time* начинается следующими словами:

Время — это компонент измерительной системы, используемый для определения порядка следования событий, для сравнения продолжительности событий и интервалов между ними, а также для количественного описания движения объектов. Время — одна из главных тем религиозных, философских и научных изысканий, но даже величайшим ученым не удастся дать определение времени в непротиворечивой форме, применимой ко всем областям исследований.¹

Ну, поехали. К концу книги мы сможем сформулировать очень точное определение *времени*, которое будет применимо ко всем областям. К сожалению, намного менее очевидно, *почему* время обладает теми свойствами, которыми обладает, — хотя несколько интригующих идей мы с вами все же изучим.

Космология, учение обо всей Вселенной, за последнюю сотню лет здорово продвинулась вперед. Четырнадцать миллиардов лет назад наша Вселенная (или, по крайней мере, та ее часть, которую мы в состоянии наблюдать) находилась в невообразимо горячем, плотном состоянии, которое мы называем Большим взрывом. С той поры Вселенная расширяется и охлаждается, и, судя по всему, она продолжит делать это во всем обозримом будущем, а может быть, на протяжении вечности.

Сто лет назад ничто из этого нам не было известно — ученые практически не имели никакого представления о структуре Вселенной за пределами галактики Млечный Путь. Сегодня, когда мы сумели снять мерки с наблюдаемой Вселенной, мы в силах детально описать не только ее размер и форму, но также составные части и приблизительный ход истории. Однако на многие важные вопросы, в частности связанные с первыми моментами Большого взрыва, мы ответить пока не можем. Как мы узнаем, эти вопросы играют критически важную роль в нашем понимании времени — не только на бескрайних просторах космоса, но и в наших лабораториях на Земле и даже в нашей повседневной жизни.

Время после Большого взрыва

Очевидно, что с течением времени Вселенная эволюционирует: ранняя Вселенная была горячей и плотной, современная Вселенная холодная и разреженная. Но я собираюсь обрисовать намного более глубокие связи. Самая загадочная характеристика времени — наличие у него направленности: прошлое отличается от будущего. Это *стрела времени*. В отличие от направлений в пространстве, которые между собой равноправны, у Вселенной, несомненно, есть предпочтительная ориентация во времени. Основная тема этой книги — то, что стрела времени существует, потому что Вселенная эволюционирует определенным образом.

Причина, почему у времени есть направление, кроется в том, что Вселенная полна необратимых процессов — событий, которые происходят в одном направлении времени, но никогда в другом. Можно превратить яйцо в омлет, как в классическом примере, но невозможно сделать из омлета целое яйцо. Молоко смешивается с кофе; топливо сгорает и превращается в выхлопные газы; люди рождаются, взрослеют и умирают. В Природе мы повсеместно обнаруживаем последовательности событий, в которых один тип событий всегда предшествует другому, а другой — всегда следует после. Все вместе они определяют стрелу времени.

Примечательно, что в основе всего нашего понимания необратимых процессов лежит одно-единственное понятие — то, что называется *энтропией* и измеряет «неупорядоченность» объекта или скопления объектов. С течением времени энтропия упрямо увеличивается или, по крайней мере, остается постоянной — это знаменитое второе начало термодинамики.² А причина, почему энтропия стремится возрасти, обманчиво проста: существует намного больше способов устроить беспорядок, чем организовать порядок; следовательно (при прочих равных условиях), упорядоченные конфигурации будут естественным образом перетекать во все более беспорядочные. Совсем несложно перемешать молекулы яйца, для того чтобы получить омлет, но аккуратно собрать их обратно, сформировав целое яйцо, нам не под силу.

На этом традиционная история, которую физики обычно рассказывают о себе, заканчивается. Но существует еще один ингредиент, обладающий невероятной важностью, который пока что не получает должного внимания: если все во Вселенной эволюционирует в направлении увеличения беспорядка, то оно должно было стартовать с невероятно упорядоченной конфигурации. Вся эта логическая цепочка, объясняющая, почему невозможно превратить омлет в яйцо, очевидно, базируется на фундаментальном предположении, касающемся ранней Вселенной: она пребывала в состоянии очень низкой энтропии и очень высокой упорядоченности.

Стрела времени соединяет раннюю Вселенную с тем, что мы в буквальном смысле испытываем в каждый момент нашей жизни. Это не только разбивание яиц и другие необратимые процессы, такие как добавление молока в кофе или захламенение комнаты, в которой никто не убирается. Стрела времени — это причина, почему нам кажется, что время течет мимо нас или (если угодно) почему мы плывем сквозь время. Это причина, почему мы помним прошлое, но не будущее. Почему мы растем и изменяемся, почему у нас происходит процесс обмена веществ и почему мы в конце концов умираем. Почему мы верим в причинно-следственную связь. Это принципиальный компонент нашего представления о свободе воли.

И все это благодаря Большому взрыву.

Мы видим далеко не всё

Загадка стрелы времени, по сути, сводится к следующему: почему условия в ранней Вселенной были именно такими, какими они были; почему существовала конфигурация с низкой энтропией, позволившая произойти всем этим

интересным и необратимым процессам? Исследованиям этого вопроса и посвящена данная книга. К сожалению, правильного ответа на него никто пока что не знает. Но в развитии современной науки мы достигли этапа, на котором у нас уже есть необходимые инструменты для того, чтобы всерьез взяться за эту загадку.

И ученые, и древние мыслители всегда старались понять время. В Древней Греции философы досократовских времен Гераклит и Парменид занимали разные позиции по вопросу природы времени: Гераклит подчеркивал первичность изменения, в то время как Парменид отрицал реальность изменения вообще. Деятнадцатый век был героической эпохой статистической механики: люди научились устанавливать поведение макроскопических объектов исходя из их микроскопических составляющих, — когда такие фигуры, как Людвиг Больцман, Джеймс Клерк Максвелл и Джозайя Уиллард Гиббс, сумели дать определение энтропии и описать ее роль в необратимых процессах. Однако им ничего не было известно об общей теории относительности Эйнштейна или о квантовой механике и уж, конечно, о современной космологии. Впервые в истории науки у нас по крайней мере есть шанс собрать обоснованную теорию времени и эволюции Вселенной.

Я собираюсь предложить следующую версию: Большой взрыв *не был* началом Вселенной. Космологи иногда говорят, что Большой взрыв представляет истинную границу пространства и времени, до которой ничего не существовало, — на самом деле даже само время не существовало, поэтому понятие «до», строго говоря, в этом случае применять нельзя. Однако мы слишком мало знаем об окончательных законах физики, чтобы с уверенностью делать подобные заявления. Ученые все чаще начинают апеллировать к возможности того, что Большой взрыв в действительности не был началом всего, — это всего лишь фаза, через которую проходит Вселенная или как минимум наша часть Вселенной. Если это правда, то вопрос о нашем низкоэнтропийном начале принимает другую форму: не «Почему Вселенная зародилась в таком низкоэнтропийном состоянии?», а «Почему наша часть Вселенной прошла через период такой низкой энтропии?»

Хотя этот вопрос и не кажется более простым, это — другой вопрос, и он открывает нам новый диапазон возможных ответов. Не исключено, что Вселенная, которую мы видим, — всего лишь часть намного более крупной Мультиленной, которая не зарождается в низкоэнтропийной конфигурации. Я приведу доводы, что самая разумная модель Мультиленной — такая, где энтропия увеличивается просто потому, что энтропия способна увеличиваться *всегда*: не существует состояния максимальной энтропии. В качестве дополнительно-

го бонуса Мультиленная может быть абсолютно симметричной во времени: начиная с какого-то момента в середине, когда энтропия имеет высокое значение, она эволюционирует по направлению к прошлому и будущему в состояния, в которых энтропия еще выше. Вселенная, доступная нашему взору, — это всего лишь крошечный отросток невероятно массивного ансамбля, и наше конкретное путешествие из плотного Большого взрыва к извечной пустоте — это часть более глобального стремления всей Мультиленной к увеличению ее собственной энтропии.

В любом случае это всего лишь одна из возможностей. Считайте это примером одного из сценариев, которые космологам следует рассматривать, если они решают всерьез взяться за проблемы, порождаемые стрелой времени. И независимо от того, ведет ли нас данная конкретная идея в правильном направлении, сами по себе эти проблемы уже невероятно увлекательны и реальны. На протяжении этой книги мы будем изучать проблемы времени с самых разных точек зрения: путешествия во времени, информация, квантовая механика, природа вечности. Когда уверенности относительно того, как должен звучать финальный ответ, еще нет, вопрос следует пробовать задавать всеми способами, какие только возможны.

Всегда останутся скептики

Не все согласны с тем, что космология должна играть значительную роль в нашем понимании стрелы времени. Однажды мне довелось провести семинар на эту тему в большой аудитории на физическом факультете одного крупного учебного заведения. Один из пожилых профессоров этого факультета посчитал мое выступление недостаточно убедительным и приложил усилия для того, чтобы все присутствующие узнали о его неудовольствии. На следующий день он разослал электронное сообщение другим сотрудникам факультета и при этом был достаточно любезен для того, чтобы включить в список адресатов и меня:

Наконец, величина энтропии Вселенной как функция времени — это интересная проблема для космологии, но предполагать, что от нее зависят законы физики, — совершеннейшая бессмыслица. Утверждение Кэрролла о том, что второе начало термодинамики обязано своим существованием космологии, — одно из глупейших [sic] заявлений, что мне доводилось слышать на физических семинарах, за исключением заявления [фамилия вырезана] о сознании в квантовой механике. Я удивлен тем, что присутствовавшие физики любезно вы-

слушали подобный вздор. Позже у меня состоялся ужин с несколькими аспирантами, которые с готовностью поддержали мои возражения, но Кэрролл остался непоколебим.

Надеюсь, он прочитает эту книгу. Здесь содержится много громких заявлений, но я проявляю осмотрительность, подразделив их на три типа: 1) примечательные результаты современной физики, звучащие удивительно, но тем не менее являющиеся общепризнанными фактами; 2) масштабные заявления, с которыми согласны не все работающие физики, но которые тем не менее должны быть приняты, так как их истинность не вызывает никаких вопросов; 3) умозрительные идеи за пределами зоны комфорта современного положения дел в науке. Определенно, мы не будем чураться отвлеченных и спекулятивных рассуждений, но они всегда будут ясно обозначены как таковые. В конечном счете вы будете вооружены всеми необходимыми знаниями для того, чтобы самостоятельно решать, какие части истории имеют смысл, а какие нет.

Тема времени включает огромное количество идей — от бытовых до шокирующих. Мы заглянем в термодинамику, квантовую механику, специальную и общую теории относительности, теорию информации, космологию, физику элементарных частиц и квантовую гравитацию. Первую часть книги можно рассматривать в качестве обзорной экскурсии, рассказывающей об энтропии и стреле времени, эволюции Вселенной и разнообразных концепциях самой идеи «времени». После этого мы постараемся подойти к вопросу более систематизированно: во второй части мы глубоко задумаемся о пространстве—времени и относительности, включая возможность путешествий назад во времени. В третьей части мы серьезно рассмотрим понятие энтропии, изучив ее роль во множестве контекстов — от эволюции жизни до загадок квантовой механики.

В четвертой части мы соберем все вместе, для того чтобы смело посмотреть в глаза загадкам, которые энтропия ставит перед современными космологами: как должна выглядеть Вселенная и насколько это похоже на то, как Вселенная на самом деле выглядит? Я продемонстрирую, что Вселенная выглядит совершенно не так, как «должна» (разумеется, объяснив, что я имею в виду, употребляя это слово), — по крайней мере, так дела обстоят для Вселенной, которую мы видим вокруг нас. Если наша Вселенная зародилась в Большом взрыве, то ее существование отягощается тонко подстроенным граничным условием, для которого мы не можем найти достойного объяснения. Однако если наблюдаемая Вселенная является частью более крупного ансамбля — Мультиленной, то, возможно, у нас есть шанс объяснить, почему в крохотной части этого ансамбля энтропия на одном конце времени так разительно отличается от энтропии на другом.

Все это, конечно, непростительное теоретизирование, однако к этим измышлениям стоит относиться серьезно. Ставки велики — время, пространство, Вселенная, так что ошибки, которые мы непременно будем делать по пути, без сомнений, также будут отличаться масштабностью. Иногда полезно отпустить свое воображение в свободное плавание, даже если наша конечная цель — вернуться на Землю и объяснить, что происходит на кухне.

Примечания

- ¹ Авторы статей в Wikipedia (2009). Настоящий фрагмент представляет собой перевод приведенного автором отрывка из англоязычной статьи на русский язык и может не соответствовать содержанию русскоязычного варианта статьи, существовавшему на тот момент времени. — *Примеч. пер.*
- ² Здесь необходимо сделать акцент на направлениях, так как в них очень легко запутаться: энтропия измеряет беспорядок, а не порядок, и она со временем увеличивается, а не уменьшается. На бытовом уровне мы привыкли думать, что «все замедляется и постепенно сходит на нет», но правильно говорить, что «энтропия увеличивается».

Часть I

Время, опыт и Вселенная

Глава 1

Прошлое — это воспоминания настоящего

Что же такое время? Если никто меня об этом не спрашивает, я знаю; если бы я захотел объяснить тому, кто спрашивает, — нет, не знаю.

Св. Августин. Исповедь

В следующий раз, когда у вас возникнет необходимость скрасить пару часов в баре, на борту самолета или в очереди за справкой в районном отделении дорожной полиции, проведите время с пользой: попробуйте поспрашивать незнакомцев, что такое, по их мнению, *время*. Кстати, это было частью моих исследований во время подготовки к написанию книги, которую вы держите в руках. Думаю, вы услышите множество интересных ответов: «Время — это то, что движет нас вперед по жизни», «Время отделяет прошлое от будущего», «Время — это часть Вселенной» и прочие вариации на ту же тему. Мне больше всего понравилось такое определение: «Время — это то, благодаря чему мы знаем, что что-то происходит».

Все эти понятия верны лишь отчасти. И хотя облечь понятие времени в слова не так уж просто, в повседневной жизни мы, как и Святой Августин, справляемся с ним вполне успешно. Большинство людей умеют определять время по часам, могут оценить, сколько времени займет поездка из дома на работу или приготовление чашки кофе, и способны прийти на ужин с друзьями в назначенный час. Даже если у нас не получается дать четкое определение тому, что такое «время», на интуитивном уровне мы осознаем, что это и как оно работает.

Как и судья Верховного суда, столкнувшийся с вопиющим проявлением бесстыдства, мы прекрасно понимаем, что за явление происходит перед нами, и в большинстве случаев этого достаточно. Однако определенные аспекты времени все же остаются загадочными и непостижимыми. Итак, действительно ли мы знаем, что означает это слово?

Что мы понимаем под временем

Мир никогда не преподносит нам абстрактные понятия на блюдечке с голубой каемочкой, чтобы мы могли спокойно разобраться в них и согласовать с другими понятиями. Все гораздо сложнее. В своей жизни мы сталкиваемся с феноменами, наблюдаем и описываем их. Затем на основании полученных данных мы формулируем понятия, которые помогают нам понимать, как замеченные феномены соотносятся с остальными составляющими нашего существования. Что касается трудноуловимых понятий, таких как энтропия, все более или менее ясно. Это не какие-то штуковины, на которые можно внезапно наткнуться, прогуливаясь по улице. Мы наблюдаем разнообразные природные явления и выделяем некую закономерность, шаблон, о котором удобнее всего мыслить в терминах нового понятия, например, под названием энтропия. Вооружившись этим новым полезным понятием и подмечая различные другие явления, мы уточняем и совершенствуем исходное определение энтропии.

Если же речь идет о такой примитивной, но в то же время основополагающей идее, как время, то тот факт, что понятие времени также изобрели, а не получили в готовом виде от щедрой Вселенной, куда менее очевиден — ведь мы в буквальном смысле не представляем себе жизни без времени. Тем не менее одной из важнейших задач науки (и философии) является превращение интуитивного понимания базовых концепций, подобных времени, в строгие научные понятия. По пути также выясняется, что мы вовсе не однозначно понимаем и используем термин «время». У него несколько разных значений, каждое из которых заслуживает подробного освещения.

Существуют три аспекта времени, и все они одинаково важны для нас.

1. **Время отмечает моменты во Вселенной.**

Время — это координата, оно помогает нам находить объекты.

2. **Время измеряет продолжительность периодов между событиями.**

Время — это то, что мы измеряем с помощью часов.

3. **Время — это среда, сквозь которую мы движемся.**

Время — вестник перемен. Мы движемся сквозь него или — что то же самое — время протекает сквозь нас: из прошлого через настоящее в будущее.

На первый взгляд все это звучит очень похоже. Время отмечает моменты, измеряет продолжительность и движется из прошлого в будущее — вроде бы эти идеи не противоречат друг другу. Но если копнуть глубже, то оказывается, что они не обязательно должны быть взаимозависимы — скорее они представляют собой логически независимые понятия, которые по какой-то случайности в реальном мире тесно переплетены. Почему же так происходит? Ответ на этот вопрос чрезвычайно важен — куда важнее, чем принято было думать в научной среде.

1. Время отмечает моменты во Вселенной

Однажды Джона Арчибальда Уилера, влиятельного американского физика, который ввел в обиход термин «черная дыра», спросили, что такое время. Немного подумав, он ответил так: «Время — это то, благодаря чему в природе не происходит все одновременно».

В этом высказывании кроется важная истина, и оно полно глубокой мудрости. Когда мы думаем о мире в рамках привычных бытовых понятий — не с точки зрения ученых или философов, а как обычные люди, живущие своей жизнью, — мы обычно идентифицируем «мир» как набор *вещей*, находящихся в различных *местах*. Физики объединяют все эти разнообразие места в единое понятие под названием «пространство». В зависимости от контекста они используют разные способы описания того, что находится в пространстве, — атомы, элементарные частицы или квантовые поля. Однако базовая идея остается неизменной. Вы находитесь в комнате, в которой есть мебель, несколько книг, какая-то еда, возможно, даже другие люди и обязательно какое-то количество молекул воздуха. Все подобные вещи — от ближайших к вам и до находящихся в межгалактическом пространстве — образуют «мир».

И мир изменяется. Мы видим объекты в определенных сочетаниях друг с другом, но мы видим их и в других сочетаниях (очень трудно составлять разумные предложения, описывающие эту идею, без отсылок к понятию времени). Но мы не видим эти разные сочетания «одновременно» или «одномоментно». Мы видим одну конфигурацию: вот вы сидите на диване, а у вас на коленях кошка, а затем другую: кошка прыгнула на пол, обидевшись, что вы погрузились в книгу и не уделяете ее царственной персоне достаточно внимания. Таким образом, мир предстает перед нами в разных конфигурациях снова и снова, и все эти конфигурации чем-то отличаются друг от друга. К счастью, мы можем пометить множество подобных конфигураций, для того чтобы не запутаться во всевозможных состояниях окружающего мира: Мурка уходит «сейчас», а сидела у вас на коленях «до этого». Такие метки и составляют то, что мы называем временем.

Итак, мир существует, и более того, мир *происходит* снова и снова. В этом смысле мир аналогичен множеству кадров на киноплёнке, только фильм на этой плёнке снят камерой, способной захватить в объектив всю Вселенную (а также, насколько нам известно, включает бесконечное число кадров, отделённых бесконечно малыми промежутками). Разумеется, плёнка — это не просто куча отдельных кадров. Они должны быть составлены в правильном порядке, иначе фильм попросту не будет иметь смысла. В этом и заключается роль времени. Про какие-то события мы можем не просто сказать, что «*вот это произошло*», и «*вот это тоже произошло*», и «*вот тот случай тоже имел место*». Мы можем сказать, что первое событие произошло *до* второго, а третье — *после него*. Время не просто метка на каждом из возможных экземпляров мира; оно обеспечивает порядок, помещая каждый из экземпляров на свое место в правильной последовательности.

Конечно же, в кадре настоящего фильма никогда не присутствует целая Вселенная. Любой фильм монтируется: одна сцена или угол съёмки внезапно сменяются другим. Попробуйте представить себе фильм, в котором такой переход происходит после каждого кадра, то есть каждый последующий кадр содержит совершенно новую сцену. Его невозможно было бы смотреть: происходящее на экране казалось бы нам случайной мешаниной изображений. Кажется, существует какой-то авангардный французский фильм, снятый как раз с использованием такой техники.

Настоящая Вселенная совсем не похожа на авангардный фильм. Мы чувствуем определенную непрерывность движения времени: если сейчас у вас на коленях сидит кошка, существует вероятность, что она может спрыгнуть и уйти, однако вы вряд ли задумываетесь об опасности того, что любимая Мурка через мгновение попросту дематериализуется. На микроскопическом уровне непрерывность не абсолютна: частицы могут появляться и исчезать или, по крайней мере, при определенных условиях трансформироваться в частицы другого типа. Однако реальность не подвергается каждое мгновение массовым изменениям.

Этот феномен непрерывности заставляет взглянуть на «мир» с новой точки зрения. Вместо множества разбросанных тут и там в пространстве вещей, постоянно меняющих конфигурацию, мы разом начинаем думать о *целой истории* мира или любой его составляющей. Мурка теперь для нас не совокупность упорядоченных клеток и жидкостей, а существо, прожившее целую жизнь — от момента рождения и до смерти. История объекта (кошки, планеты, электрона) во времени определяет его мировую линию — траекторию, которую объект прочерчивает в пространстве с течением времени.¹ Мировая линия объекта представляет собой всего лишь полный набор позиций, которые он когда-либо занимал в мире, отмеченных определенными моментами времени.

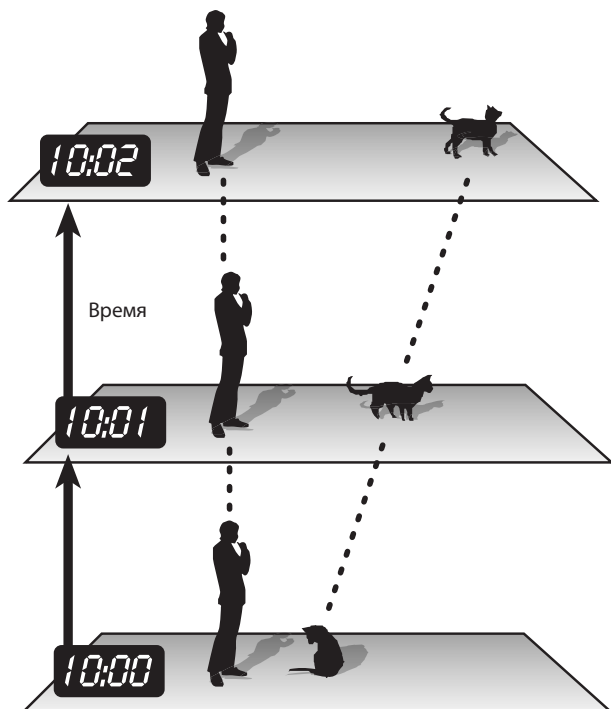


Рис. 1.1. Мир, упорядоченный по моментам времени. Объекты (включая людей и кошек) остаются в пространстве от момента к моменту, определяя тянущиеся сквозь время мировые линии

Поиск самих себя

Умение мыслить обо всей истории Вселенной разом в противоположность представлению о Вселенной как о наборе непрерывно перемещающихся туда-сюда объектов — это первый шаг к восприятию времени как еще одного пространства (мы будем подробно говорить об этом в следующих главах). Для слежения за вещами во Вселенной мы используем как временные, так и пространственные координаты. Предположим, вы хотите встретиться с другом за чашечкой кофе, или попасть на определенный сеанс в кинотеатре, или прийти на работу одновременно с коллегой. Для этого вы указываете время: «Давай встретимся в кофейне в шесть часов вечера в этот четверг».

Однако если вам необходимо встретиться с кем-то, то, разумеется, сообщить лишь о времени встречи недостаточно; вы также должны договориться о месте

(о какой именно кофейне идет речь выше?). Физики утверждают, что пространство «трехмерное». Это означает, что нам требуются три числа для уникального обозначения любого местоположения. Если имеется в виду какая-то точка, расположенная близко к Земле, то физик укажет значения широты, долготы и высоты над поверхностью Земли. Если же мы говорим о каком-то удаленном — в астрономическом смысле — местоположении, то его можно обозначить направлением в небе (это два числа, аналогичные широте и долготе) и расстоянием от Земли. Совершенно неважно, каким именно способом указывать эти три величины; самое главное, что их всегда ровно три. Данные величины называются *координатами* положения в пространстве. Просто представьте себе, что к каждой точке приклеена небольшая этикетка, сообщающая точное местонахождение этой точки в пространстве.

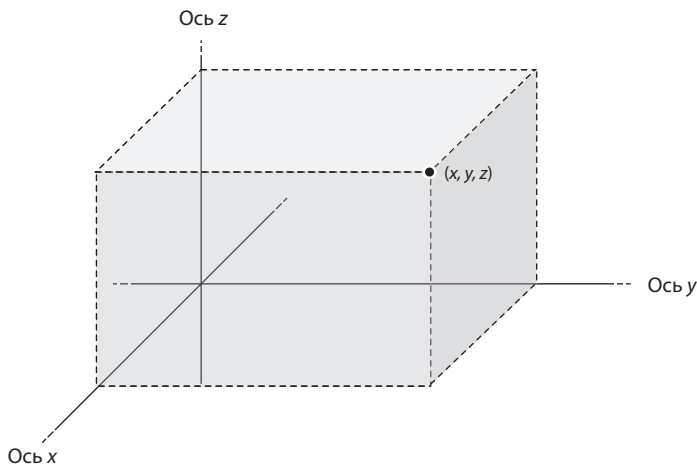


Рис. 1.2. Координаты любой точки в пространстве

В повседневной жизни у нас есть множество возможностей облегчить себе существование и избежать перечисления всех трех пространственных координат. Если вы предложите другу встретиться «в кофейне на углу Восьмой улицы и Мейн-стрит», то явным образом сообщите ему две координаты: «Восьмая» и «Мейн-стрит». Вряд ли кто-то предположит, что кофейня находится в воздухе или под землей, — очевидно, что здание стоит на земле. Этим удобством обозначения местоположений мы обязаны тому факту, что в быту нам чаще всего приходится иметь дело с двумерным пространством, то есть с объектами, расположенными вплотную к поверхности Земли. Однако для того, чтобы

абсолютно точно указать местоположение точки в пространстве, вам все же потребуется привести значения всех трех координат.

Каждая точка в пространстве встречается единожды в каждый момент времени. То, что можно описать определенным местоположением в пространстве в какой-то определенный момент времени, физики называют *событием* (не следует думать, что так говорят лишь о каких-то исключительно выдающихся событиях; любая случайная точка в пустом пространстве в любой конкретный момент времени зовется событием, если она обозначена уникальным образом). То, что мы называем «Вселенной», — это всего лишь множество событий: каждая точка пространства в каждый момент времени. Получается, что для того, чтобы выбрать уникальное событие, нам требуется четыре числа: три пространственные координаты и одна временная. Именно поэтому принято говорить, что Вселенная четырехмерна. Такое понятие чрезвычайно удобно, и мы будем часто использовать термин «*пространство—время*», подразумевая вышеописанное множество целиком, то есть все возможные точки в пространстве в любые возможные моменты времени.

Это огромный концептуальный скачок. Пожалуй, стоит даже притормозить на секунду, чтобы в полной мере осознать то, что мы только что сформулировали. Вполне естественно представлять себе мир в виде некоей трехмерной непрерывно меняющейся конгломерации («происходит снова и снова, но каждый раз слегка по-иному»). И что же мы делаем сейчас? Мы предлагаем взглянуть на все это бескрайнее множество, на всю историю мира как на единый четырехмерный объект, где дополнительным четвертым измерением служит время. В этом смысле время как бы нарезает четырехмерную Вселенную на копии пространства, датируемые моментами времени: вся Вселенная по состоянию на 10:00 20 января 2010 года, вся Вселенная по состоянию на 10:01 20 января 2010 года и т. д. Бесконечное множество таких срезов и составляет в итоге нашу Вселенную.

2. Время измеряет продолжительность периодов между событиями

Второй аспект времени связан с возможностью измерения периодов, отделяющих разные события друг от друга. Звучит очень похоже на то, о чем мы говорили в предыдущем разделе: «время отмечает моменты во Вселенной», не так ли? Однако существует отличие. Время не просто отмечает и упорядочивает различные моменты; оно также измеряет расстояние от одного момента до другого.

Когда, нацепив на себя воображаемую мантию философа или ученого, мы пытаемся разобраться в сути какого-нибудь изощренного понятия, очень помогает взглянуть на вещи с практической точки зрения: какое применение эта

идея находит в реальной жизни? Говоря о времени, мы обычно ссылаемся на значения, которые берем с циферблата часов. Если вы смотрите телевизионную передачу длительностью один час, то показания часов в конце передачи станут на час больше, чем были в ее начале. Именно это мы и подразумеваем, когда говорим, что за время вещания передачи прошел один час: в конце передачи часы показывают на час больше.

Однако что такое хорошие часы? Основной критерий хороших часов — постоянство; кому нужны часы, которые идут то слишком быстро, то, наоборот, слишком медленно? Возникает вопрос: слишком быстро или медленно по сравнению с чем? Очевидно, что по сравнению с другими часами. Во Вселенной есть определенные объекты, поведение которых отличается периодичностью — они делают одно и то же снова и снова. Существование таких объектов — эмпирический факт (а не некий логический вывод). Если поместить два таких объекта один рядом с другим, то мы сможем наблюдать в их поведении хорошо предсказуемый повторяющийся шаблон.

Вспомните планеты Солнечной системы. Земля вращается вокруг Солнца и ровно один раз в году оказывается в одном и том же положении по отношению к отдаленным звездам. Само по себе это мало что означает — это всего лишь известное всем определение «года». Однако выясняется, что Марс возвращается в одно и то же положение каждые 1,88 года. А вот в этом утверждении уже заложен огромный смысл; мы могли бы сказать, что Земля обращается вокруг Солнца 1,88 раза за то время, пока Марс совершает один оборот, не используя термин «год».² Аналогично, Венера обращается вокруг Солнца 1,63 раза за каждое прохождение Землей ее орбиты.

Ключ к измерению времени — это *синхронизированное повторение*: множество разнообразных процессов повторяются снова и снова, так что число повторений одного процесса за время, пока другой процесс возвращается к исходному состоянию, легко спрогнозировать. Земля вращается вокруг своей оси, и она совершает 365,25 таких оборота за один обход Солнца по орбите. Крохотный кристалл в кварцевых часах совершает 2 831 155 200 колебаний в течение одного оборота Земли вокруг своей оси (32 768 колебаний в секунду, умноженные на 3600 секунд в часе и на 24 часа в сутках³). Причина всемирно известной надежности кварцевых часов кроется в исключительной регулярности колебаний кристалла кварца. Даже если давление или температура изменятся, кристалл все равно будет совершать одно и то же количество колебаний за время одного оборота Земли вокруг своей оси.

Таким образом, когда мы называем часы хорошими, мы имеем в виду, что они демонстрируют предсказуемые повторения, согласованные с ходом всех

остальных хороших часов. В действительности тот факт, что подобные часы существуют, — это заслуга Вселенной, и мы должны быть ей за это очень благодарны. В частности, на микроскопическом уровне, где все происходит по правилам квантовой механики и зависит от свойств индивидуальных элементарных частиц (таких, как масса и электрический заряд), обнаруживаются атомы и молекулы, колеблющиеся с абсолютно предсказуемой частотой и формирующие обширную коллекцию превосходных, идеально синхронизированных часов. Вселенная без хороших часов — без процессов, частоту повторения которых относительно других процессов мы могли бы уверенно предсказывать, — была бы невозможно пугающей.⁴

Тем не менее найти хорошие часы не так просто. Традиционные методы хронометража зачастую находятся в зависимости от небесных тел — положения Солнца или звезд на небе, потому что у нас, на Земле, вечно творится всяческая непредсказуемая кутерьма. Существует легенда, согласно которой в 1581 году молодой Галилео Галилей совершил выдающееся открытие прямо во время скучной церковной службы в Пизе. Люстра у него над головой медленно покачивалась туда и обратно, и создавалось впечатление, что она качалась быстрее, когда это происходило с большим размахом (например, после порыва ветра), и медленнее, когда ее отклонение от центрального положения было совсем невелико.

Заинтригованный процессом, Галилей решил замерить время, необходимое для совершения одного размаха, используя единственное примерно периодическое событие, к помощи которого можно было прибегнуть, не вставая с места: биение собственного пульса. Обнаружилась крайне занимательная закономерность: в промежутки между отдельными махами помещалось приблизительно одинаковое число сердцебиений, независимо от того, насколько велик был размах. Амплитуда колебаний — расстояние, на которое люстра отклонялась от центральной точки, — никак не влияла на их частоту. И это не уникальное свойство люстр пизанских соборов, а неотъемлемая характеристика маятников, которым физики дали название *простых гармонических осцилляторов*. Именно по этой причине маятник считается базовой деталью напольных часов и других устройств слежения за временем: его колебания отличаются высочайшим постоянством. Часовое мастерство — это, в том числе, непрерывный поиск еще более надежных форм колебаний — от вибрации кристаллов кварца до ядерных резонансов.

В действительности нас интересуют не столько хитрости конструирования часов, сколько сам смысл времени. Мы живем в мире, полном самых разных периодических процессов, повторяющихся предсказуемое число раз по срав-

нению с другими периодическими процессами. В этом и заключается процесс измерения продолжительности временных промежутков: мы подсчитываем число повторений процесса. Заявляя, что телевизионная передача идет ровно час, мы подразумеваем, что кристалл кварца в наших часах совершает 117 964 800 колебаний с момента начала передачи и до ее конца (32 768 колебаний в секунду, умноженные на 3600 секунд в часе).

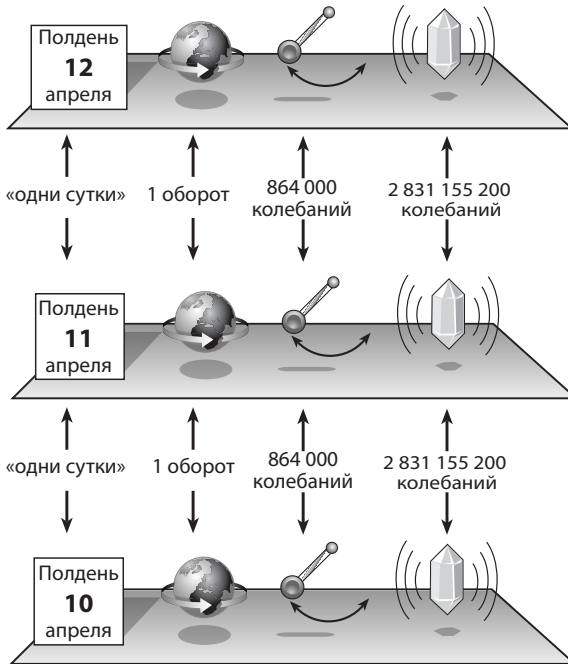


Рис. 1.3. Хорошие часы демонстрируют синхронизированные повторения. За одни сутки Земля делает один оборот вокруг своей оси, маятник с периодом в одну секунду совершает 86 400 колебаний, а кристалл кварца — 2 831 155 200 колебаний

Обратите внимание на то, что в попытке дать точное определение времени мы полностью исключаем из формулировки само это понятие. Так и должно происходить, если мы ставим себе целью дать хорошее определение явлению: невозможно качественно описать нечто в терминах самого себя. Мы можем дать прекрасное определение течению времени, отталкиваясь от факта существования синхронизированных событий. Заявить «передача идет один час» — то же самое, что сказать «с момента начала передачи до момен-

та, пока она не закончится, кристалл кварца в моих часах успеваает совершить 117 964 800 колебаний» (плюс-минус пара рекламных пауз). При желании все фундаментальные физические определения можно было бы сформулировать заново, устранив любые отсылки к понятию «время». Нужно всего лишь заменить их сложными описаниями того, как одни явления происходят одновременно с другими.⁵ Однако зачем нам это? Думать в терминах времени удобно; более того, такое мышление отражает простой базовый порядок существования вещей во Вселенной.

Замедление, остановка, искривление времени

Вооружившись отточенным пониманием того, что подразумевается под течением времени, мы можем ответить по крайней мере на один глобальный вопрос: что будет, если течение времени во всей Вселенной замедлится? Ответ таков: данный вопрос не имеет смысла. Замедлится относительно чего? Если под временем понимается то, что мы измеряем часами и все часы теперь идут настолько же «медленнее», насколько и все время по Вселенной, то нам попросту не удастся заметить никаких изменений. Для определения времени необходимо наблюдать синхронизированные повторения, но если частота одного колебания остается постоянной по отношению к какому-то другому колебанию, то все в порядке.

Мы, люди, *чувствуем* течение времени. Это происходит благодаря периодическим процессам, происходящим в нашем собственном организме: дыханию, сердцебиению, электрическим импульсам, пищеварению, ритмам центральной нервной системы. Человек представляет собой сложную взаимосвязанную систему разнообразных часов. Наши внутренние ритмы не так надежны, как маятник или кристалл кварца; они могут изменяться под воздействием внешних условий или нашего эмоционального состояния, из-за чего иногда возникает впечатление, что время то бежит, то еле тянется. Однако по-настоящему надежные часы, отсчитывающие мгновения внутри наших тел, — колеблющиеся молекулы, отдельные химические реакции — никогда не меняют скорости и не происходят быстрее или медленнее положенного.⁶

Подумаем теперь, а что же произойдет, если определенные физические процессы, которые мы считали «хорошими часами», рассинхронизируются: одни часы замедлятся или, наоборот, ускорятся по сравнению со всеми остальными. В такой ситуации разумно было бы обвинить в неточности эти конкретные часы, вместо того чтобы ставить под сомнение само время. Однако сделаем еще одно небольшое допущение: представим себе целый набор часов (включая молекулярные колебания и другие периодические процессы), одно-

временно изменивших скорость хода по сравнению со всем остальным миром. Тогда можно было бы начать сомневаться, не изменилась ли скорость течения времени исключительно внутри этого конкретного набора.

Рассмотрим крайний случай. В романе Николсона Бейкера «Фермата» рассказывается история человека по имени Арно Страйн, который обладает способностью «останавливать время» (правда, этот удивительный дар он использует в основном для наблюдения за обнаженными женщинами). Если бы время останавливалось повсеместно, это ровным счетом ничего бы не значило; суть в том, что Арно продолжает двигаться сквозь время даже тогда, когда вокруг него все замирает. Мы все понимаем, что это невозможно, однако поразмышлять о том, какими именно законами физики пренебрег автор, весьма поучительно. Описанный подход к остановке времени подразумевает, что все виды движения и ритмов в теле Арно продолжают обычным образом, в то время как любое движение и ритмы во внешнем мире намертво застывают. Разумеется, следует предполагать, что время продолжает течь также и для воздуха и жидкостей, находящихся внутри тела Арно, иначе его ждала бы немедленная смерть. Однако если бы весь воздух в окружающем пространстве перестал испытывать влияние времени, то каждая молекула застыла бы в точности в одном положении; следовательно, Арно был бы не способен двигаться, будучи заключенным в невидимую тюрьму из жестко зафиксированных молекул воздуха. Хорошо, проявим щедрость и допустим, что время продолжает течь обычным образом для любых молекул воздуха, находящихся достаточно близко к коже Арно (в книге присутствуют намеки на нечто подобное). Тем не менее если продолжать следовать первоначальному предположению, то ничто более в окружении Арно меняться не может. В частности, никакие звуки и свет не в состоянии достичь нашего героя; следовательно, Арно был бы абсолютно глух и слеп. Внезапно такое положение вещей оказывается далеко не выигранным для любопытной Варвары.⁷

Однако что если, несмотря на все физические и повествовательные препятствия, подобное явление могло бы произойти? Пусть остановить время вокруг себя невозможно, но вдруг существует способ замедления каких-то локальных часов? Если время действительно измеряется с помощью синхронизированных повторений и мы могли бы собрать группу часов, идущих слишком быстро по отношению к окружающему миру, но точно синхронизированных между собой? Можно ли в таком случае сказать, что внутри этой группы «время бежит быстрее»?

Ответ зависит от разных обстоятельств. Мы уже достаточно далеко отошли от реалий окружающего мира, так что давайте сформулируем несколько правил.

Нам повезло родиться во Вселенной, которая предлагает множество очень надежных часов. Если бы таких часов не было, то при измерении длительности промежутков между разными событиями мы бы не могли полагаться на время. Что касается мира «Ферматы», то можно сказать, что время замедлилось для Вселенной, находящейся за пределами Арно Страйна, или — и это абсолютно то же самое — что время для него ускорилося, тогда как остальной мир продолжил жить в обычном темпе. Второй вариант даже удобнее для восприятия. Однако точно так же мы могли бы заявить, что «время» нисколько не изменилось, единственное, что изменилось, — это законы физики элементарных частиц (массы и заряды разнообразных частиц) в сфере влияния Арно. «Время» — это не то понятие, которое окружающий мир способен преподнести нам в готовом и не допускающем двойственного толкования виде. Люди сами изобретают подобные понятия в попытках осознать устройство Вселенной. Если бы свойства нашей Вселенной были другими, то, возможно, мы бы понимали под «временем» нечто совсем иное.

Между тем можно описать вполне реальную ситуацию, когда разные группы часов будут измерять время по-разному. Для этого им всего лишь нужно двигаться сквозь пространство—время по разным путям. Это полностью совместимо с нашим заявлением о том, что «хорошие часы» должны измерять время одинаково, и проблема только в том, что сравнить часы, не находящиеся в пространстве рядом друг с другом, невозможно. Значение времени, измеренное при прохождении каждой из таких траекторий, может быть разным, но это не говорит о наличии каких-либо противоречий. Тем не менее это подводит нас к разговору о еще одной важной теории — теории относительности.

Извилистые дорожки сквозь пространство—время

Время не просто упорядочивает различные мгновения истории благодаря чуду синхронизированного повторения. Оно также сообщает нам, насколько «далеки друг от друга» эти события (во времени). Мы не просто говорим, что «1776 год был до 2010 года», мы можем дать куда более точную информацию: «1776 год был за 234 года до 2010 года».

Необходимо особо подчеркнуть принципиальное отличие «деления Вселенной на отдельные мгновения» от «измерения времени, прошедшего между событиями». Когда мы доберемся до теории относительности, это отличие будет играть критически важную роль. Представим себе, что вы честолюбивый временной⁸ инженер, и вам недостаточно видеть на наручных часах точное текущее время; вы хотели бы иметь возможность определять время любого другого события, случаемого в пространстве—времени. Логично задаться

вопросом: нельзя ли (гипотетически) сконструировать координату времени, которая охватит Вселенную целиком? Например, построить бесконечное число часов, синхронизировав их между собой, и разбросать по всему пространству? Тогда путешествуя по пространству—времени, мы в каждой точке встретили бы часы, показывающие абсолютное время.

Как мы вскоре убедимся, реальный мир не позволяет создать абсолютную универсальную координату времени. Очень долго люди верили в обратное, причем эта вера поддерживалась такими авторитетами, как Исаак Ньютон. В ньютоновском представлении о Вселенной существует один-единственный правильный способ нарезания ее на «состояния пространства в конкретный момент времени». И действительно, хотя бы в качестве мысленного эксперимента мы могли бы расставить часы по всей Вселенной и, таким образом, сконструировать координату времени, уникальным образом определяющую время любого интересующего нас события.

Однако в 1905 году мир услышал о специальной теории относительности Эйнштейна.⁹ Центральным концептуальным прорывом этой теории является тот факт, что наши два аспекта времени: «время отмечает различные моменты» и «время — это то, что измеряется часами» — *не эквивалентны* и даже не взаимозаменяемы. В частности, задумка с конструированием временной координаты путем разбрасывания часов по всей Вселенной *не работает*: если двое часов переместятся из одного и того же начального события в одно и то же конечное событие, но сделают это разными путями, то их путешествия продлятся разные периоды времени и, следовательно, часы рассинхронизируются. Это произойдет не потому, что мы недостаточно хорошо прочитали инструкции и выбрали «плохие» часы, а потому, что *продолжительность периодов времени, необходимых для перемещения из одного события в пространстве—времени в другое по разным траекториям, может быть разной*.

Если мыслить о времени как о еще одном виде пространства, то эта идея перестает казаться удивительной. Рассмотрим аналогичное заявление, но касающееся пространства, а не времени: длина двух путей, соединяющих одни и те же точки в пространстве, не обязательно будет одинаковой. Звучит абсолютно буднично, не так ли? Разумеется, мы можем соединить две точки в пространстве множеством путей самой разной длины: один путь будет прямым, а другой изогнутым, и длина изогнутого пути всегда будет больше. В то же время разница между *координатами* двух точек всегда остается постоянной, независимо от того, по какому пути мы приходим из первой точки во вторую. Причина этого в том — я не побоюсь повторить очевидный факт, — что пройденное расстояние далеко не всегда равно изменению координат. Вам когда-нибудь приходилось наблюдать

за игрой в американский футбол? Вспомните, как игрок с мячом обычно бежит через поле: он снует туда и сюда, уклоняясь от игроков противоположной команды, и в результате пробегает расстояние от 30-ярдовой линии до 80-ярдовой (в действительности он финиширует на 20-ярдовой линии противника, но приведенная выше формулировка лучше иллюстрирует суть обсуждения). Изменение координат составляет 50 ярдов и не зависит от того, насколько длинным или коротким был полный пройденный игроком путь.

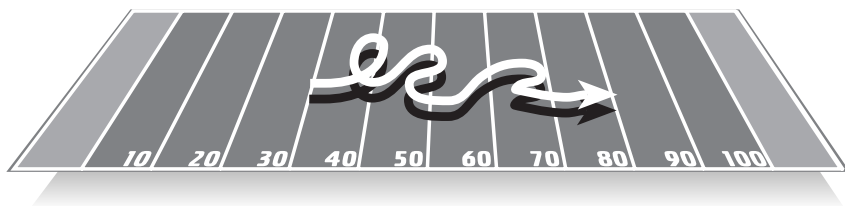


Рис. 1.4. Ярдовые линии служат координатами на поле для американского футбола. Координаты игрока, перебежавшего с мячом от 30-ярдовой линии к 80-ярдовой, изменяются на 50 ярдов, несмотря на то что длина фактически проделанного им пути может быть намного больше

Центральный элемент специальной теории относительности — это понимание того, что *время именно такое*. В соответствии со вторым нашим определением — «показатель, измеряемый часами» — время можно считать аналогией общей протяженности пути сквозь пространство; часы в этом случае играют роль одометра или иного инструмента, способного оценивать пройденное расстояние. Это совсем не то же самое, что понятие координаты, отмечающей различные срезы пространства—времени (аналогично ярдовым линиям на футбольном поле). При этом мы говорим не о какой-то технической проблеме, которую можно «исправить», построив лучшие часы или выбрав лучший путь через пространство—время; это неотъемлемое свойство Вселенной, она так работает, и нам необходимо научиться с этим жить.

Какой бы привлекательной и основательной ни выглядела идея рассматривать время как еще один вид пространства, между этими понятиями все же существуют принципиальные различия, и это не должно вызывать удивления. Два таких различия являются основополагающими элементами теории относительности. Во-первых, пространство характеризуется тремя измерениями, тогда как у времени измерение только одно; как нетрудно догадаться, этот суровый факт порождает важные последствия для физики. Во-вторых, в отличие от пространства, где прямая линия соответствует кратчайшему пути

между двумя точками, прямая траектория между двумя событиями в пространстве—времени соответствует самому долгому времени движения.

Однако самое очевидное, явное и несомненное различие между временем и пространством состоит в том, что в отличие от пространства, где никаких ограничений на направления не существует, время всегда течет только в одну сторону. Время направлено из прошлого в будущее, а все направления в пространстве абсолютно равноправны (разумеется, если мы говорим о дальнем космосе, свободном от таких локальных искажений, как Земля). В пространстве мы можем поменять направление на обратное, не нарушая законов физики, однако любые реальные процессы способны происходить во времени только в одном направлении и никогда в обратном. И сейчас мы подробнее поговорим об этом кардинальном отличии.

3. Время — это среда, сквозь которую мы движемся

Социологический эксперимент, описанный в начале главы, в котором вы должны были предлагать незнакомцам дать собственное определение «времени», также служит отличным маркером, позволяющим отличить физиков от нефизиков. В десяти случаях из десяти определение физика будет так или иначе связано с первыми двумя аспектами из перечисленных выше: время — это координата или же время — это инструмент измерения продолжительности периодов. Нефизик, с другой стороны, настолько же часто будет ссылаться на третий аспект: время — это то, что течет из прошлого в будущее. Время пронесится мимо, из «тогда» в «сейчас» и дальше в «потом».

Точно так же можно сказать, что не время летит, а мы движемся сквозь него, как будто время — это некая субстанция, внутри которой можно перемещаться. В послесловии к своей классической книге «Дзэн и искусство ухода за мотоциклом» Роберт Пёрсиг упоминает интересный вариант этой метафоры. Согласно Пёрсигу, древние греки «рассматривали будущее как нечто наступающее на них сзади, а прошлое отступало у них перед глазами»¹⁰. Если подумать, то такой вариант выглядит достовернее, чем тот, в котором мы шагаем навстречу будущему и подальше от прошлого. Благодаря своему опыту мы что-то знаем о прошлом, тогда как о будущем мы можем лишь строить гипотезы.

Общее в этих представлениях о времени то, что время воспринимается как *вещь*, к тому же вещь, способная *меняться* — течь вокруг нас или пронеситься мимо по мере того, как мы движемся вперед. Однако концептуализация времени как определенного вида динамичной субстанции, которая, возможно, даже может изменяться с разной скоростью в зависимости от обстоятельств, поднимает принципиальный вопрос.

Да что же это вообще должно означать?

Рассмотрим некий объект, который действительно течет в реальном мире, например реку. Мы можем смотреть на реку с пассивной или активной точки зрения: либо мы стоим на месте, а вода проносится мимо, либо мы в лодке плывем по реке, и тогда мимо нас по обеим сторонам проплывают берега.

Вода в реке действительно течет — это не вызывает сомнений. Это означает, что местоположение каждой конкретной капли воды *меняется со временем* — вот она здесь, а вот, спустя мгновение, уже там. Мы можем обоснованно говорить о *скорости* течения реки, подразумевая под этим скорость воды, — другими словами, расстояние, которое вода проходит за заданный период времени. Скорость можно измерять в милях в час или в километрах в секунду или в любых других единицах «расстояния, пройденного за интервал времени», которые вам больше нравятся. Скорость воды может в значительной степени изменяться в зависимости от места и момента: иногда течение реки ускоряется, а бывает, что замедляется. Когда мы говорим о реальном течении реальных рек, все эти термины звучат осмысленно.

Однако если попытаться препарировать заявление о «течении времени», то мы столкнемся с неразрешимой проблемой. Течение реки представляет собой изменение, происходящее с ходом времени. Но как понимать заявление о том, что «время меняется с ходом времени»? В буквальном толковании течение — это изменение местоположения со временем, однако у времени нет «местоположения». Так относительно чего время должно меняться?

Взглянем на этот вопрос с такой точки зрения: если время течет, то как мы могли бы описать его скорость? Нам пришлось бы использовать формулировку вроде « x часов в час» — интервал времени за единицу времени. И я могу точно сказать вам, чему будет равен x , — это единица, всегда только единица. Скорость времени составляет один час в час независимо от того, что там еще происходит во Вселенной.

Какой же урок мы должны извлечь из предыдущего обсуждения? Не совсем правильно представлять себе время как некий поток. Это соблазнительная метафора, которая, однако, не выдерживает критики. Для того чтобы изгнать из головы подобный стиль мышления, нужно прекратить представлять себя стоящими в некой точке Вселенной и омываемыми потоками времени. Вместо этого давайте думать о Вселенной — обо всем окружающем нас четырехмерном пространстве—времени — как об отдельной сущности, на которую мы смотрим извне, как внешние наблюдатели. Только в этом случае — перестав ставить себя в самый центр мироздания — мы сможем оценить истинную природу времени.

Взгляд из никогда

Невозможно на самом деле находиться за пределами Вселенной. Вселенная — это не какой-то объект, находящийся внутри еще более объемного пространства (насколько нам известно); под Вселенной понимается вообще все, что только существует вокруг нас, включая пространство и время. Таким образом, мы не пытаемся понять, как бы выглядела Вселенная при взгляде со стороны; посмотреть на нее извне попросту невозможно. В действительности мы пытаемся осознать неразрывную связь пространства и времени, существование пространства—времени как единой сущности. Философ Хью Прайс назвал это «взглядом из никогда» — видом на Вселенную, не привязанным ни к какому конкретному моменту времени.¹¹ Мы слишком хорошо знакомы с временем, ведь нам приходится иметь с ним дело каждый день в течение всей жизни. Вследствие этого мы находимся внутри времени, и у нас не получается относиться к нему отстраненно. Тем не менее полезно посмотреть на время и пространство как на взаимосвязанные составляющие одной общей картины.

Так что же мы видим, бросая взгляд вниз из «никогда»? Мы видим, что ничего не меняется со временем, ведь мы сами находимся вне времени. Вместо этого нашему взгляду предстает вся история целиком: все прошлое, настоящее и будущее. Такое представление о пространстве и времени можно сравнить с книгой, которую мы при желании могли бы начать читать с любого абзаца или даже разорвать на части и рассыпать страницы вокруг себя, в отличие от фильма, просмотр которого означает просмотр всех событий в определенной последовательности в предусмотренные моменты времени. Мы могли бы назвать это тральфамадорской точкой зрения в честь инопланетян из романа Курта Воннегута «Бойня номер пять». Как рассказывал главный герой книги, Билли Пилигрим:

Тральфамадорцы умеют видеть разные моменты совершенно так же, как мы можем видеть всю цепь Скалистых гор. Они видят, насколько все эти моменты постоянны, и могут рассматривать тот момент, который их интересует. Только у нас, на Земле, существует иллюзия, что моменты идут один за другим, как бусы на нитке, и что если мгновение прошло, оно прошло бесповоротно.¹²

Итак, мы забрались на этот величавый тральфамадорский насест и обзираем окрестности. Как же нам реконструировать привычное представление о потоке времени? То, что мы видим, — это связанные события, выстроенные в последовательность. Мы видим часы, показывающие 6:45, и человека, стоящего на кухне со стаканом воды в одной руке и кубиком льда в другой. Вот

другая сцена: на часах 6:46, и тот же человек все так же держит стакан воды, но кубик льда теперь плавает в стакане. И еще одна сцена: часы показывают 6:50, а в руках человека прохладный на ощупь стакан, ставший таким благодаря растаявшему в нем кубику льда.

В философской литературе это иногда называют «блочным временем» или «блочной Вселенной»: все пространство и все время рассматриваются как единый существующий блок пространства—времени. Для нашего обсуждения самое главное сейчас то, что мы *можем* думать о времени таким способом. Вместо того чтобы отталкиваться от представления о времени как о субстанции, текущей вокруг нас, или субстанции, через которую мы сами движемся, мы можем думать об упорядоченной последовательности связанных событий, совместно образующих всю Вселенную целиком. В таком случае понятие о времени восстанавливается на основании связей, существующих между событиями. Высказывание «этот кубик льда растаял за десять минут» эквивалентно утверждению, что «в момент, когда кубик льда закончил таять, часы показывали на десять минут больше, чем тогда, когда мы положили его в стакан». Мы не встаем в позу и не делаем громогласных заявлений о том, что *неправильно* думать о себе как об объекте, заключенном в поток времени. Просто когда пытаешься понять, почему время и Вселенная такие, какие они есть, а не какие-нибудь другие, намного полезнее и *удобнее* сделать шаг наружу и взглянуть на весь этот клубок событий из «никогда». Конечно, существуют и другие точки зрения. Попыткам разрешить загадку времени уже очень много лет, и немало копий сломано в спорах о том, что «реально» и что «полезно». Одним из самых влиятельных мыслителей, посвятивших свои работы изучению природы времени, считается Святой Августин — живший в V веке богослов и политик, Святой Отец, проповедовавший в Северной Африке. Вероятно, наибольшую известность Августину принесла разработка широко известного учения о первородном грехе, однако, будучи человеком широкого кругозора, он также нередко обращался к метафизическим вопросам. В Книге XI своей «Исповеди» он обсуждает природу времени.

Совершенно ясно теперь одно: ни будущего, ни прошлого нет, и неправильно говорить о существовании трех времен: прошедшего, настоящего и будущего. Правильнее было бы, пожалуй, говорить так: есть три времени — настоящее прошедшего, настоящее настоящего и настоящее будущего. Некие три времени эти существуют в нашей душе, и нигде в другом месте я их не вижу: настоящее прошедшего — это память; настоящее настоящего — его непосредственное созерцание; настоящее будущего — его ожидание.¹³

Августину не нравится идея с блочной Вселенной. Он презентист — человек, считающий, что реально лишь настоящее, а прошлое и будущее — это вещи,

которые мы сейчас, в настоящем, пытаемся восстановить исходя из имеющихся у нас знаний и сведений. Та же точка зрения, о которой мы говорили выше, вполне ожидаемо носит название «этернализма», а ее последователи утверждают, что прошлое, настоящее и будущее одинаково реальны.¹⁴

Послушав споры между этерналистами и презентистами, типичный физик воскликнет: «Да какая разница?». Это может казаться странным, но физиков не слишком волнует, какие понятия «реальны», а какие нет. Им интересно разобраться, как работает реальный мир, но для них этот вопрос сводится к построению всеобъемлющих теоретических моделей и сравнению их с эмпирическими данными. При этом главную роль играют не характеристики отдельных понятий в каждой модели («прошлое», «будущее», «время»), а структура в целом. И действительно, часто оказывается, что одну и ту же модель можно описать двумя совершенно разными способами, применяя абсолютно непохожие наборы понятий.¹⁵

Таким образом, наша цель как ученых — сконструировать модель реальности, успешно учитывающую все существующие представления о времени: время измеряется часами, время как координата пространства—времени, а также наше субъективное ощущение течения времени вокруг нас. Понять первые два аспекта нам помогает общая теория относительности Эйнштейна, о которой мы подробно поговорим во второй части книги. Однако третий по-прежнему во многом остается для нас загадкой. Причина, почему я бесконечно твержу о необходимости поставить себя вне времени для того, чтобы узреть всю Вселенную как единую сущность, заключается в том, что нам необходимо отделять понятие о времени как таковом от бытового восприятия времени с точки зрения текущего момента. Наша основная задача сейчас — увязать друг с другом эти две совершенно разные перспективы.

Примечания

¹ Для того чтобы не казаться слишком абстрактными, мы периодически будем использовать выражения, указывающие на направленность времени: «время течет», «мы перемещаемся в будущее» и т. д. Строго говоря, одна из наших задач — объяснить, почему подобный язык кажется таким естественным, в противовес формулировкам наподобие «существует настоящее, а также существует будущее», которые кажутся слишком напыщенными. Гораздо проще и полезнее иногда позволять себе некоторые вольности в изложении; это также дает нам возможность дополнительно поразмыслить над достоверностью предположений, на которых базируются привычные речевые обороты.

² Поскольку орбиты планет представляют собой эллипсы, а не идеальные окружности, скорость их обращения вокруг Солнца нельзя считать строго постоянной, и точный угол, отмечающий положение Земли, находится на своей орбите каждый раз, когда Марс за-

вершает свой оборот, зависит от времени года. Мы без особого труда учтем подобные детали, как только аккуратно определим единицы измерения времени.

- ³ Число колебаний кристалла в секунду зависит от его размера и формы. Кристалл в часах специально выбирается таким образом, чтобы он совершал 32 768 колебаний в секунду (это двойка в пятнадцатой степени). Значение намеренно выбрано так, чтобы электроника часов с помощью последовательного деления на два получила частоту, равную одному колебанию в секунду, которая необходима для перемещения секундной стрелки часов.
- ⁴ Роман Алана Лайтмана «Сны Эйнштейна» состоит из серии зарисовок о мирах с совершенно иной концепцией времени, отличной от наблюдаемой в окружающей нас реальности.
- ⁵ См., например: *Barbour, J. The End of Time: The Next Revolution in Physics. Oxford University Press, 1999.*; *Rovelli, C. (2008). Forget Time. <http://arxiv.org/abs/0903.3832>.*
- ⁶ Авторству Эйнштейна приписывают известную шутку: «Когда молодой человек проводит с симпатичной девушкой один час, для него он пролетает как одна минута. Но посадите его на горячую плиту, и одна минута покажется ему дольше часа. Это и есть относительность». Не уверен, что эти слова действительно сказаны Эйнштейном. Однако я точно знаю, что это не относительность.
- ⁷ Если бы мы задались целью восстановить научную целостность фантазии Бейкера, то могли бы прибегнуть к такой оговорке: возможно, время в окружающем мире не остановилось окончательно, а всего лишь чрезвычайно сильно замедлилось, и даже оставшейся скорости течения времени хватает для того, чтобы свет мог отражаться от объектов, на которые смотрит Арно, и фиксироваться его зрением. Близко, но все же мимо. Даже если все произойдет именно так, уменьшение скорости света приведет к огромному красному смещению: то, что в обычном мире воспринимается как видимый свет, для Арно превратится в радиоволны, которые наши несовершенные глаза попросту не в состоянии ухватить. Не исключено, что рентгеновское излучение вследствие красного смещения приблизится к видимой длине волны, однако наткнуться на вспышки рентгеновских лучей в повседневной жизни не так просто. (Несмотря на вышеизложенное, книга все же заставляет задуматься, насколько интересным был реалистичный сценарий описанных в ней событий.)
- ⁸ Временной — принадлежащий или относящийся к времени. Это превосходное понятие, и мы будем часто его использовать.
- ⁹ Ради соблюдения исторической справедливости стоит отметить, что хотя Эйнштейн сыграл ключевую роль в формулировке специальной теории относительности, по сути, она стала результатом совместной работы множества физиков и математиков, включая Джорджа Фицджеральда, Хендрика Лоренца и Анри Пуанкаре. В конечном итоге Герман Минковский сумел представить теорию Эйнштейна в терминах четырехмерного пространства—времени, которое теперь зачастую называют просто «пространством Минковского». Широко известно высказывание Минковского, датированное 1909 годом: «Представления о пространстве и времени, с которыми я хочу вас познакомить, сформировались на почве экспериментальной физики, и в этом их сила. Они радикальны. Отныне время само по себе и пространство само по себе становятся пустой фикцией, и только единение их хранит независимую реальность».
- ¹⁰ *Пёрсиг, Р. Дзен и искусство ухода за мотоциклом / Пер. с англ. М.: АСТ; «Астрель», 2012 (Pirsig, R. M. Zen and the Art of Motorcycle Maintenance. New York: Bantam, 1974).*

- ¹¹ Price, H. *Time's Arrow and Archimedes' Point: New Directions for the Physics of Time*. New York: Oxford University Press, 1996.
- ¹² Воннегут К. Колыбель для кошки. Бойня номер пять, или Крестовый поход детей. Дейч, 2008 (*Vonnegut, K. Slaughterhouse-Five*. New York: Dell, 1969).
- ¹³ Блаженный Августин. Исповедь / Пер. с англ. Библиотека Вехи, 2000 (*Augustine, Saint. Confessions* / Trans. by H. Chadwick. Oxford: Oxford University Press, 1998).
- ¹⁴ Отличные обсуждения на эту тему можно найти в работах: Callender, C. *Introducing Time* / Illust. by Ralph Edney. Cambridge: Totem Books, 2005; Lockwood, M. *The Labyrinth of Time: Introducing the Universe*. Oxford: Oxford University Press, 2005; Davies, P. C. W. *About Time: Einstein's Unfinished Revolution*. New York: Simon & Schuster, 1995.
- ¹⁵ Философы часто обсуждают эти разные концепции времени в терминах, сформулированных Мактаггартом в его знаменитой статье «Нереальность времени» *McTaggart, J. M. E. The Unreality of Time*, «*A Quarterly Review of Psychology and Philosophy*», 1908, 17, p. 456. Здесь Мактаггарт выделяет три разных понятия времени, называя их «рядами» (см. также *Lockwood, M. The Labyrinth of Time: Introducing the Universe*. Oxford: Oxford University Press, 2005). Ряд А — это последовательность событий, движущихся сквозь время и измеряемых по отношению к настоящему. Например, «один год назад» отмечает не фиксированный момент, а момент, меняющийся с течением времени. Ряд В представляет собой последовательность событий с постоянными временными метками, таких как «12 октября 2009 года». А ряд С — это всего лишь упорядоченный список событий, которым не присвоены никакие временные отметки: «*x* произошло перед *u*, но после *z*». Мактаггарт утверждает — в очень приблизительном описании, — что ряды В и С представляют собой фиксированные массивы, в которых отсутствует критически важный элемент изменения, и, следовательно, их недостаточно для описания времени. Однако ряд А сам по себе беспорядочен, так как любое конкретное событие можно одновременно классифицировать как «прошлое», «настоящее» и «будущее» в зависимости от того, по отношению к какому моменту времени оно рассматривается (момент вашего рождения для вас находится в прошлом, однако он был в будущем для ваших родителей, когда они только познакомились). Следовательно, делает вывод Мактаггарт, время не существует. Если у вас создалось впечатление, что это предполагаемое противоречие в большей степени следствие неудачного выбора слов, чем неотъемлемая характеристика самой природы времени, то вы на верном пути. Физик не видит никакого противоречия между выходом за пределы Вселенной с целью охватить взглядом все пространство — время сразу и признанием, что с точки зрения конкретного человека, находящегося внутри Вселенной, время действительно течет мимо.

Глава 2

Тяжелая рука энтропии

Есть — тоже довольно неприглядно. ... В рот начинает поступать всякая всячина, и после искусной обработки языком и зубами я переправляю результат на тарелку для окончательной рихтовки ножом, вилкой и ложкой. Это, по крайней мере, имеет хоть какой-то терапевтический эффект, если только речь не идет о супе или еще чем-нибудь жидком, — вот уж настоящее наказание. Затем следует утомительная процедура замораживания, разборки и раскладывания по полкам, пока не придет пора отнести эти продукты в «Гастроном», где меня ждет, надо полагать, быстрое и щедрое вознаграждение за труды. Там я таскаюсь по проходам с тележкой или корзинкой, расставляя банки и пакеты по их законным местам.

Мартин Эмис. Стрела времени¹

Забудьте о космических кораблях, пусковых установках и стычках с внеземными цивилизациями. Если вам нужна леденящая душу история, по-настоящему создающая впечатление пребывания в чужеродной среде, то вы должны повернуть время вспять.

Конечно, можно было бы взять обычный сюжет и рассказать его наоборот: он заключения к началу. Этот литературный прием известен под названием «обратной хронологии» и далеко не нов: еще Вергилий применял его в своей «Энеиде». Однако для того чтобы грубо вытряхнуть читателей из уютного гамака привычного представления о времени, ваши герои должны во всей красе продемонстрировать, что такое «жить назад». Причина дискомфорта, вызываемого подобными описаниями, заключается в том, что все мы — реальные люди — испытываем течение времени одинаково благодаря непрерывному увеличению энтропии во Вселенной. Увеличение энтропии и определяет стрелу времени.

В Зазеркалье

Френсис Скотт Фицджеральд в своей «Загадочной истории Бенджамина Баттона», по которой не так давно сняли фильм с Брэдом Питтом в главной роли,

рассказывает о жизни человека, родившегося стариком и с течением времени теряющего годы. В клинике, где Бенджамин появляется на свет, нячки вполне предсказуемо впадают в страшное недоумение.

Перед ним, запеленутый в огромное белое одеяло и кое-как втиснутый нижней частью туловища в колыбель, сидел старик, которому, вне сомнения, было под семьдесят. Его редкие волосы были седыми, длинная грязно-серая борода нелепо колыхалась под легким ветерком, тянувшим из окна. Он посмотрел на мистера Баттона тусклыми бесцветными глазами, в которых мелькнуло недоумение.

— В уме ли я? — рявкнул мистер Баттон, чей ужас внезапно сменился яростью. — Или у вас в клинике принято так подло шутить над людьми?

— Нам не до шуток, — сурово ответила сестра. — Не знаю, в уме вы или нет, но это ваш сын, можете не сомневаться.

Холодный пот снова выступил на лбу Баттона. Он зажмурился, помедлил и открыл глаза. Сомнений не оставалось: перед ним был семидесятилетний старик, семидесятилетний младенец, чьи длинные ноги свисали из колыбели.²

В рассказе нет упоминаний о том, как чувствовала себя при этом бедная миссис Баттон (хорошо, что хотя бы в киноверсии новорожденный Бенджамин размером с обычного младенца, пусть даже старого и покрытого морщинами).

Вследствие очевидной экстравагантности самой идеи течение времени в обратную сторону используется для создания комического эффекта. Алиса Льюиса Кэрролла, оказавшись в Зазеркалье, встречается с Белой Королевой и изумляется — оказывается, эта женщина умудряется жить одновременно вперед и назад во времени. Королева вдруг начинает вопить от боли и размахивать пальцем:

Алиса тут же спросила:

— Что случилось?

— Сейчас, сейчас случится! — снова завела Королева. — Я уколою палец булавкой, ой-ой-ой!

— И скоро вы собираетесь уколаться? — насмешливо спросила Алиса.

— Совсем скоро, — стонала Королева. — Начну прикалывать шаль булавкой и уколою-ууу! — заныла она.

И в это мгновение булавка растянулась, Королева протянула к ней руку, и...

— Осторожно! — крикнула Алиса. — Вы уколетесь!

Но было поздно — булавка впиалась в палец.³

Кэрролл (не родственник⁴) играет на основополагающей характеристике времени — том факте, что причина всегда предшествует следствию. Описанная

сценка заставляет нас улыбнуться, но в то же время служит напоминанием о том, какую важную роль стрела времени играет в формировании мироощущения.

Текущее вспять время может создавать не только комедийную картину, но и весьма трагичную. Роман Мартина Эмиса «Стрела времени» — классический пример описания жизни «в обратную сторону», даже с учетом того, что ассортимент произведений в данном стиле невелик.⁵ Повествование идет от имени бестелесного создания, живущего внутри другого человека, Одило Унфердорбена. Хозяин тела проживает жизнь в привычном нам понимании — вперед во времени, однако для фантомного повествователя время течет в обратную сторону. Его первое воспоминание связано со смертью Унфердорбена. У него нет никакой власти над Унфердорбеном, и он не в состоянии контролировать его действия или обращаться к его воспоминаниям. Он всего лишь пассивно проживает жизнь в обратном порядке. В начале романа Унфердорбен предстает перед нами в роли врача, и на рассказчика его работа оказывает самое отталкивающее впечатление: пациенты забредают в пункт первой помощи, где сотрудники высасывают лекарства из их тел, срывают бинты и отправляют несчастных людей в ночь истекающими кровью и кричащими от боли. Однако ближе к концу книги мы узнаем, что Унфердорбен был ассистентом врача в Освенциме и занимался тем, что создавал жизнь из ничего, превращая химические вещества, электричество и мертвые тела в живых людей. Только теперь, думает рассказчик, все наконец-то встает на свои места.

Стрела времени

Существует веская причина, почему изменение относительного направления движения времени на обратное — такой эффективный художественный инструмент: в реальном, не воображаемом мире подобное, в принципе, невозможно. У времени есть направление, и направление времени одинаково для всех. Никому из нас не доводилось встречаться с персонажами, подобными Белой Королеве, которые помнят о том, что мы воспринимаем как «будущее», в противоположность (или в дополнение) к «прошлому».

Однако что же мы в действительности имеем в виду, когда говорим, что у времени есть направление, что стрела времени указывает из прошлого в будущее? Представьте себе воспроизведение фильма в обратную сторону. В целом довольно быстро становится понятно, что предстоящее перед нами зрелище движется «не в ту сторону». Возьмем классический пример: ныряльщик в бассейне. Если после того, как человек нырнул, мы видим столб брызг и волны,

расходящиеся по воде, значит, все нормально. Но если мы видим, что в бассейне внезапно появляются волны, а потом столб брызг выталкивает ныряльщика из толщи воды на трамплин, после чего волны сразу же успокаиваются, то нам становится понятно: видеозапись воспроизводится задом наперед.

Определенные события в реальном мире всегда происходят в одном и том же порядке. Порядок неизменен: нырок — всплеск — волны. Никогда мы не наблюдаем обратного процесса: волны — всплеск — выталкивание ныряльщика в воздух. Мы можем взять молоко и добавить его в чашку черного кофе; но невозможно взять кофе с молоком и разделить две жидкости. Подобные последовательности действий называются *необратимыми процессами*. Нам никто не мешает фантазировать о том, как такие процессы выглядели бы, поверни мы их вспять, но если нам вдруг действительно придется увидеть что-то подобное, мы сразу же заподозрим в них кинематографические трюки и точно не воспримем их как достоверное отражение реальности.

Необратимые процессы — это самая суть стрелы времени. Одни последовательности событий возможны, другие нет. Важно также, что порядок событий — насколько мы можем судить об этом — един во всей наблюдаемой Вселенной. Возможно, когда-нибудь в какой-нибудь далекой солнечной системе мы найдем планету, населенную разумными существами, но мы не ожидаем, что для них будет обычным делом взять и разделить молоко и кофе (или их туземные аналоги) несколькими небрежными взмахами ложкой. Почему это нас не удивляет? Вселенная огромна; почему бы событиям не происходить в разных ее частях в разных последовательностях? Однако это невозможно. Для определенных типов процессов — грубо говоря, сложных действий, включающих множество индивидуальных движущихся частей, — существует некий допустимый порядок, каким-то образом встроенный в саму ткань бытия.

Стрела времени — центральная формирующая метафора пьесы Тома Стоппарда «Аркадия». Вот как Томасина, юное дарование, намного опередившее свое время, объясняет это понятие своему учителю:

Т о м а с и н а. Септимус, представь, ты кладешь в рисовый пудинг ложку варенья и размешиваешь. Получаются такие розовые спирали, как след от метеора в атласе по астрономии. Но если помешать в обратном направлении, снова в варенье они не превратятся. Пудингу совершенно все равно, в какую сторону ты крутишь, он розовеет и розовеет — как ни в чем не бывало. Правда, странно?

С е п т и м у с. Ничуть.

Т о м а с и н а. А по-моему, странно. РАЗместить не значит РАЗделить. Наоборот, все смешивается.

С е п т и м у с. Так же и время — вспять его не повернуть. А коли так — надо двигаться вперед и вперед, смешивать и смешиваться, превращая старый хаос в новый, снова и снова, и так без конца. Чтобы пудинг стал абсолютно, неоспоримо и безвозвратно розовым. Вот и весь сказ. Это называют свободой воли или самоопределением.⁶

Таким образом, стрела времени в нашей Вселенной существует, и от этого никуда не деться. Возможно даже, что это основополагающая характеристика нашей Вселенной; тот факт, что вещи случаются в таком порядке, как мы привыкли их видеть, но не в обратном, неразрывно связан с тем, как мы привыкли жить в нашем мире. И все же, почему так? Почему мы живем во Вселенной, где X часто случается после Y , но Y никогда не происходит вслед за X ?

Ответ лежит в концепции «энтропии», о которой я упоминал выше. Так же как энергия и температура, энтропия сообщает нам что-то о текущем состоянии физической системы, и в частности позволяет оценить, насколько система беспорядочна. У пачки аккуратно сложенных один на другой листов бумаги низкая энтропия; у той же пачки бумаги, хаотично разбросанной по столу, энтропия высокая. Энтропия чашки кофе, рядом с которой мы держим ложку молока, низкая, так как в данной системе существует четкое упорядоченное разделение молекул на «молоко» и «кофе». После смешивания энтропия этих двух жидкостей становится относительно высокой. Все необратимые процессы, позволяющие говорить о существовании стрелы времени, — мы можем превратить яйца в омлет, но невозможно собрать омлет обратно в яйца; духи распыляются по помещению, но не втягиваются обратно во флакон; кубики льда тают в воде, но в чашках с теплой водой не происходит спонтанного формирования кубиков льда, — обладают одним общим свойством: энтропия в них *увеличивается*, то есть система переходит из упорядоченного состояния в беспорядочное. Всякий раз, когда мы осмеливаемся побеспокоить Вселенную, мы увеличиваем ее энтропию.

Одной из основных задач этой книги является объяснение, как такое понятие, как энтропия, связывает в единое целое такой разнородный набор явлений. После этого мы углубимся в выяснение того, что же такое эта самая «энтропия» и почему она непрерывно увеличивается. Наша конечная цель — задать себе фундаментальный вопрос, стоящий перед современной физикой: почему в прошлом энтропия была так низка, что способна с тех пор постоянно увеличиваться?

Будущее и прошлое как верх и низ

Однако в первую очередь нам следует поразмышлять над более глобальным вопросом: действительно ли стоит удивляться тому, что определенные вещи происходят во времени в одном направлении, но не в противоположном? Кто вообще сказал, что порядок следования событий должен быть неизменным?

Давайте думать о времени как о некоторой метке, отмечающей события по мере того, как они происходят. В этом отношении время подобно пространству — они оба помогают нам находить вещи во Вселенной. Но между временем и пространством существует коренное различие: по своей природе все направления в пространстве равноправны, тогда как направления во времени (а именно «прошлое» и «будущее») совершенно непохожи. Здесь, на Земле, очень просто определять направления в пространстве: компас подсказывает, движемся мы на север, на юг, на восток или на запад, и ни у кого не возникает проблем с тем, чтобы сказать, где находится верх, а где низ. Но это не отражение каких-то глубоких базовых законов природы — все дело в том, что мы живем на гигантской планете и определяем различные направления относительно нее. Если бы вы парили в скафандре где-то в открытом космосе, вдалеке от любых планет, то все направления в пространстве были бы неразличимы: не было бы предпочтительных направлений «вверх» и «вниз».

Технически это означает, что законы природы характеризуются *симметрией*: все направления в пространстве абсолютно равноценны. «Перевернуть направление» в пространстве достаточно просто — сделайте фотографию и напечатайте снимок в зеркальном отражении или же просто-напросто посмотритесь в зеркало. Чаще всего отражение оказывается совершенно непримечательным. Сразу же напрашивается контрпример — письменный текст; в этом случае очень легко определить, смотрим мы на нормальное или на перевернутое изображение. Но для письма, как и для Земли, существует предпочтительное направление (вы читаете строчки в этой книге слева направо). Однако изображения большинства сцен, в которых отсутствуют человеческие творения, выглядят одинаково «естественно» как в исходном представлении, так и в зеркальном отражении.

Попробуем сравнить это со свойствами времени. Эквивалентом зеркального отражения картинки (изменения направления в пространстве на обратное) является «воспроизведение фильма задом наперед» (изменение направления времени на обратное). Во втором случае легко догадаться, что направление времени изменено: необратимые процессы, определяющие стрелу времени, происходят в другую сторону. Каково же происхождение этого коренного

различия между пространством и временем? Хотя наличие Земли у нас под ногами определяет «стрелу пространства», указывая на «верх» и «низ», очевидно, что это локальное, ограниченное явление, а не отражение фундаментальных законов природы. Мы можем вообразить себя в космосе, где нет предпочтительных направлений. Однако фундаментальные законы природы не определяют предпочтительное направление и во времени тоже — в этом смысле оно ничем не отличается от пространства. Если мы ограничим наше рассмотрение очень простыми системами всего с несколькими движущимися частями, движение которых отражает базовые законы физики, а не наши запутанные локальные условия, то стрела времени исчезнет: мы *не сможем* сказать, воспроизводится фильм обычным способом или же его крутят задом наперед. Вспомните люстру Галилео, спокойно покачивающуюся вперед и назад. Если бы вам показали съемку этой люстры, то вы не смогли бы определить, в какую сторону прокручивается киноплёнка — движение люстры настолько простое, что совершенно одинаково выглядит в обоих направлениях во времени.

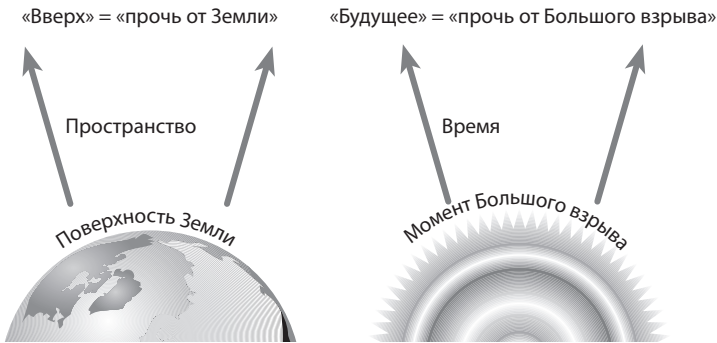


Рис. 2.1. Земля определяет предпочтительное направление в пространстве, а Большой взрыв определяет предпочтительное направление во времени

Таким образом, по крайней мере насколько мы можем об этом судить, существование стрелы времени нельзя считать свойством фундаментальных законов физики. Скорее, аналогично ориентации вверх — вниз в пространстве, определяемой Землей, предпочтительное направление времени также иллюстрирует характеристики нашего окружения. Если речь идет о времени, то мы говорим не о пространственной близости к какому-то влиятельному объекту — нет, в этом случае важнейшую роль играет временная близость к влиятельному событию: зарождению Вселенной. Источник нашей обозримой Вселенной — горячее и плотное состояние, известное под названием Большой взрыв, —

обладал крайне низкой энтропией. Влияние этого события ориентирует нас во времени, точно так же, как присутствие Земли ориентирует нас в пространстве.

Самый надежный закон природы

Принцип, определяющий существование необратимых процессов, сформулирован во втором начале термодинамики:

Энтропия изолированной системы либо остается постоянной, либо со временем увеличивается.

(Первое начало утверждает, что полная энергия остается постоянной.⁷) Многие считают второе начало самым надежным среди всех открытых человечеством физических законов. Если бы вас попросили спрогнозировать, какой из принятых в настоящее время физических принципов останется в силе и через тысячу лет, то вы с уверенностью могли бы поставить на второе начало термодинамики. Сэр Артур Эддингтон, ведущий астрофизик начала XX века, высказался об этом довольно категорично:

Если кто-то скажет, что ваша любимая теория Вселенной не согласуется с уравнениями Максвелла (законами, описывающими электричество и магнетизм), — тем хуже для уравнений Максвелла. Если обнаружится, что ее опровергают наблюдаемые явления, — ну что тут скажешь, эти экспериментаторы нередко запарывают свою работу. Но если ваша теория противоречит второму началу термодинамики, я не думаю, что у нее есть хоть какие-то шансы; ей остается лишь исчезнуть, потерпев унижительное поражение.⁸

Чарльз Перси Сноу, британский интеллектуал, физик и романист, вероятно, наиболее известен благодаря широкой пропаганде собственного убеждения, что «две культуры» естественных и гуманитарных наук отдалились друг от друга, но обе они должны быть частями нашего общего цивилизованного мира. Когда его спросили, какой основополагающий научный факт должен быть известен любому образованному человеку, он тоже выбрал второе начало термодинамики:

Множество раз мне приходилось бывать в обществе людей, которые по нормам традиционной культуры считаются высокообразованными. Обычно они с большим пылом возмущаются литературной безграмотностью ученых. Как-то раз я не выдержал и спросил, кто из них может объяснить, что такое второе начало термодинамики. Ответом было молчание или отказ. А ведь

здать этот вопрос ученому значит примерно то же самое, что спросить у писателя: «Читали ли вы Шекспира?»»⁹

Уверен, барон Сноу пользовался успехом на коктейльных вечеринках в Кембридже. (Справедливости ради замечу, что позднее он сам признался в том, что даже физики не до конца понимают второе начало термодинамики.)

Наше современное определение энтропии было предложено австрийским физиком Людвигом Больцманом в 1877 году. Однако понятие энтропии и ее использование во втором начале термодинамики отсылает нас к немецкому физiku Рудольфу Клаузиусу в 1865 год. А само второе начало было сформулировано еще раньше — французским военным инженером Николя Леонаром Сади Карно в 1824 году. Но как Клаузиус умудрился использовать энтропию во втором начале, не зная определения, и как Карно сумел сформулировать второе начало, вообще не используя понятие энтропии?

Девятнадцатый век был выдающейся эпохой в истории развития термодинамики — учении о теплоте и ее свойствах. Пионеры термодинамики изучали взаимодействие температуры, давления, объема и энергии между собой. Их интерес ни в коем случае не был абстрактным — дело происходило при зарождении промышленной эры, и в немалой степени этих ученых вдохновляло желание построить лучшие паровые двигатели.

Сегодня ученые понимают, что теплота — это форма энергии и что температура объекта представляет собой всего лишь меру средней кинетической энергии (энергии движения) атомов объекта. Однако в XIX веке ученые не верили в атомы, и они не очень хорошо понимали, что такое энергия. Карно, чью гордость ранил тот факт, что технология паровых двигателей англичан намного превосходила то, что могли предложить французы, поставил себе целью понять, насколько эффективным может быть такой двигатель: сколько полезной работы он может произвести, сжигая определенный объем топлива. Он доказал, что у этой эффективности есть фундаментальный предел. Сделав интеллектуальный скачок от реальных машин к идеализированным «паровым двигателям», Карно продемонстрировал, что существует наилучший двигатель, умеющий производить больше всего работы на определенном количестве топлива, функционируя при определенной температуре. Его главной идеей, что неудивительно, стала минимизация потерь тепла. Для нас тепло полезно, оно обогревает наши дома в холодную зиму, однако оно не помогает выполнять то, что физики называют «работой», — перемещать что-нибудь вроде клапана или маховика с места на место. Карно понял, что даже самый эффективный из реально возможных двигателей все равно не будет идеальным; какое-то количество энергии

будет теряться во время работы. Другими словами, работа парового двигателя — это необратимый процесс.

Таким образом, Карно осознал, что двигатели совершали что-то, что невозможно было отменить. И уже Клаузиус в 1850 году понял, что данный факт отражает закон природы. Он сформулировал свой закон так: «Теплота не может спонтанно начать течь от холодных тел к теплым». Наполните воздушный шар горячей водой и погрузите его в холодную воду. Каждый знает, что температуры начнут выравниваться: вода в воздушном шаре будет остывать, а вода в емкости, куда его погрузили, станет нагреваться. Противоположный процесс невозможен. Физическая система стремится к достижению *равновесия* — состоянию покоя, которое максимально однородно, а температуры всех его составляющих одинаковы. Благодаря этой догадке Клаузиус сумел заново получить те же результаты Карно для паровых двигателей.

Так каким же образом закон Клаузиуса (теплота не течет спонтанно от холодных тел к горячим) связан со вторым началом термодинамики (энтропия не уменьшается спонтанно)? Ответ прост: это один и тот же закон. В 1865 году Клаузиус переформулировал свой исходный принцип, используя новую величину, которой он дал название «энтропия». Рассмотрим постепенно остывающий объект, то есть объект, передающий тепло в окружающую среду. В каждый момент этого процесса возьмем количество потерянной теплоты и разделим на температуру объекта. Энтропия — это накопленное значение этой величины (количества теплоты, поделенного на температуру тела) за весь период действия процесса. Клаузиус доказал, что стремление теплоты покидать горячие объекты и перетекать к холодным в точности эквивалентно заявлению о том, что энтропия замкнутой системы может только увеличиваться и никогда не уменьшается. Состояние равновесия — это всего лишь такое состояние, в котором энтропия достигла максимального значения и ей некуда больше деваться; у всех соприкасающихся объектов одинаковая температура.

Если предыдущее объяснение вам кажется несколько абстрактным, то энтропию можно описать и гораздо более простыми словами: энтропия измеряет *бесплезность* определенного количества энергии.¹⁰ У галлона бензина есть энергия, и она полезна, — мы можем заставить ее работать. Процесс сжигания бензина для обеспечения работы двигателя не меняет полную энергию; если тщательно отслеживать все происходящее, то будет понятно, что энергия остается постоянной.¹¹ Однако с течением времени эта энергия становится все более бесполезной. Она превращается в теплоту и шум, а также в движение транспортного средства, на котором установлен двигатель, и даже это движение

в конечном счете замедляется из-за трения. Пока энергия превращается из полезной в бесполезную, энтропия увеличивается.

Второе начало термодинамики не подразумевает, что энтропия системы никогда не может уменьшаться. Например, мы могли бы изобрести машину, которая отделяла бы молоко от кофе. Но хитрость в том, что уменьшить энтропию одной вещи можно, лишь увеличив энтропию вокруг нее. У нас, людей, и у машин, которые мы могли бы применять для разделения молока и кофе, у еды и топлива, которые мы потребляем, — у всего этого есть энтропия, которая неизменно будет увеличиваться. Физики проводят различие между *открытыми системами* — объектами, которые взаимодействуют с внешним миром, обмениваясь энтропией и энергией, — и *замкнутыми системами* — объектами, которые, по сути, изолированы от внешнего влияния. В открытой системе, такой как кофе с молоком, которые мы помещаем в нашу машину, энтропия, несомненно, может уменьшиться. Однако в замкнутой системе, скажем, включающей кофе с молоком, а также машину, оператора машины, топливо и т. д., — энтропия всегда будет увеличиваться или, в крайнем случае, оставаться постоянной.

Возвышение атомов

Великолепные догадки Карно, Клаузиуса и их коллег о сути термодинамических явлений лежат все же в области «феноменологических» размышлений. Эти ученые видели общую картину, но не понимали механизмов, которыми она управляется. В частности, они не знали о существовании атомов, поэтому не могли рассматривать температуру, энергию и энтропию как свойства микроскопической среды; они мыслили о них как о реальных объектах, которые существуют сами по себе. В те дни, в частности, довольно распространено было представление об энергии как о некоей жидкости, умеющей перетекать из одного тела в другое. У этой «энергии-жидкости» даже было свое название: «теплород». И такого уровня понимания было совершенно достаточно для формулировки законов термодинамики.

Однако в ходе XIX века физики постепенно убеждались, что многие виды материи, с которыми мы имеем дело в реальном мире, можно рассматривать как различные конфигурации фиксированного числа одних и тех же элементарных составляющих — атомов (на самом деле в вопросе принятия атомной теории физиков в то время опережали химики). Это не новая идея, о ней упоминал еще Демокрит и другие мыслители античной Греции, но именно в XIX веке она завоевала популярность и начала развиваться по одной простой причине: только существование атомов могло объяснить многие наблюдаемые свойства

химических реакций, которые до этого приходилось принимать как данность. Ученым нравится, когда одна простая идея способна объяснить широкий диапазон наблюдаемых явлений.

Сегодня роль демокритовых атомов играют элементарные частицы, такие как кварки и лептоны, однако идея остается неизменной. То, что современный ученый называет атомом, — это самая маленькая частица материи, которая может выступать как отдельный химический элемент, такой как углерод или азот. Но теперь мы понимаем, что атомы — не неделимые частицы; они состоят из электронов, вращающихся вокруг атомного ядра, а ядро состоит из протонов и нейтронов, которые, в свою очередь, представляют собой различные комбинации кварков. Поиск правил, которым подчиняются эти элементарные строительные кирпичики материи, часто называют «фундаментальной» физикой, хотя более точным (и менее напыщенным) было бы название «элементарная» физика. Впредь я буду использовать термин «атом» в установившемся в XIX веке смысле — как определение химического элемента, а не согласно существовавшему в Древней Греции пониманию об элементарных частицах.

Фундаментальные законы физики обладают одной потрясающей особенностью: несмотря на то что они управляют поведением всей материи во Вселенной, вам не нужно знать их для того, чтобы жить обычной жизнью и справляться с повседневными задачами. Более того, вам было бы чрезвычайно затруднительно обнаружить их всего лишь на основе непосредственного опыта. Так происходит потому, что очень большие наборы частиц подчиняются отдельным, независимым правилам поведения, не привязанным к мелкомасштабным структурам, образующим окружающие нас объекты. Глубинные правила, действующие на эти структуры, называют микроскопическими, или просто фундаментальными, тогда как специальные правила, применимые только к большим системам, — это макроскопические, или эмергентные, правила. Без сомнения, поведение температуры, тепла и т. д. поддается описанию в терминах атомов; это предмет изучения особой дисциплины, называемой статистической механикой. Однако точно так же можно разобраться в поведении этих явлений, не зная об атомах абсолютно ничего. Именно этот феноменологический подход, называемый термодинамикой, мы обсуждаем в этой главе. В физике очень часто случается так, что в сложных макроскопических системах возникают динамические закономерности, являющиеся следствием из микроскопических правил. Несмотря на то что зачастую об этом говорят совсем иначе, никакой конкуренции между фундаментальной физикой и изучением эмергентных явлений нет; это две захватывающие области науки, и развитие обеих принципиально важно для понимания того, как устроен мир вокруг нас.

Одним из первых физиков, поддержавших атомную теорию, был шотландец Джеймс Клерк Максвелл, которому мы также должны быть благодарны за окончательную формулировку современной теории электричества и магнетизма. Максвелл совместно с Больцманом в Австрии (и продолжая работу многих других ученых) использовал идею атомов для объяснения поведения газов в рамках того, что было в то время известно под названием кинетической теории. Максвеллу и Больцману удалось установить, что атомы газа, заключенного в контейнер и содержащегося при определенной температуре, характеризуются определенным распределением скоростей: столько-то атомов двигаются быстро, столько-то медленно и т. д. Конечно же, эти атомы ударяются о стенки контейнера, каждый раз оказывая на нее крошечное воздействие. У суммарного влияния этих крошечных сил есть название: это всего-навсего давление газа. Таким образом, кинетическая теория объяснила свойства газов с помощью более простых правил.

Энтропия и беспорядок

Величайшим триумфом кинетической теории стало ее применение Больцманом для толкования энтропии на микроскопическом уровне. Больцман заметил, что при рассмотрении какой-то макроскопической системы мы не обращаем особого внимания на конкретные свойства каждого отдельного атома. Предположим, перед нами стоит стакан с водой, и кто-то украдкой заменяет несколько молекул воды, не изменяя при этом общие температуру, плотность и другие свойства системы. В таком случае мы не заметим подмены. Множество различных конфигураций атомов *неразличимы* с нашей, макроскопической точки зрения. Однако также Больцман обратил внимание на то, что объекты с низкой энтропией намного более чувствительны к изменению этих конфигураций. Если вы возьмете яйцо и начнете менять местами кусочки желтка и белка, то очень скоро изменения станут заметны. Системы, обладающие низкой энтропией, гораздо проще изменить путем перестановки атомов, в то время как системы с высокой энтропией устойчивы к подобным воздействиям.

Таким образом, Больцман взял понятие энтропии, которую Клаузиус и другие называли мерилем бесполезности энергии, и переформулировал ее в терминах атомов:

*Энтропия — это мера количества индивидуальных микроскопических расстановок атомов, которые для макроскопического наблюдателя неразличимы.*¹²



Рис. 2.2. Памятник на могиле Людвигу Больцману на центральном кладбище Вены. Высеченное на могильном камне уравнение¹³: $S = k \log W$ — это формула Больцмана, связывающая энтропию с количеством перестановок микроскопических частей системы, которые можно совершить без изменения ее макроскопического состояния (подробнее об этом — в главе 8)

Трудно переоценить важность этой догадки. До Больцмана энтропию рассматривали как феноменологическую термодинамическую величину, которая живет по собственным правилам (например, подчиняется второму началу термодинамики). Благодаря Больцману стало возможно *вывести* свойства энтропии из более глубоких базовых принципов. В частности, внезапно становится совершенно ясно, почему энтропия увеличивается:

Энтропия изолированной системы увеличивается, потому что существует гораздо больше способов создать высокую энтропию, чем низкую.

По крайней мере, эта формулировка сразу расставляет все по местам. Тем не менее она основана на принципиально важном допущении о том, что вначале у системы энтропия низкая. Если мы возьмем в качестве примера систему с высокой энтропией, то она будет находиться в равновесии — в ней вообще ничего не будет происходить. Слово «вначале» подразумевает асимметрию направлений времени, давая прошлому преимущество перед будущим. Эта цепочка рассуждений отсылает нас в самое начало времен, к низкой энтропии Большого взрыва. По какой-то причине из великого множества способов скомпоновать все составляющие Вселенной в самом начале был выбран только один — Вселенная находилась в особой, исключительной конфигурации с низкой энтропией.

Если отбросить эту оговорку, то не остается сомнений в том, что определение понятия энтропии, предложенное Больцманом, стало огромным скачком вперед в понимании стрелы времени. Однако и у этого скачка была своя цена. До открытий Больцмана второе начало термодинамики не вызывало сомнений — это был безусловный закон природы. Но у определения энтропии в терминах атомов есть важное следствие: энтропия не обязательно возрастает даже в замкнутой системе; она всего лишь *с большой вероятностью* будет увеличиваться (даже с подавляющей вероятностью, как мы видим, но все же). Предположим, у нас есть контейнер с газом, равномерно распределенным по нему и имеющим состояние с высокой энтропией. Если мы подождем достаточно долго, хаотичное движение атомов в конечном итоге приведет к тому, что все они — всего лишь на мгновение — окажутся вплотную к одной из стенок контейнера. Это называется статистической флуктуацией. Однако если вплотную заняться цифрами, то подсчеты покажут, что время, в течение которого имеет смысл ожидать такого статистического колебания, намного превышает возраст Вселенной. На практике мы вряд ли когда-нибудь застанем подобное событие. Тем не менее оно вероятно.

Некоторым людям это не нравилось. Они хотели, чтобы второе начало термодинамики было совершенно и абсолютно нерушимым, им претил тот факт, что это всего лишь утверждение, которое «истинно большую часть времени». Предположение Больцмана повлекло за собой массу споров и разногласий, однако в наши дни оно общепризнано.

Энтропия и жизнь

Все это очень увлекательно, по крайней мере для физиков. Однако следствия этих идей выходят далеко за пределы паровых двигателей и чашек кофе. Стрела времени заявляет о своем существовании самыми разными способами: наши тела с возрастом меняются, мы помним прошлое, а не будущее, следствие всегда появляется после причины. Оказывается, *все* эти явления можно отнести на счет второго начала термодинамики. Энтропия в буквальном смысле обеспечивает возможность существования жизни.

Основной источник энергии для жизни на Земле — это солнечный свет. Как объяснил нам Клаузиус, теплота естественным образом переносится от горячего объекта (Солнца) к более холодному (Земле). Однако если бы этим все и заканчивалось, то довольно скоро два объекта пришли бы в состояние равновесия друг относительно друга — достигли бы одинаковой температуры. В действительности так бы и произошло, если бы Солнце занимало все небо,

а не было бы для нас небольшим диском с угловым диаметром около одного градуса. Да, в этом случае мы бы увидели очень грустный мир. Он был бы абсолютно непригоден для существования жизни — и не только из-за чрезвычайно высокой температуры, а потому что этот мир был бы *статичным*. Ничто никогда не менялось бы в мире, достигшем равновесия.

В реальной Вселенной наша планета не нагревается до температуры Солнца, потому что Земля непрерывно теряет тепло, излучая его в окружающее космическое пространство. При этом единственная причина, почему это возможно, как не преминул бы отметить Клаузиус, заключается в том, что космическое пространство намного холоднее Земли.¹⁴ Таким образом, именно благодаря тому, что Солнце — это всего лишь горячее пятно на холодном небе, Земля не нагревается без перерыва, а вместо этого впитывает энергию Солнца, преобразует ее и излучает в космос. В ходе этого процесса, разумеется, энтропия увеличивается; у фиксированного объема энергии в форме солнечного излучения энтропия намного меньше, чем у того же объема энергии в форме излучения Земли.

Этот процесс, в свою очередь, объясняет, почему биосфера Земли — далеко не статичное место.¹⁵ Мы получаем энергию от Солнца, но это не означает, что она нагревает и нагревает нас, пока мы не достигнем равновесия; солнечная энергия — это излучение с очень низкой энтропией, поэтому мы можем использовать ее для своих нужд, а затем высвободить, уже в форме излучения с высокой энтропией. Все это возможно исключительно потому, что у Вселенной в целом и у Солнечной системы в частности в настоящее время относительно низкая энтропия (а раньше она была еще ниже). Если бы Вселенная была близка к температурному равновесию, в ней не происходили бы никакие процессы.

Ничто хорошее не вечно. Наша Вселенная является таким оживленным местом как раз потому, что энтропии есть куда увеличиваться — до тех пор, пока не будет достигнуто состояние равновесия, в котором все застопорится. Однако и это нельзя считать неизбежным. Возможно, энтропия Вселенной будет возрастать бесконечно. Или, наоборот, в какой-то момент энтропия достигнет максимального значения и остановится. Последний сценарий известен под названием тепловой смерти Вселенной, и предположение о таком конце возникло достаточно давно, в 1850-х годах, наряду с другими поразительными открытиями в термодинамике. Например, Уильям Томсон, лорд Кельвин — британский физик и инженер, сыгравший важную роль в прокладке первого трансатлантического телеграфного кабеля, в моменты рефлексии размышлял о будущем Вселенной:

Если бы Вселенная была конечной и обязана была подчиняться существующим законам, результатом неизбежно стало бы состояние всеобщего успокоения и смерти. Однако невозможно вообразить пределы распространения материи

во Вселенной, и в силу этого наука свидетельствует о бесконечном продолжении в бесконечном пространстве процесса трансформации потенциальной энергии в осязаемое движение и, следовательно, в теплоту, но не о существовании одного ограниченного механизма, работающего по инерции, как часы, и останавливающегося навечно.¹⁶

Здесь лорд Кельвин, можно сказать, предвосхитил будущее, указав на центральный вопрос всех дискуссий подобного рода, к которому мы также будем возвращаться на протяжении всей книги: способность Вселенной расширяться — конечна или бесконечна? Если конечна, то однажды, когда вся полезная энергия будет преобразована в бесполезные формы энергии, обладающие высокой энтропией, Вселенную ждет тепловая смерть. Но если энтропия может увеличиваться бесконечно, мы можем, по крайней мере, предположить возможность бесконечного роста и развития Вселенной в том или ином виде.

В своем знаменитом рассказе «Энтропия» Томас Пинчон заставил своих героев применить уроки термодинамики к социальному окружению.

— Тем не менее, — продолжал Каллисто, — он обнаружил в энтропии, то есть в степени беспорядка, характеризующей замкнутую систему, подходящую метафору для некоторых явлений его собственного мира. Он увидел, например, что молодое поколение взирает на Мэдисон-авеню с той же тоской, какую некогда его собственное побережало для Уолл-стрит; и в американском «обществе потребления» он обнаружил тенденции ко все тем же изменениям: от наименее вероятного состояния к наиболее вероятному, от дифференциализации к однообразию, от упорядоченной индивидуальности к подобию хаоса. Короче говоря, он обнаружил, что переформулирует предсказания Гиббса в социальных терминах и предвидит тепловую смерть собственной культуры, когда идеи, подобно тепловой энергии, не смогут уже больше передаваться, поскольку энергия всех точек системы в конце концов выровняется, и интеллектуальное движение, таким образом, прекратится навсегда.¹⁷

До сих пор ученым не удалось подтвердить правоту ни одной из существующих точек зрения; будет ли Вселенная расширяться вечно или однажды она все же успокоится в безмятежном состоянии равновесия — сказать невозможно.

Почему мы не помним будущее?

Итак, стрела времени описывает не только простые механические процессы; это неотъемлемое свойство самой жизни. Кроме того, от стрелы времени зависит важнейшее качество сознания человека — тот факт, что мы помним

прошлое, но не будущее. Согласно фундаментальным законам физики, прошлое и будущее абсолютно равнозначны, однако с точки зрения обычного человека, смотрящего на жизнь обычным взглядом, более непохожих вещей не найти. Образы прошлого хранятся у нас в голове в форме воспоминаний. Что же касается будущего, мы можем лишь что-то прогнозировать, однако никакие прогнозы не могут быть настолько же достоверными, как воспоминания о прошлом.

В конечном счете причина, почему у нас в голове формируется надежная память о прошлом, заключается в том, что в прошлом энтропия была ниже. В сложной системе, такой как Вселенная, базовые компоненты могут сложиться в несметное множество конфигураций вида «вы, с определенными воспоминаниями о прошлом, плюс вся остальная Вселенная». Если все, что вам известно, — это то, что вы существуете прямо сейчас и что у вас есть воспоминание о походе на пляж летом между шестым и седьмым классами, то у вас просто-напросто недостаточно информации, чтобы сделать достоверное заключение о том, что тем летом вы действительно ходили на пляж. Гораздо более вероятно, что ваше воспоминание об этом — всего лишь случайная флуктуация, как комната, в которой весь воздух скопился у одной стены. Для того чтобы воспоминания имели смысл, необходимо предположить, что Вселенная также была упорядочена определенным образом — что энтропия была ниже в прошлом.

Представьте, что вы идете по улице и замечаете на тротуаре разбитое яйцо. По виду растекшегося содержимого понятно, что яйцо лежит здесь совсем недолго. Предположение о том, что раньше энтропия была ниже, позволяет нам с уверенностью заявить, что буквально несколько минут назад яйцо было целым, но кто-то уронил его и разбил. Если говорить о будущем, то у нас нет никаких причин предполагать, что энтропия будет уменьшаться, и, таким образом, мы не можем предсказать судьбу этого яйца — слишком уж много вариантов развития событий. Возможно, оно останется на асфальте и покроется плесенью, возможно, кто-то смоет его с тротуара, а может быть, пробежит собака и съест его (маловероятно, что оно вдруг спонтанно пересоберется обратно в неразбитое яйцо, но, строго говоря, и такой исход тоже вероятен). Яйцо на тротуаре — как воспоминание в вашем мозге; это летопись события, случившегося ранее, но лишь в предположении, что и энтропия тогда была ниже.

Успешно отделять прошлое от будущего нам также позволяет связь «причина — следствие». В частности, причины случаются первыми (раньше по времени), а следствия происходят вслед за ними. Именно поэтому Белая Королева кажется нам такой нелепой дамой: как она может кричать от боли еще до того, как уколется палец? И снова виной всему энтропия. Представьте себе

ныряльщика, прыгающего в бассейн, — всплеск воды всегда следует за прыжком. Согласно микроскопическим законам физики, можно перегруппировать молекулы воды (а также окружающего воздуха, в котором распространяется звук) таким образом, чтобы произошел «антивсплеск» и вода вытолкнула бы ныряльщика из бассейна. Точность выбора позиции и скорости каждого отдельного атома при этом должна быть невообразимо высокой: если выбрать случайную конфигурацию всплеска, то вероятность того, что микроскопические силы при этом объединятся правильным образом и вытолкнут ныряльщика, будет близка к нулю.

Другими словами, одно из различий между «следствиями» и «причинами» — то, что «следствия» обычно подразумевают увеличение энтропии. Если два бильярдных шара столкнутся и раскатятся в разные стороны, энтропия не изменится и мы не сможем указать ни на один из шаров как на явную причину взаимодействия. Однако если в начале игры вы ударите кием по битку, чтобы разбить пирамиду (и тем самым вызвать заметное увеличение энтропии), то смело сможете сказать, что именно биток заставил шары раскатиться, несмотря на то что перед законами физики все шары равны.

Искусство возможного

В предыдущей главе мы сравнивали блочное представление о времени, в котором вся четырехмерная история мира, прошлое, настоящее и будущее одинаково реальны, с точкой зрения презентистов, что только текущий момент понастоящему реален. Однако существует еще одна концепция, которую иногда называют POSSIBILIZMOM: текущий момент существует, и *прошлое* существует, но будущее (еще) не существует.

Идея о том, что прошлое существует — в противоположность несуществующему будущему, великолепно согласуется с нашим неформальным пониманием того, что такое время и как оно работает. Прошлое уже произошло, в то время как будущее нам еще предстоит испытать: мы можем прикинуть возможные варианты будущих событий, но не знаем, какой в итоге окажется реальность. Конкретнее, когда мы говорим о прошлом, у нас есть возможность обратиться к собственным воспоминаниям или записям, описывающим прошедшие события. Какие-то записи будут более надежными, какие-то менее, но в целом они фиксируют реальность прошлого в форме, которая для будущего попросту недоступна.

Попробуйте вообразить такую картинку: ваш супруг или супруга говорит: «Давай поменяем планы на отпуск в следующем году? Вместо того чтобы лететь

в Канкун, давай бросим все и рванем в Рио!» Вы можете согласиться или не согласиться с этим предложением, но если вы все же решите поменять планы, то стратегия реализации этого решения будет очень простой: вы забронируете новые авиабилеты, закажете номер в другом отеле и т. д. Но если вы услышите: «Давай поменяем планы на отпуск в прошлом году! Как будто мы не ездили в Париж, а бросили все и рванули в Стамбул»? В этом случае ваша стратегия будет совершенно иной: вы подумаете о том, как аккуратно намекнуть на необходимость похода к врачу, а не о том, как изменить уже реализованные отпускные планы. Прошлое прошло, оно осталось в летописях, и не в наших силах изменить его. Таким образом, совершенно логично относиться к прошлому и будущему по-разному. Философы говорят о различии между Бытием — существованием в мире — и Становлением — динамическом процессе изменения, приносящем реальность в существование.

Нигде в известных нам физических законах вы не найдете упоминаний о том, что прошлое и будущее — разные вещи, что прошлое фиксировано, а будущее пластично. Глубинные микроскопические правила природы абсолютно одинаково работают вперед и назад во времени, в какой бы ситуации мы их ни применили. Если вам известно точное состояние Вселенной и все законы физики, то будущее, так же как и прошлое, для вас предрешено строже, чем в самых смелых снах Жана Кальвина о безусловном предопределении.

Попытки увязать между собой всевозможные убеждения, — что прошлое фиксировано и неизменно, будущее может меняться, а фундаментальные законы физики обратимы, — неизменно возвращают нас к понятию энтропии. Если бы мы знали точное состояние каждой частицы во Вселенной, мы могли бы с успехом как предсказывать будущее, так и узнавать прошлое. Однако это нам недоступно; мы располагаем лишь знаниями о некоторых макроскопических характеристиках Вселенной да крохами подробностей о частных состояниях. Обладая такой информацией, мы в состоянии предсказать лишь определенные широкомасштабные явления (солнце завтра взойдет), хотя наши знания также совместимы с огромным диапазоном отдельно взятых будущих событий. Что же касается прошлого, в нашем распоряжении имеется как знание о текущем макроскопическом состоянии Вселенной, так и понимание того факта, что в самом начале Вселенная находилась в состоянии с очень низкой энтропией. Этот крошечный фрагмент информации, называемый просто гипотезой о прошлом, превращается в огромное подспорье в деле реконструкции событий прошлого из настоящего.

Какой вывод мы должны сделать из всего этого? Наша *свободная воля* — возможность менять будущее путем принятия тех или иных решений, не рас-

пространяющаяся на события прошлого, доступна нам только потому, что у прошлого была низкая энтропия, а у будущего энтропия высокая. Будущее выглядит для нас чистой страницей, тогда как прошлое зафиксировано, несмотря на то что законы физики описывают их одинаково.

Поскольку мы живем во Вселенной с четко обозначенной стрелой времени, мы смотрим на прошлое и будущее по-разному не только с практической, повседневной точки зрения — в наших глазах эти вещи фундаментально отличаются. Прошлое записано в книгах, а на будущее мы можем повлиять своими действиями. Для космологии же наибольшее значение имеет то, что люди склонны объединять два направления исследований — «объяснение истории Вселенной» и «объяснение состояния Вселенной в начале времен», а будущее пусть само с собой разбирается. Наше неравноценное отношение к прошлому и будущему можно назвать *временным шовинизмом*; он крепко вжился в наш образ мыслей, и его крайне непросто искоренить. Однако законы природы никоим образом не поддерживают и не оправдывают ни временной, ни другие виды шовинизма. Размышляя о важных свойствах Вселенной, выясняя, что «реально», а что нет и почему в самом начале у Вселенной была низкая энтропия, нельзя ограничивать широту суждений, помещая прошлое и будущее по разные стороны баррикад. Объяснения, которые мы так стремимся найти, в конечном итоге никоим образом не должны зависеть от направления времени.

Главный урок, который мы должны извлечь из этого краткого экскурса в понятия энтропии и стрелы времени, прост: существование стрелы времени — одновременно важнейшая характеристика физической Вселенной и всепроникающая составляющая нашей повседневной жизни. Если честно, то даже неловко, что, несмотря на огромный прогресс, достигнутый современной физикой и космологией, мы все еще не получили окончательного ответа на вопрос, почему же Вселенная демонстрирует такую принципиальную асимметрию времени. Лично я нахожусь в замешательстве, но, так или иначе, любые трудности открывают новые возможности, и, размышляя об энтропии, мы можем узнать что-то новое о нашей Вселенной.

Примечания

- ¹ Эмис М. Стрела времени, или Природа преступления / Пер. с англ. М.: Астрель, 2011 (*Amis, M. Time's Arrow. New York: Vintage, 1991*).
- ² Фицджеральд Ф. Загадочная история Бенджамина Баттона / Пер. с англ. М.: Эксмо-Пресс, 2010 (*Fitzgerald, F.S. The Curious Case of Benjamin Button // Collier's Weekly, May 1922, p. 27*).
- ³ Кэрролл Л. Алиса в Зазеркалье / Пер. с англ. М.: АСТ, 2010 (*Carroll, L. Alice's Adventures in Wonderland and Through the Looking Glass. New York: Signet Classics, 2000*).

⁴ Очевидно.

⁵ Диарик (*Diedrick, J. Understanding Martin Amis*. Charleston: University of South Carolina Press, 1995) перечисляет еще несколько произведений, помимо упомянутых мной, в которых в той или иной форме используется прием обратного течения времени: «Сильвия и Бруно» Льюиса Кэрролла, «Завещание Орфея» Жана Кокто, «Никогда в жизни» Брайана Олдиса и «Время, назад» Филипа Дика. Для Мерлина, героя романа-эпопеи Теренса Уайта «Король былого и грядущего», время течет задом наперед, хотя Уайт не пытался использовать этот прием последовательно. Среди более свежих иллюстраций использования данной техники — «Гиперион» Дэна Симмонса; кроме того, тема обратного хода времени положена в основу «Исповеди Макса Тиволи» Эндрю Шона Грира и рассказа «Дневник, посланный за сотню световых лет» Грега Игана. В «Бойне номер пять» Воннегута приводится краткое описание «наоборот» бомбежки Дрездена зажигательными бомбами — Эмис упоминает его в послесловии к «Стреле времени».

⁶ *Stoppard T.* Аркадия. М.: Иностранка, 2008 (Stoppard, T. Arcadia, in Plays: Five. London: Faber and Faber, 1999).

⁷ Помимо первого начала термодинамики («в любом физическом процессе полная энергия сохраняется») и второго начала («энтропия замкнутой системы никогда не уменьшается»), есть также и третье начало: существует минимальное значение температуры (абсолютный ноль), при котором энтропия также находится на минимальном уровне. Эти три закона уместаются в простом высказывании: «Ты не можешь выиграть; не можешь остаться при своих; не можешь даже выйти из игры». Однако также есть нулевое начало: если две системы находятся в термодинамическом равновесии с третьей системой, то они находятся в термодинамическом равновесии друг с другом. Попробуйте здесь самостоятельно придумать какую-нибудь забавную аналогию.

⁸ *Eddington, A. S.* The Nature of the Physical World (Gifford Lectures). Brooklyn: AMS Press, 1927.

⁹ *Сноу Ч. П.* Две культуры и научная революция. Цитата воспроизведена по изданию: *Сноу Ч. П.* Портреты и размышления / Пер. с англ. М.: Прогресс, 1985. (*Snow, C. P.* The Two Cultures. Cambridge: Cambridge University Press, 1998).

¹⁰ В действительности справедливо было бы признать, что зачатки понятия энтропии и второго начала термодинамики были впервые озвучены отцом Сади Карно — французским математиком и офицером вооруженных сил Лазаром Карно. В 1784 году Лазар Карно написал трактат о механике, в котором утверждал, что создание вечного двигателя невозможно, так как в любой реальной машине полезная энергия будет рассеиваться вследствие дребезжания и тряски ее составляющих частей. Позднее он стал успешным предводителем армии революционной Французской Республики.

¹¹ На самом деле это не совсем верно. Общая теория относительности Эйнштейна, объясняющая гравитацию в терминах искривления пространства—времени, подразумевает, что «энергия» в привычном понимании этого термина не остается постоянной, например, в расширяющейся Вселенной. Мы подробнее поговорим об этом в главе 5. При рассмотрении же большинства двигателей внутреннего сгорания расширением Вселенной можно пренебречь, и для них энергия действительно остается постоянной.

¹² Конкретнее, под формулировкой «мера количества расстановок отдельных частей» мы подразумеваем «пропорциональность логарифму количества перестановок отдельных

частей». Подробное обсуждение логарифмов вы найдете в приложении, а в девятой главе детально рассматривается статистическое определение энтропии.

- ¹³ В англоязычной литературе универсальное обозначение «log» используется для обозначения любых логарифмов — как десятичных, так и натуральных. Это неудобно, поэтому десятичный логарифм иногда обозначают «lg», а натуральный — «ln». — *Примеч. пер.*
- ¹⁴ Температура поверхности Солнца составляет приблизительно 5800 кельвинов (один кельвин равен одному градусу Цельсия, только нулевая отметка по шкале Кельвина соответствует отметке -273 градусов по шкале Цельсия и представляет собой абсолютный ноль — минимальную возможную температуру). Комнатная температура — около 300 кельвинов. Температура космического пространства — или, точнее, фонового космического излучения, заполняющего космос, — около трех кельвинов. Интересное обсуждение роли Солнца как горячего пятна на холодном небе можно найти в книге: *Penrose P. Новый ум короля. О компьютерах, мышлении и законах физики.* — Изд-во ЛКИ, 2008 (*Penrose, R. The Emperor's New Mind: Concerning Computers, Minds, and the Laws of Physics.* Oxford: Oxford University Press, 1989).
- ¹⁵ Иногда вам могут встречаться заявления креационистов о том, что эволюция, как ее описывал Дарвин в своей теории естественного отбора, несовместима с принципом увеличения энтропии, поскольку история жизни на Земле — это история непрерывно усложняющихся организмов, предположительно происходящих из намного более простых форм. Эти бредовые заявления запросто разбиваются в пух и прах множеством доводов. На простейшем уровне: второе начало термодинамики относится к замкнутым системам, а организм (или вид, или биосфера) — это не замкнутая система. Мы чуть подробнее поговорим об этом в главе 9, но, по сути, этого достаточно.
- ¹⁶ *Thomson, W. On the Age of the Sun's Heat* // Macmillan's, 1862, 5, p. 288–293.
- ¹⁷ *Пинчон Т. Энтропия* / Пер. с англ. С. Кузнецова // Иностранная литература, 1996, № 3 (*Pynchon, T. Slow Learner.* Boston: Back Bay Books, 1984).

Глава 3

Начало и конец времени

Какое тебе дело до Вселенной? Ты в Бруклине!
Бруклин не расширяется!

Мама Элви Сингера. Энни Холл

Представьте себе, что вы бродите по книжному магазину ближайшего университета и зашли в раздел учебной литературы. Подойдя к полке, на которой выставлены книги по физике, вы решаете пролистать несколько томов по термодинамике и статистической механике. Вам интересно: что же там говорится об энтропии и стреле времени? К вашему безмерному удивлению (а вы ведь уже ознакомились с первыми двумя главами этой книги и краткой аннотацией на обложке), в учебниках нет ни слова о космологии. В них не упоминается Большой взрыв и не рассказывается о том, что концепция стрелы времени объясняется граничным условием, существовавшим в начале обозримой Вселенной, — ее крайне низкой энтропией.

На самом деле здесь нет никакого замалчивания важнейшей роли космологии, никаких тайных заговоров и никакого противоречия. Студентов, изучающих статистическую механику, в основном интересуют эксперименты, воспроизводимые в лабораториях или на кухнях здесь, на Земле. Проводя эксперимент, мы сами контролируем его условия; в частности, мы можем понизить энтропию изучаемых систем и посмотреть, что произойдет. Для того чтобы понять, как это работает, не нужно знать ничего о космологии и огромной Вселенной вокруг нас.

Однако наши цели куда грандиознее. Стрела времени — это намного больше, чем просто один из элементов каких-то конкретных лабораторных опытов; это неотъемлемая составляющая нашего мира. Традиционная статистическая механика успешно объясняет, почему яйцо легко превратить в яичницу, но яичницу превратить обратно в яйцо практически невозможно. Что она не в состоянии объяснить, так это почему, открывая холодильник, мы, в принципе, можем там обнаружить яйцо. Почему мы окружены идеально упорядоченными, законченными объектами, такими как яйца, и пианино, и научные книги, а не бесформенным хаосом?

Часть ответа на этот вопрос очевидна: объекты, окружающие нас в повседневной жизни, не относятся к замкнутым системам. Очевидно, что яйцо — это

не случайная конфигурация атомов, а тщательно сконструированная система, для построения которой требуется определенный набор ресурсов и доступная энергия, не говоря уж о курице. Однако мы могли бы задать аналогичный вопрос относительно Солнечной системы или галактики Млечный Путь. В каждом из этих случаев мы имеем дело с изолированными — с практической точки зрения — системами, энтропия которых тем не менее очень низка — намного ниже, чем могла бы быть.

Ответ, как известно, заключается в том, что Солнечная система не всегда была замкнутой системой; она появилась из межзвездного облака с более низкой, чем у нее, энтропией. А это облако сформировалось в существовавшей ранее галактике, энтропия которой была еще ниже. А эта галактика сформировалась из изначальной плазмы с еще более низкой энтропией. А эта плазма была порождена самой ранней Вселенной, у которой энтропия была самой низкой.

Ранняя Вселенная появилась в результате Большого взрыва. В действительности нам не очень много известно о ранней Вселенной — почему у нее была именно такая конфигурация, а не какая-то другая; это одна из загадок, с которыми мы пытаемся разобраться в этой книге. Однако именно чрезвычайно низкая энтропия ранней Вселенной лежит в корне окончательного объяснения стрелы времени в том виде, в каком она проявляет себя на наших кухнях, в лабораториях и воспоминаниях.

В обычных учебниках по статистической механике вы не найдете обсуждения этой увлекательной истории. Их авторы исходят из предположения, что нас интересуют системы, у которых в исходном состоянии относительно низкая энтропия, и начинают рассуждения с этой точки. Однако нам нужно больше: мы хотим знать, почему на одном конце времени у нашей Вселенной была такая низкая энтропия, породившая и задавшая направление стреле времени. Полагаю, для начала имеет смысл вспомнить, что нам известно о Вселенной в целом и как она развивалась от момента зарождения и до сегодняшнего дня.

Видимая Вселенная

Наша Вселенная расширяется, и она наполнена галактиками, постепенно отдаляющимися друг от друга. Мы напрямую взаимодействуем лишь с небольшой частью Вселенной и в попытке осознать общую картину неизбежно прибегаем к помощи аналогий. Мы сравниваем Вселенную с поверхностью воздушного шарика, на которой нарисованы маленькие точки, представляющие отдельные

галактики. Или же мы говорим, что Вселенная похожа на поднимающийся в духовке кекс с изюмом, в котором галактики — это изюминки.

Все эти аналогии просто ужасны. И не только потому, что как-то унижительно сравнивать нечто настолько величественное, как галактика, с крошечной сморщенной изюминкой. Настоящая проблема заключается в том, что любая подобная аналогия вызывает ассоциации, не применимые к реальной Вселенной. У воздушного шарика, например, есть внутренняя и внешняя поверхности, а также большое пространство снаружи, в которое он, собственно, и расширяется; у Вселенной ничего этого нет. У кекса есть края, а сам он находится внутри духовки и вкусно пахнет; для Вселенной вы не найдете аналогичных понятий.

Поэтому давайте попробуем зайти с другой стороны. Для того чтобы понять Вселенную вокруг нас, представим себе реальную ситуацию. Вообразите, что вы находитесь на природе в ясную безоблачную ночь и городских огней не заметно даже на горизонте. Что вы увидите, если взглянете на небо? В целях этого мысленного эксперимента давайте наградим себя идеальным зрением, бесконечно чувствительным ко всем разнообразным формам электромагнитного излучения.

Разумеется, вы увидите звезды. Для невооруженного глаза звезды — всего лишь точечные источники света, однако человечество уже давно выяснило, что каждая звезда — это огромный шар плазмы, сияющий за счет энергии внутренних ядерных реакций, и что Солнце — тоже самая настоящая звезда. Наша единственная проблема заключается в отсутствии ощущения глубины: невозможно сказать, насколько далеко от нас находится каждая из видимых звезд. Тем не менее астрономы изобрели хитрые способы измерения расстояния до близлежащих звезд, и оказалось, что нас разделяют просто невообразимые дистанции. Расстояние до ближайшей звезды, Проксима Центавра, составляет около 40 триллионов километров; даже путешествуя со скоростью света, мы добрались бы до нее примерно через четыре года.

Звезды распределены по небу неравномерно. Находясь на улице в нашу гипотетическую ясную ночь, мы обязательно заметили бы Млечный Путь — размытую белую полосу, протянувшуюся от горизонта до горизонта. В действительности то, что мы видим, — это не сплошная полоса, а множество близко расположенных звезд. Еще древние греки подозревали о таком устройстве Млечного Пути, а Галилео подтвердил их догадку, когда направил на небеса свой телескоп. Сегодня нам известно, что Млечный Путь — это гигантская спиральная галактика, сотни миллиардов звезд, формирующие диск с утолщением в центре. Наша Солнечная система находится в далекой провинции на самом краю диска.

Долгое время астрономы полагали, что «галактика» и «вселенная» — это одно и то же. Бытовало мнение, что Млечный Путь представляет собой изолированную группу звезд, парящую в пространстве, где кроме нее ничего больше нет. Однако сегодня мы знаем, что, помимо точечных звезд, на ночном небе также есть расплывчатые пятна, называемые туманностями; кто-то считал их отдельными гигантскими собраниями звезд. В начале XX века между астрономами разгорелись нешуточные споры на эту тему,¹ однако в конце концов Эдвин Хаббл сумел измерить расстояние до туманности М33 (тридцать третий объект в каталоге расплывчатых небесных объектов Шарля Мессье, предназначенном в помощь искателям комет) и обнаружил, что она гораздо дальше от нас, чем любая звезда. Оказалось, что М33, Галактика Треугольника — это группа звезд, по размеру сопоставимая с галактикой Млечный Путь.

Дальнейшие исследования показали, что Вселенная буквально кишит галактиками. Как сотни миллиардов звезд составляют Млечный Путь, так и обозримую Вселенную составляют сотни миллиардов галактик. Некоторые галактики (включая нашу) входят в скопления, или кластеры, которые в свою очередь образуют пласты и нити еще более крупномасштабной структуры. В среднем, однако, галактики распределены по пространству достаточно равномерно. В каком бы направлении мы ни смотрели, на любом расстоянии от Земли число галактик будет примерно одинаковым. В обозримой Вселенной везде все достаточно однообразно.

Большая и всё больше

Несомненно, Хаббл был одним из величайших астрономов в истории, но так получилось, потому что он оказался в правильном месте в правильное время. После окончания колледжа он некоторое время искал себя: был стипендиатом Родса, работал преподавателем, юристом, побывал в качестве солдата на Первой мировой войне и даже тренировал бейсбольную команду. Однако в конечном итоге он стал астрономом, получил в 1917 году степень доктора наук в Университете Чикаго и переехал в Калифорнию, чтобы занять должность в обсерватории Маунт-Вилсон недалеко от Лос-Анджелеса. По прибытии он обнаружил там новенький телескоп Хукера со 100-дюймовым зеркалом, самым большим в мире на тот момент. Именно благодаря этому 100-дюймовому рефлектору Хаббл получил возможность наблюдать разнообразные звезды в других галактиках и узнал, какие огромные расстояния отделяют их от Млечного Пути.

Тем временем другие астрономы во главе с Весто Слайфером занимались определением скорости спиральных туманностей, используя эффект Доплера.²



Рис. 3.1. Эдвин Хаббл, исследователь Вселенной, курящий трубку

Если объект по отношению к нам находится в движении, то когда он приближается, любая излучаемая им волна (например, световая или звуковая) сжимается, а если он движется прочь, то растягивается. Когда объект приближается к нам, вследствие эффекта Доплера тон издаваемых им звуков кажется выше, а когда он отдаляется, тон понижается. Аналогичным образом свет от движущихся к нам объектов оказывается синее (длина волны меньше), чем можно было бы ожидать, а свет от удаляющихся объектов — краснее (длина волны больше). Таким образом, для приближающихся объектов наблюдается синее смещение, а для удаляющихся — красное.

Слайфер обнаружил, что для абсолютного большинства туманностей наблюдается красное смещение. Такое открытие стало неожиданностью, ведь если бы эти объекты случайным образом двигались во Вселенной, то логично было бы ожидать равного количества туманностей с синим и красным смещением. Если бы туманности были небольшими облаками газа и пыли, мы бы сделали вывод о том, что какой-то неизвестный механизм выталкивает их из нашей галактики. Однако полученный Хабблом результат, о котором стало известно в 1925 году, исключил такую возможность. То, что мы наблюдаем, — это группа галактик, по размеру сравнимых с нашей, и все они убегают от нас, словно их что-то напугало.

Следующее открытие Хаббла расставило все по своим местам. В 1929 году он совместно со своим коллегой Милтоном Хьюмасоном сравнил красные смещения галактик с измеренным расстоянием до них и обнаружил поразительную закономерность: чем дальше находились галактики, тем быстрее они удалялись. Сегодня этот факт известен под названием *закона Хаббла*: кажущаяся скорость удаления галактики прямо пропорциональна расстоянию до нее, а коэффициент пропорциональности носит название *постоянной Хаббла*.³

Казалось бы, такой простой факт: чем дальше друг от друга вещи находятся, тем быстрее они разбегаются, но он скрывает важнейшее последствие: у нас нет никаких оснований считать себя центром исполинской космической миграции. У вас может возникнуть впечатление, что мы особенные и что все эти галактики убегают именно от нас. Однако попробуйте поставить себя на место инопланетного астронома, живущего в одной из других галактик. Если он

посмотрит на нас, то, разумеется, увидит, что Млечный Путь убегает прочь от его галактики. А если он посмотрит на небо в противоположном направлении, то увидит другие галактики, и они тоже будут удаляться, потому что с нашей точки зрения эти более далекие галактики движутся еще быстрее. Это потрясающее свойство Вселенной, в которой мы живем. Не существует никакого специального места или центральной точки, от которой всё разбегается в стороны. Каждая галактика отдаляется от всех остальных галактик, и относительно каждой из них поведение остальных объектов Вселенной одинаково. Слово галактики вообще не двигаются, а расширяется лишь пространство, разделяющее прикованные к своим местам галактики.

Это, собственно, и происходит с современной точки зрения. В полном соответствии с общей теорией относительности Эйнштейна мы говорим, что пространство — это не абсолютно фиксированная сцена, на которой разворачивается действие — происходит движение материи, а что это еще одна динамическая сущность, живущая собственной и весьма насыщенной жизнью. Утверждая, что пространство расширяется, мы имеем в виду, что между галактиками возникает все больше и больше нового пространства. Сами галактики не расширяются, и вы не расширяетесь, и отдельные атомы тоже не расширяются; все, что сохраняет форму благодаря неким локальным силам, остается одного и того же размера даже в расширяющейся Вселенной (хотя, возможно, вы как раз расширяетесь, но Вселенную в этом винить нельзя). Световая волна, которую не удерживают в неизменной жесткой форме никакие силы, будет растягиваться, испытывая космологическое красное смещение. И разумеется, галактики, находящиеся друг от друга достаточно далеко, чтобы на них не действовало взаимное гравитационное притяжение, также будут отдаляться.

Это — величественная и интригующая картина Вселенной. Последующие наблюдения подтвердили идею о том, что на очень больших масштабах Вселенная однородна: куда ни посмотри, везде более или менее одно и то же. Очевидно, что в более мелком масштабе она все же «комковатая» (вот галактика, а вот тут рядом с ней пустое пространство), но если рассматривать достаточно большие объемы пространства, то число галактик и количество вещества всегда будут примерно одинаковыми, и неважно, в каком месте Вселенной вы будете производить замеры. При этом она постепенно становится все больше, и примерно через 14 миллиардов лет любая отдаленная галактика из тех, что мы наблюдаем сейчас, окажется вдвое дальше.

Мы обнаруживаем себя посреди довольно гладкого распределения галактик, пространство между которыми расширяется, заставляя галактики отдаляться друг от друга.⁴ Но если Вселенная расширяется, то куда она расширяется?

Никуда. Мы говорим о Вселенной, поэтому нет нужды придумывать новые понятия в попытке осознать, куда именно она расширяется. Это Вселенная! Она не должна быть ни во что вложена, возможно, кроме нее вообще ничего не существует. Мы не привыкли мыслить подобным образом, потому что все объекты, с которыми мы сталкиваемся в повседневной жизни, находятся в пространстве. Однако Вселенная — это *и есть* пространство, так что нет никакой причины полагать, что «снаружи» может быть еще что-то.

Аналогично, у Вселенной вовсе не обязательно где-то должен быть край — она может простирается в космос на бесконечное расстояние. Или, если уж на то пошло, она может быть конечной и замыкаться на саму себя, как поверхность сферы. Есть все основания полагать, что непосредственные наблюдения никогда не позволят нам узнать истину. Скорость света конечна (один световой год в год, или 300 000 километров в секунду), и с момента Большого взрыва прошло конечное время. Глядя в космос, мы всматриваемся в прошлое. Так как Большой взрыв случился около 14 миллиардов лет тому назад, существует абсолютный предел того, насколько далеко назад нам удастся взглянуть.⁵ И что же мы видим? Относительно однородный набор галактик (в общей сложности около 100 миллиардов штук), неуклонно расширяющийся, в котором галактики стабильно отдаляются друг от друга. Однако за пределами нашей зоны видимости дела могут обстоять совсем по-другому.

Большой взрыв

Вы заметили, что я несколько раз небрежно упомянул некий *Большой взрыв*. Этот термин из профессионального жаргона физиков уже давно вошел в обиходную речь. Но из всех сложных и запутанных аспектов современной космологии именно с Большим взрывом связано наибольшее число вводящих в заблуждение или попросту недостоверных утверждений, в том числе высказываемых серьезными специалистами по космологии, которые, казалось бы, должны разбираться в этом вопросе лучше всех. Давайте остановимся на мгновение и посмотрим, что же нам в действительности известно, а что нет.

На больших масштабах Вселенная однородна, и она расширяется; пространство, разделяющее галактики, растет. Если предполагать, что число атомов во Вселенной остается неизменным,⁶ то с течением времени вещество должно становиться все более разреженным. Тем временем фотоны испытывают красное смещение, увеличивающее их длину волны и понижающее энергию, что означает постепенное понижение температуры Вселенной. Нашу Вселенную ожидает разреженное, холодное и одинокое будущее.

Однако давайте прокрутим пленку назад. Если сейчас Вселенная расширяется и охлаждается, значит, в прошлом она была плотнее и горячее. Вообще говоря (если не учитывать некоторые тонкости, связанные с темной энергией, о которой мы поговорим чуть позже), гравитационная сила заставляет объекты притягиваться друг к другу. Таким образом, ожидается, что мы сможем проэкстраполировать Вселенную назад во времени до более плотного состояния, и эта экстраполяция будет надежной. Другими словами, нет оснований ожидать какого-либо вида «отскока». Вселенная в «обратной перемотке» будет становиться только плотнее. Тогда логично предположить, что через какой-то конечный промежуток времени мы доберемся до момента, когда Вселенная была бесконечно плотной, то есть пребывала в состоянии сингулярности. Именно эту гипотетическую сингулярность мы и называем Большим взрывом.⁷

Обратите внимание на то, что Большой взрыв — это именно *момент* в истории Вселенной, а не *место* в пространстве. Точно так же, как в современной Вселенной не существует какой-то особой точки, определяющей центр расширения, вы не найдете и специально обозначенного места «здесь был Большой взрыв». Общая теория относительности утверждает, что размер Вселенной в момент сингулярности мог быть нулевым, а в любой момент после сингулярности — бесконечно большим.

Так что происходило до Большого взрыва? Многие обсуждения современной космологии на этом вопросе начинают буксовать. Вам будут часто встречаться заявления вроде: «До Большого взрыва время и пространство не существовали. Нельзя говорить, что Вселенная появилась в какой-то момент времени, потому что самого времени до тех пор не существовало. Задаваться вопросом, что происходило до Большого взрыва, — то же самое, что спрашивать, что находится к северу от Северного полюса».

Это все звучит весьма основательно и может даже быть правдой. Но может и не быть. Истина в том, что мы этого не знаем. Правила общей теории относительности позволяют сделать однозначный вывод: если во Вселенной существуют начинка определенного типа, значит, в прошлом точно случилась сингулярность. Однако в данном утверждении скрыто внутреннее противоречие. Сингулярность сама по себе должна быть моментом, когда искривление пространства—времени и плотность вещества бесконечны; следовательно, правила общей теории относительности к ней неприменимы. Корректнее было бы говорить, что общая теория относительности предполагает не существование сингулярности, а то, что Вселенная в своем развитии стремится к конфигурации, в которой сама теория относительности теряет

смысл. Это представление далеко от идеала; что-то происходит там, где общая теория относительности предполагает сингулярности, но мы не знаем что.

Возможно, общая теория относительности неправильно описывает гравитационные взаимодействия, по крайней мере в контексте самого начала Вселенной. Многие физики предполагают, что окончательно объяснить происходившее при зарождении Вселенной сможет только квантовая теория гравитации, примиряющая положения квантовой механики с идеями Эйнштейна об искривлении пространства—времени. Получается, что единственным честным ответом на вопрос, что же в действительности происходило в момент предполагаемого Большого взрыва, будет «не знаю». Мы сумеем найти ответ, когда у нас появится надежная теоретическая основа, позволяющая описывать экстремальные условия существования ранней Вселенной, однако пока что мы такой теорией не располагаем.

Возможно, Вселенная до Большого взрыва действительно не существовала, как и предполагает традиционная общая теория относительности. Но также вполне вероятно (и мне эта точка зрения близка по причинам, о которых мы поговорим чуть дальше), что пространство и время существовали до Большого взрыва; просто то, что мы называем «взрывом», в действительности было своеобразным переходом от одной фазы к другой. В своих изысканиях с целью понять стрелу времени, завязанных на низкую энтропию ранней Вселенной, мы неизменно будем возвращаться к этому вопросу. В этой книге я продолжу использовать термин «Большой взрыв» в смысле «момента в истории ранней Вселенной, случившегося прямо перед тем, как начали действовать правила традиционной космологии», вне зависимости от того, как этот момент описывался бы в более полной теории, и без учета наличия или отсутствия у Вселенной каких-либо границ или сингулярностей.

Горячее однородное начало

Хоть нам и неизвестно, что происходило со Вселенной в самом начале ее жизни, мы обладаем чрезвычайно обширными познаниями о том, что происходило потом. В момент зарождения Вселенная находилась в невероятно горячем и плотном состоянии. Затем пространство расширилось, а вещество рассредоточилось и охладилось, пройдя целую череду превращений. Данные, полученные в ходе множества наблюдений, подтверждают, что от момента Большого взрыва нас отделяет около 14 миллиардов лет. Даже если мы не знаем в деталях, как происходило образование Вселенной, нам известно, что это случилось за очень короткий промежуток времени: практически всю историю Вселенной образу-

ют события, произошедшие уже после мистического зарождения. Следовательно, вполне допустимо говорить, что с момента Большого взрыва прошло столько-то лет. Такое глобальное представление о Вселенной носит название *модели* Большого взрыва; она хорошо изучена с теоретической точки зрения и поддерживается горами эмпирических данных в противоположность гипотетической *сингулярности* Большого взрыва, которая для нас пока что остается загадкой.

Наше представление о ранней Вселенной базируется не только на теоретической экстраполяции; мы можем применять существующие теории для формулировки предсказаний, поддающихся реальной проверке. Например, когда Вселенной было всего около 1 минуты, она представляла собой ядерный реактор, синтезирующий из протонов и нейтронов гелий и другие легкие элементы; это был процесс, называемый первичным нуклеосинтезом. Сегодня мы наблюдаем распространенность подобных элементов, и это превосходно согласуется с предсказаниями модели Большого взрыва.

Мы также наблюдаем космический микроволновый фон — реликтовое излучение. Ранняя Вселенная была не только плотной, но и очень горячей, а горячие объекты — источники излучения. Благодаря излучению мы можем видеть в темноте: люди (а также другие теплые объекты) испускают инфракрасные лучи, которые можно обнаружить, если воспользоваться подходящим датчиком; в этом заключается принцип работы очков ночного видения. Чем теплее объект, тем более энергичным является его излучение (длина волны короче, а частота выше). Поскольку ранняя Вселенная была чрезвычайно горячей, она испускала огромное количество высокоэнергичного излучения.

Более того, ранняя Вселенная была еще и непрозрачной. Она была настолько горячей, что связи между электронами и атомными ядрами не могли сформироваться; электроны свободно летали в пространстве. Фотоны часто сталкивались с ними и отскакивали от свободных электронов, поэтому окажись вы там, вы не смогли бы разглядеть пальцы на своей руке. Однако в конечном итоге температура понизилась настолько, что электроны сумели привязаться к ядрам, да так там и остались, — этот процесс называется рекомбинацией, и он произошел примерно через 400 000 лет после Большого взрыва. Когда это случилось, Вселенная стала прозрачной, и свет получил возможность распространяться практически беспрепятственно, чем он до сих пор и занимается. Разумеется, на него распространяется эффект красного смещения, порождаемый космологическим расширением, поэтому горячее излучение периода рекомбинации в результате оказалось растянутым до микроволн (с длиной волны

около одного сантиметра), а температура Вселенной понизилась до 2,7 кельвинов ($-270,4$ градуса Цельсия).

Таким образом, история эволюции Вселенной согласно модели Большого взрыва (которую, как вы помните, не следует путать с самим загадочным моментом Большого взрыва) позволяет сделать надежное предсказание: наша Вселенная должна быть заполнена микроволновым излучением, распространяющимся во всех направлениях, — наследием тех времен, когда Вселенная была горячей и плотной. И действительно, реликтовое излучение было обнаружено Арно Пензиасом и Робертом Уилсоном в 1965 году в лаборатории Белла в Холмделе, штат Нью-Джерси. Самое интересное, что они его даже не искали — оба были радиоастрономами, которых раздражало это непонятное фоновое излучение, от которого никак не удавалось избавиться. Раздражение, надо сказать, несколько поутихло, когда в 1978 году им присудили Нобелевскую премию.⁸ Именно открытие микроволнового фона заставило последних приверженцев теории стационарной Вселенной (которая утверждает, что температура Вселенной не меняется со временем, но постоянно появляется новая материя) сменить точку зрения и окончательно принять модель Большого взрыва.

Подкрутим контраст во Вселенной

Вселенная — очень простое место. Да, она действительно содержит сложные вещи, такие как галактики, выдры и федеральные правительства, однако если исключить всевозможные локальные особенности, то на очень больших масштабах Вселенная практически везде одинакова. Ничто не иллюстрирует этот факт лучше космического реликтового излучения. В каком бы направлении мы ни посмотрели на небо, мы увидим микроволновое фоновое излучение, которое выглядит абсолютно так же, как излучение объекта, невозмутимо сияющего при некоторой фиксированной температуре — физики называют это излучением абсолютно черного тела. Однако в разных точках неба температура немного различается; в зависимости от направления разница может составлять до 0,001 %. Такие изменения температуры называются *анизотропиями* — это крохотные отклонения от температуры фонового излучения, которая в целом почти одинакова по всем направлениям.

Эти отклонения температуры от среднего значения отражают небольшие различия в плотности материи в разных местах ранней Вселенной. Заявление о том, что ранняя Вселенная была однородной, — это не просто упрощающее допущение; это поддающаяся проверке гипотеза, правильность которой

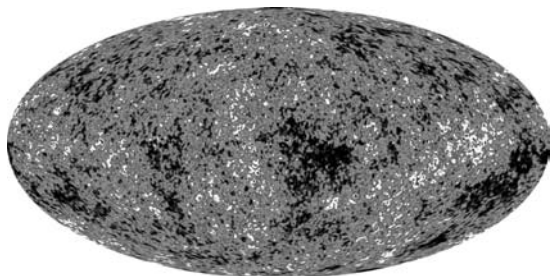


Рис. 3.2. Температурные анизотропии реликтового излучения, измеренные космическим аппаратом NASA под названием *Wilkinson Microwave Anisotropy Probe* («Детектор анизотропии реликтового излучения Вилкинсона»). В темных областях температура чуть ниже средней, а в светлых — чуть выше. Для того чтобы разница была более очевидной, контрастность этого рисунка пришлось сильно повысить

подтверждается реальными данными. В крупном масштабе Вселенная и сегодня однородна. Однако для того чтобы утверждать это, необходимо взять действительно очень большой масштаб — 300 миллионов световых лет или около того. На более мелких масштабах, таких как размер галактики, или Солнечной системы, или вашей кухни, Вселенная, конечно же, состоит из сплошных неровностей. Но так было не всегда. В начале времен даже на самых мелких масштабах наблюдалась поразительная однородность. Куда же она делась?

Ответ кроется в гравитационной силе, которая выкручивает ручку регулировки контраста нашей Вселенной. В областях, где материи чуть больше, чем в среднем по Вселенной, действуют силы гравитации, притягивающие объекты друг к другу; из более разреженных областей материя растекается, стремясь к более плотным. Благодаря этому процессу — эволюции структур во Вселенной — крохотные изначальные флуктуации в реликтовом излучении превращаются в галактики и структуры, которые мы наблюдаем сегодня.

Представьте себе, что мы живем во Вселенной, очень похожей на нашу и с таким же распределением галактик и кластеров, только эта Вселенная не расширяется, а, наоборот, сжимается. Можно ли утверждать, что по ходу сжатия этой воображаемой Вселенной галактики в ней станут сглаживаться, создавая однородную плазму, которую можно наблюдать в прошлом нашей настоящей (расширяющейся) Вселенной? Вовсе нет. Ручка регулировки контраста все равно будет поворачиваться в сторону увеличения, несмотря на сжатие Вселенной, а черные дыры и другие массивные объекты будут втягивать в себя вещество из окружающих регионов. Рост структур — это необратимый процесс, который естественным образом происходит по мере того, как мы двигаемся в будущее,

и не зависит от того, расширяется Вселенная или сжимается; он соответствует увеличению энтропии. Таким образом, относительная однородность ранней Вселенной, которую превосходно иллюстрирует изображение реликтового излучения, отражает низкую энтропию тех далеких времен.

Вселенная не стационарна

Как только вы соглашаетесь с идеей о том, что наша Вселенная, по сути, однородна и расширяется с течением времени, модель Большого взрыва начинает казаться вполне достоверным отражением реальности. Всего лишь отведите стрелки часов назад, и вы вернетесь к горячему плотному началу. Принципиальную основу концепции расширяющейся Вселенной сформулировал в конце 1920-х годов Джордж Леметр, бельгийский католический священник, который, до того как получить степень доктора наук в Массачусетском технологическом институте, обучался в Кембридже и Гарварде.⁹ (Кстати, несмотря на очевидный соблазн, Леметр, окрестивший начало Вселенной «первоатомом», не стал делать никаких теологических выводов из сформулированной им космологической модели.)

Однако модель Большого взрыва демонстрирует любопытную асимметрию, которая, впрочем, теперь уже не должна нас удивлять: кардинальное отличие времени от пространства. Идею о том, что материя на крупных масштабах однообразна, можно развить до «космологического принципа»: во Вселенной нет никаких «особенных» мест. Однако очевидно, что особенное *время* во Вселенной все же имеется: это момент Большого взрыва.

Некоторые специалисты по космологии, работавшие в середине прошлого столетия, считали такое явное неравенство — пространство однообразно, а время неоднородно — серьезным недостатком модели Большого взрыва и поставили себе целью разработать альтернативную модель. В 1948 году три ведущих астрофизика — Германн Бонди, Томас Голд и Фрейд Хойл — предложили модель стационарной Вселенной.¹⁰ Их теория базировалась на «идеальном космологическом принципе» — утверждении, что во Вселенной нет ни особенных мест, ни особенного времени. В частности, они утверждали, что Вселенная в прошлом не была ни горячее, ни плотнее, чем сегодня.

Пионеры теории стационарной Вселенной (в отличие от некоторых более поздних последователей) не были дремучими чудаками. Они знали, что Хаббл установил факт расширения Вселенной, и учитывали полученные им данные. Так каким образом Вселенная может расширяться, не разрежаясь и не остывая? Согласно теории стационарной Вселенной, в пространстве между галактиками

происходит непрерывное рождение новой материи ровно в таком количестве, чтобы компенсировать расширение Вселенной (на самом деле много и не надо: примерно один атом водорода на кубический метр каждый миллиард лет, так что не стоит опасаться, что ваша гостиная может внезапно переполниться материей). Рождение вещества происходит не само по себе; Хойл изобрел новый тип поля — С-поле, которое, как он надеялся, объяснит фокус с новым веществом, однако его идея так никогда и не завоевала популярности среди физиков.

С нашей пресыщенной современной точки зрения модель стационарной Вселенной производит впечатление некой сверхструктуры, базирующейся на весьма хрупких философских допущениях. Но точно так же выглядели многие великие теории до того, как столкнуться с суровой действительностью реальных данных. Формулируя общую теорию относительности, Эйнштейн определенно опирался на собственные философские предпочтения. Однако в отличие от общей теории относительности модель стационарной Вселенной не выдержала проверки фактическими данными.¹¹ Последнее, чего можно ожидать от модели, в которой температура Вселенной остается постоянной, — это объяснения реликтового излучения, явно указывающее на горячее начало. После того как Пензиас и Уилсон обнаружили фоновое микроволновое излучение, поддержка теории стационарной Вселенной быстро сошла на нет, хотя небольшая гвардия убежденных последователей по сей день продолжает изобретать самые замысловатые способы избежать наиболее логичных и очевидных способов интерпретации данных.

Как бы то ни было, размышления о модели стационарной Вселенной заставляют по-настоящему прочувствовать ошеломляющую природу времени в модели Большого взрыва. Несомненно, в космологии стационарной Вселенной точно так же существует стрела времени: энтропия безгранично увеличивается в одном и том же направлении, сейчас и во веки веков. Однако если взяться за дело серьезно, то станет очевидно, что проблема объяснения низкой начальной энтропии в стационарной Вселенной *бесконечно тяжела*. Какими бы ни были начальные данные, они должны быть наложены бесконечно давно в прошлом, и энтропия любой системы конечного размера на сегодняшний день была бы бесконечно велика. Задайся космологи целью достоверно объяснить низкую энтропию ранней Вселенной, модель стационарной Вселенной моментально потерпела бы крах.

В картине, рисуемой моделью Большого взрыва, дела обстоят более оптимистично. Мы все еще не знаем, почему у ранней Вселенной была низкая энтропия, однако, по крайней мере, нам известно, о каком именно периоде идет

речь. В интересующем нас состоянии Вселенная находилась 14 миллиардов лет тому назад, и ее энтропия была мала, но не равна нулю. В отличие от модели стационарной Вселенной в контексте Большого взрыва мы можем точно указать, где (хотя в действительности *когда*) находится проблема. К сожалению, до тех пор пока у нас на руках не будет универсальной космологической теории, объясняющей все на свете, мы не сможем утверждать, действительно ли это огромный шаг вперед по сравнению с моделью стабильного состояния.

Она ускоряется

Мы очень много знаем об эволюции Вселенной за последние 14 миллиардов лет. А что же будет дальше?

Прямо сейчас Вселенная расширяется, становясь все более холодной и разреженной. Многие годы проблемы космологии концентрировались вокруг одного главного вопроса: «Будет ли расширение продолжаться вечно или однажды Вселенная достигнет максимального размера и примется сжиматься навстречу к Большому коллапсу и концу времен?» Споры вокруг относительных достоинств каждой из альтернатив стали любимой игрой космологов практически с того самого момента, как мир узнал об общей теории относительности. Сам Эйнштейн склонялся к мнению, что Вселенная конечна как с точки зрения пространства, так и с точки зрения времени, и поддерживал идею о неизбежном коллапсе. Леметр же, наоборот, отдавал предпочтение идее бесконечной Вселенной, в которой процессы охлаждения и расширения будут вечными: лед, а не пламя.

Провести измерения, которые позволили бы эмпирическим способом выбрать из двух теорий единственно верную, оказалось неожиданно сложно. Общая теория относительности позволяет с определенностью заявить: в то время как Вселенная расширяется, гравитационная сила притягивает галактики друг к другу, замедляя расширение. Вопрос, по сути, заключался в том, достаточно ли во Вселенной материи для того, чтобы сжатие на самом деле случилось, или же Вселенная будет вечно потихоньку расширяться? Долгие годы этот вопрос оставался без ответа: наблюдения показывали, что материи во Вселенной *почти* достаточно для того, чтобы обратить процесс и заменить расширение сжатием, — почти, но все же не совсем.

Прорыв случился в 1998 году, причем благодаря совершенно иному методу. Казалось бы, вместо того чтобы измерять общую массу вещества во Вселенной и сравнивать результат с теоретическими прогнозами — хватит ли ее, чтобы обратить расширение Вселенной, можно измерить, насколько быстро расши-

рение замедляется. Однако, как всегда, гораздо проще сказать, чем сделать. По сути, нужно было повторить исследования Хаббла — измерить расстояния и видимые скорости галактик, а затем установить взаимосвязь между этими величинами, но с гораздо большей точностью и для огромнейших дистанций. В конечном итоге была выбрана техника, основанная на поиске сверхновых типа Ia — взрывающихся звезд, примечательных не только чрезвычайной яркостью (и потому заметных на космологических расстояниях), но и тем, что яркость этих звезд всегда одинакова (за счет чего видимую яркость можно использовать для оценки расстояния до сверхновой).¹²

Этот нелегкий труд взяли на себя две команды: одна под управлением Сола Пермуттера из Национальной лаборатории имени Лоуренса в Беркли, а вторая во главе с Брайаном Шмидтом из австралийской обсерватории Маунт-Стромло. Группа Пермуттера, которую составляли ученые, занимающиеся физикой элементарных частиц и увлекшиеся исследованием вопросов космологии, начала работу раньше и первой успешно применила технику поиска сверхновых, несмотря на изрядный скептицизм публики. В группе Шмидта были эксперты по астрономии сверхновых; она стартовала чуть позже, но сумела наверстать упущенное. Команды трудились в духе дружеского (а иногда не очень) соперничества, внося каждая со своей стороны неоценимый вклад в исследование, и слава авторов одного из величайших достижений в области исследования космоса по праву принадлежит обеим.

Между прочим, с Брайаном Шмидтом мы вместе учились в аспирантуре Гарварда в начале 1990-х годов. Я был теоретиком-идеалистом, а он — прагматичным наблюдателем. В те дни, когда технология крупномасштабных исследований космоса находилась в зачаточном состоянии, принято было считать, что измерение космологических параметров — мартышкин труд. Считалось, что эта бесплодная затея заранее обречена на провал из-за огромного количества неопределенностей, которые не позволяют определить размер и форму Вселенной с точностью, хотя бы немного приближенной к желаемой. Мы с Брайаном поспорили, удастся ли ученым точно оценить общую плотность вещества во Вселенной в ближайшие двадцать лет. Я сказал, что это реально; Брайан утверждал, что ничего не получится. В то время мы были аспирантами без цента в кармане, однако все же скинулись и купили маленькую бутылочку марочного портвейна, договорившись спрятать его в секретном месте и хранить там двадцать лет, пока не станет ясно, кто победил. К счастью для нас обоих, мы узнали правильный ответ задолго до назначенного срока; я выиграл пари, и в немалой степени благодаря труду самого Брайана. Мы распили бутылку портвейна на крыше гарвардского Куинси Хауса в 2005 году.

Результат оказался шокирующим: Вселенная вообще не замедляется. На самом деле она ускоряется. Если бы вы измерили видимую скорость разбегания галактик, а затем (гипотетически) вернулись через миллиард лет, чтобы повторить измерения, вы бы обнаружили, что скорость увеличилась.¹³ Как это может быть согласовано с предсказаниями общей теории относительности о том, что Вселенная должна замедляться? Как и в большинстве других подобных предсказаний, здесь играют большую роль неявные допущения. В данном случае мы предполагали, что основной источник энергии во Вселенной — вещество.

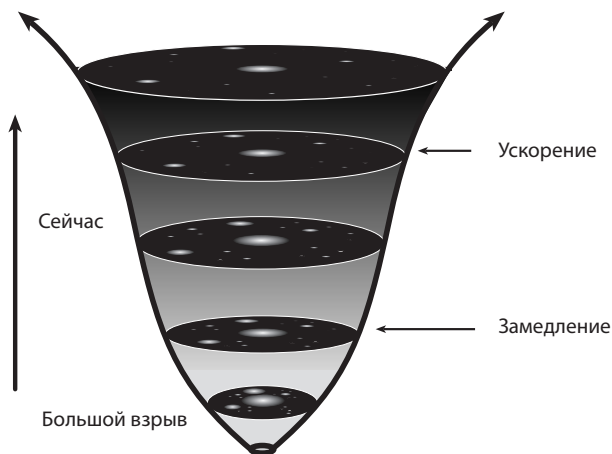


Рис. 3.3. Ускоряющаяся Вселенная

Для космолога вещество — это «любая группа частиц, каждая из которых движется со скоростью, намного меньшей скорости света» (если скорость частиц близка к скорости света, то космологи называют их излучением, независимо от того, идет речь об электромагнитном излучении в привычном понимании или нет). Эйнштейн уже давно открыл нам глаза на то, что частицы обладают энергией, даже когда совсем не движутся: формула $E = mc^2$ означает, что энергия абсолютно неподвижной, но обладающей массой частицы равна ее массе, умноженной на скорость света в квадрате. Для нашего текущего обсуждения важнее всего то, что по мере расширения Вселенной вещество разрывается.¹⁴ Общая теория относительности в действительности утверждает, что процесс расширения должен замедляться лишь в том случае, если энергия сосредоточивается. Если это не так — если плотность энергии, то есть величина энергии в каждом кубическом сантиметре или кубическом световом году

пространства остается примерно постоянной, тогда эта энергия придает постоянный импульс расширению Вселенной, и, следовательно, Вселенная ускоряется.

В действительности, конечно же, возможно, что общая теория относительности неправильно описывает гравитацию на космологических масштабах, и физики очень серьезно рассматривают такую возможность. Однако куда более вероятно, что общая теория относительности верна, а наблюдения свидетельствуют о том, что большая часть энергии во Вселенной существует вообще не в форме «вещества», а в форме какого-то поразительно упрямого неизвестно чего, которое не разреживается, даже когда пространство расширяется. Мы дали этому загадочному «неизвестно чему» название «темная энергия», и природа темной энергии — одна из любимейших тем исследования современных космологов, как теоретиков, так и экспериментаторов.

О темной энергии нам известно не очень много, однако мы знаем две главные вещи: она почти постоянна в пространстве (один и тот же объем энергии в любом произвольном месте) и также имеет постоянную по времени плотность (одинаковый объем энергии на кубический сантиметр в любой момент времени). Таким образом, простейшая из возможных моделей темной энергии включает *абсолютно постоянную* плотность энергии в любой точке пространства и времени. В действительности эта идея не нова, ее высказывал еще Эйнштейн. Он называл эту величину космологической постоянной, а сегодня мы зачастую используем термин «энергия вакуума». (Некоторые люди могут заявлять, что энергия вакуума и космологическая постоянная — это разные вещи. Не верьте им. Единственное различие заключается в том, в какую часть уравнения ее поставить, а это не играет никакой роли.)

Итак, о чем мы говорим? Мы предполагаем, что в каждом кубическом сантиметре пространства — в безлюдном неприветливом космосе, или в центре Солнца, или прямо перед вашим носом — содержится определенная энергия в дополнение к энергии частиц, фотонов и других вещей, реально присутствующих в этом маленьком кубике. Она называется энергией вакуума, потому что присутствует даже в вакууме, в совершенно пустом пространстве. Это минимальный объем энергии, присущий полотну самого пространства—времени.¹⁵ Энергию вакуума невозможно почувствовать, ее невозможно увидеть, с ней нельзя ничего сделать, и все же она есть. И мы знаем о ее существовании, потому что она оказывает решающее воздействие на Вселенную, заставляя далекие галактики убегать от нас все быстрее и быстрее.

В отличие от силы притяжения, создаваемой обычным веществом, энергия вакуума не притягивает, а отталкивает вещи друг от друга. Эйнштейн, впервые

предложивший идею космологической постоянной в 1917 году, в действительности стремился объяснить существование статической Вселенной, в которой ни расширения, ни сжатия не происходит. И это не было необоснованным философским позерством — ничего другого для понимания устройства Вселенной астрономия тех дней предложить не могла, а Хаббл открыл расширение Вселенной только в 1929 году. Таким образом, Эйнштейн представлял себе Вселенную как место, где притяжение галактик и отталкивание, связанное с космологической постоянной, находятся в хрупком равновесии. Услышав об открытии Хаббла, он пожалел, что вообще придумал эту космологическую постоянную: не поддайся он искушению, Эйнштейн мог бы предсказать расширение Вселенной задолго до фактического обнаружения этого явления.

Загадка энергии вакуума

В теоретической физике, если уж какое-то понятие было обнаружено, закрыть его обратно совсем непросто. Космологическая постоянная — это то же самое, что энергия вакуума, энергия пустого пространства самого по себе. Вопрос не в том, можно ли считать энергию вакуума хорошо определенным понятием, а в том, насколько большой должна быть энергия вакуума.

Современная квантовая механика описывает вакуум вовсе не как пустое скучное пространство; оно бурлит жизнью — его населяют *виртуальные частицы*. Одним из фундаментальных принципов квантовой механики является принцип неопределенности Вернера Гейзенберга: ни в какой системе невозможно зафиксировать наблюдаемые характеристики с идеальной точностью в одном-единственном уникальном состоянии, и к пустому пространству это тоже относится. Если пристально взглянуть в пустое пространство, мы увидим то и дело появляющиеся и исчезающие частицы, представляющие собой квантовые флуктуации самого вакуума. Никакой особенной загадки в виртуальных частицах не кроется, это не гипотетические частицы — они действительно существуют, и они оказывают поддающееся измерению воздействие, которое много раз наблюдали ученые, занимающиеся физикой элементарных частиц.

Виртуальные частицы обладают энергией, которая вносит свой вклад в космологическую постоянную. Для того чтобы приблизительно понять, чему должна быть равна космологическая постоянная, можно просуммировать вклады всех подобных частиц. Однако было бы неправильно учитывать вклады частиц с произвольно высокой энергией. Нашего традиционного понимания физики элементарных частиц недостаточно для описания высокоэнергетических событий: в какой-то момент приходится принимать во внимание эффекты

квантовой гравитации, объединяющей положения общей теории относительности и квантовой механики, а эта теория на сегодняшний день пока еще разработана не до конца.

Итак, вместо того чтобы апеллировать к правильной теории квантовой гравитации, которой у нас пока что нет, мы можем просто посмотреть, какой вклад в энергию вакуума вносят виртуальные частицы с энергией меньше порогового значения, за которым важную роль начинает играть квантовая гравитация. Этот порог носит название энергии Планка в честь немецкого физика Макса Планка, одного из пионеров квантовой теории, и равен приблизительно двум миллиардам джоулей (обычная единица измерения энергии).¹⁶ Попробуем суммировать энергию всех виртуальных частиц, энергия которых лежит в диапазоне от нуля до энергии Планка, а затем скрестим пальцы и проверим, совпадет ли полученное значение с фактически наблюдаемой энергией вакуума. Нас ждет абсолютное фиаско. Наша тривиальная прикидка значения энергии вакуума дает приблизительно 10^{105} джоулей на кубический сантиметр. Это очень много энергии вакуума. Результаты наблюдений показывают, что энергия одного кубического сантиметра — около 10^{-15} джоулей. Таким образом, наша оценка превышает экспериментальное значение в 10^{120} раз — это единица со 120 нулями. Вряд ли такое можно списать на ошибку эксперимента. Эту разницу называют величайшим расхождением между теоретическими ожиданиями и экспериментальной реальностью за всю историю науки. Для сравнения: общее число частиц в наблюдаемой Вселенной — около 10^{88} ; число песчинок на всех пляжах Земли — примерно 10^{20} .

Тот факт, что энергия вакуума оказывается намного меньше ожидаемой, представляет серьезную проблему — «проблему космологической постоянной». Однако существует и другая проблема: «проблема совпадения». Вспомните, что энергия вакуума по мере расширения Вселенной сохраняет постоянную плотность (то есть объем энергии в одном кубическом сантиметре не меняется), хотя плотность вещества уменьшается. Сегодня они не сильно различаются: на долю вещества приходится около 25 % энергии Вселенной, а энергия вакуума составляет оставшиеся 75 %. Однако соотношение существенно меняется, так как с расширением Вселенной плотность вещества уменьшается, а энергия вакуума нет. Во времена рекомбинации, например, плотность энергии вещества в миллиард раз превышала плотность энергии вакуума. Таким образом, тот факт, что сегодня эти величины находятся на сравнимом уровне — уникальный момент в истории! — действительно создает впечатление незаурядного совпадения. Никто не знает, почему так произошло.

В нашем теоретическом понимании энергии вакуума есть огромный пробел. Если отбросить в сторону переживания на тему того, почему энергия вакуума так мала, а ее плотность сравнима с плотностью энергии вещества, то на руках у нас останется феноменологическая модель, прекрасно объясняющая экспериментальные данные. (Точно так же, как Карно и Клаузиусу не нужно было ничего знать об атомах, чтобы делать полезные выводы об энтропии, нам не обязательно понимать происхождение энергии вакуума, чтобы увидеть, как она влияет на расширение Вселенной.) Первые непосредственные свидетельства существования темной энергии были получены при наблюдении сверхновых в 1998 году, и с тех пор суть картины была независимо подтверждена множеством разнообразных методов. Либо Вселенная ускоряется от легкого воздействия энергии вакуума, либо происходит нечто еще более драматичное и загадочное.

Глубочайшее будущее

Насколько мы можем судить, плотность энергии вакуума по мере расширения Вселенной не меняется (возможно, меняется, но чрезвычайно медленно, и мы пока не смогли измерить изменения — это важнейшая цель современной эмпирической космологии). Мы недостаточно хорошо изучили энергию вакуума, чтобы судить, как она будет вести себя в безгранично далеком будущем, однако очевидное первое предположение состоит в том, что она просто-напросто навсегда останется на текущем уровне.

Если это и правда так, и энергия вакуума будет нашим вечным спутником, то предсказать даже самое далекое будущее нашей Вселенной несложно. В деталях возможны интересные неожиданности, но общая картина относительно проста.¹⁷ Вселенная продолжит расширяться, охлаждаться и становиться все более и более разреженной. Далекие галактики будут убегать от нас все быстрее, а их красное смещение будет только увеличиваться. Промежутки времени между фотонами, прилетевшими к нам оттуда, будут становиться все больше, и в конце концов галактики исчезнут из виду. Во всей обозримой Вселенной не останется ничего, кроме нашей локальной группы галактик, связанных силой притяжения.

Галактики не вечны. Принадлежащие им звезды выжигают свои запасы ядерного топлива и умирают. Оставшиеся газ и пыль могут дать жизнь новым звездам, но рано или поздно будет достигнута точка убывающего плодородия, после чего все звезды в галактике умрут. Останутся только белые карлики (звезды, которые когда-то сияли, но теперь у них не осталось топлива), корич-

невые карлики (звезды, которые вообще никогда не сияли) и нейтронные звезды (которые раньше были белыми карликами, но под воздействием гравитации сколлапсировали). Эти объекты сами по себе могут быть стабильными или нет; наши текущие теоретические догадки говорят о том, что составляющие их протоны и нейтроны не могут быть идеально стабильными и в конечном итоге распадутся на более легкие частицы. Если это так (а надо признаться, что уверенности в этом нет), то разнообразные формы мертвых звезд со временем рассеются, превратившись в разреженный газ из частиц, разбегающихся в никуда. Это произойдет нескоро; считается, что от описанных событий нас отделяет примерно 10^{40} лет. Для сравнения: возраст текущей Вселенной — около 10^{10} лет.

Помимо звезд, существуют также черные дыры. У большинства крупных галактик, включая нашу, в центре находятся гигантские черные дыры. В галактике, сравнимой по размеру с Млечным Путем и состоящей приблизительно из 100 миллиардов звезд, масса черной дыры может превышать массу Солнца в несколько миллионов раз — невероятно много по сравнению с любой обычной звездой. По сравнению же с целой галактикой черная дыра невелика, но все же она продолжит расти, проглатывая любые горемычные звезды, которым не посчастливится в нее упасть. В конце концов звезд не останется. К этому моменту сама черная дыра начнет испаряться, испуская в пространство элементарные частицы. Это — потрясающее открытие Стивена Хокинга, которое он сделал в 1976 году. Мы подробнее поговорим об этом в главе 12: черные дыры совсем не такие черные. Они постоянно испускают частицы в окружающее их пространство, в процессе медленно теряя энергию, — благодаря квантовым флуктуациям, от которых никуда не деться. Если подождать достаточно долго — я имею в виду 10^{100} лет или около того, — то даже сверхмассивные черные дыры в центрах галактик испарятся, не оставив после себя и следа.

Как я уже говорил выше, в деталях могут быть определенные расхождения, но в целом картина долговременного прогноза остается неизменной. Прочие галактики убегают от нас и исчезают; наша галактика развивается и проходит через несколько различных стадий. В любом случае итог предопределен: жидкая каша частиц, растворяющихся и исчезающих навсегда. В очень отдаленном будущем Вселенная снова станет чрезвычайно простым местом: она будет абсолютно пустой, настолько пустой, насколько вообще может быть пустым пространство. Это диаметрально противоположность горячему и плотному изначальному состоянию Вселенной; яркое космологическое проявление стрелы времени.

Энтропия Вселенной

Немало часов напряженных размышлений теоретические физики посвятили вопросу о том, почему Вселенная развивается именно так, как она это делает, а не по-другому. Определенно нельзя исключать возможность, что ответа на этот вопрос вовсе не существует; Вселенная такая, какая она есть, и, кроме как смириться с этим, ничего поделать невозможно. И все же мы безо всяких на то оснований продолжаем надеяться, что сможем добиться большего, чем просто принять ее как данность, — что мы сможем объяснить ее.

Если предположить идеальное знание законов физики, то вопрос «Почему Вселенная развивалась именно так?» сводится к вопросу «Почему начальные условия Вселенной оказались именно такими?». Однако вторая формулировка опять неявно подразумевает, что время несимметрично и у прошлого есть определенное превосходство над будущим. Если наше представление о фундаментальных микроскопических законах природы верно, то мы можем взять состояние Вселенной в *любой* момент времени и, отталкиваясь от него, описать как прошлое, так и будущее. Таким образом, правильнее будет говорить, что наша задача заключается в том, чтобы разобраться, что же считать естественной историей Вселенной в целом.¹⁸ Космологи традиционно недооценивают значимость стрелы времени, и здесь скрывается определенная ирония, так как это, возможно, самый явный и очевидный факт, относящийся к эволюции Вселенной. Больцман отстаивал (и был совершенно прав) существование в прошлом граничного условия с низкой энтропией. При этом он ничего не знал об общей теории относительности, квантовой механике и даже существовании других галактик. Серьезный подход к вопросу энтропии помогает нам взглянуть на космологию в новом свете, благодаря чему мы можем сложить несколько головоломок, над которыми человечество бьется уже очень давно.

Однако для начала нужно более четко определиться, что же мы подразумеваем под энтропией Вселенной. В главе 13 мы во всех подробностях обсудим эволюцию энтропии обозримой Вселенной, однако на простейшем уровне дело обстоит следующим образом.

1. В ранней Вселенной, до того как произошло формирование структур, гравитация почти не влияла на энтропию. Вселенная была похожа на контейнер с газом, и для вычисления ее энтропии можно было применять привычные формулы термодинамики. Общая энтропия в пространстве, соответствующем обозримой Вселенной, составляла около 10^{88} в ранние моменты времени.
2. К моменту, когда мы достигли текущей стадии эволюции, роль гравитации значительно возросла. Для этого режима в нашем арсенале нет точной

формулы, однако мы можем получить неплохую оценку для полной энтропии, всего лишь сложив вклады черных дыр (которые обладают громадной энтропией). Энтропия одной сверхмассивной черной дыры порядка 10^{90} , а в наблюдаемой Вселенной примерно 10^{11} подобных черных дыр; полная энтропия на сегодняшний день, таким образом, составляет приблизительно 10^{101} .

3. Однако на этом история далеко не заканчивается. Если взять все вещество в наблюдаемой Вселенной и поместить его в одну черную дыру, ее энтропия составит 10^{120} . Можно считать эту величину максимально возможным значением энтропии, которого можно добиться путем перестановки вещества во Вселенной, и именно в этом направлении все и развивается.¹⁹

Задача, стоящая перед нами, — объяснить эту историю, и в частности почему энтропия раннего состояния (10^{88}) настолько ниже максимально возможной энтропии (10^{120})? Обратите внимание на то, что первое число во много-много раз меньше второго; впечатление, что они почти одинаковы, создается исключительно благодаря магии краткой записи больших чисел.

Хорошие новости заключаются в том, что модель Большого взрыва по крайней мере предоставляет контекст, в котором возможно разумно подойти к поиску ответа на данный вопрос. Во времена Больцмана, до того как люди узнали об общей теории относительности и расширении Вселенной, загадка энтропии была куда сложнее хотя бы потому, что не существовало такого события, как «начало Вселенной» (или хотя бы «начало обозримой Вселенной»). В противоположность этому сейчас мы в состоянии точно указать на время, когда энтропия была наименьшей, а также на конкретную форму того состояния, когда наблюдалась низкая энтропия. Это решающий шаг в попытке объяснить, почему все было так, а не иначе.

Возможно, конечно, что фундаментальные законы физики необратимы (хотя чуть позже мы приведем аргументы против). Однако если они все-таки обратимы, то низкая энтропия нашей Вселенной в момент Большого взрыва и около того оставляет нам, по сути, два основных варианта.

1. Большой взрыв действительно был началом Вселенной, моментом, когда появилось время. Это объясняется тем, что истинные законы физики разрешают существование границы пространства—времени, или тем, что «время» в нашем понимании — на самом деле всего лишь приближение, теряющее достоверность в окрестности Большого взрыва. В любом случае в самом начале у Вселенной была низкая энтропия по причинам, лежащим далеко за пределами динамических законов природы. И тогда нам требуется новый, независимый принцип, чтобы объяснить начальное состояние.

2. Такой вещи, как «изначальное состояние», не существует, потому что время вечно. При таком допущении то, что мы представляем себе как Большой взрыв, — это не начало Вселенной, хотя, несомненно, данное событие сыграло важную роль в истории нашей локальной области. Наблюдаемый нами отрезок пространства—времени должен быть каким-то образом вложен в большую картину. И способ этого вложения должен объяснить, почему энтропия была так низка на одном краю времени, не накладывая при этом никаких специальных условий на глобальное описание.

Какой из двух вариантов точнее описывает реальный мир, мы пока не знаем. Признаюсь честно, мне больше по душе второй вариант, ведь гораздо элегантнее выглядит история, в котором мир становится практически неизбежным результатом действия целой группы динамических законов и не требует дополнительного принципа, разъясняющего, почему он появился именно в таком виде. Для того чтобы превратить этот призрачный сценарий в достоверную космологическую модель, нам придется использовать в своих интересах загадочную энергию вакуума, которая господствует в нашей Вселенной. Однако мы не сможем этого сделать, пока не разберемся окончательно в искривлении пространства—времени и теории относительности. Пожалуй, этим стоит заняться прямо сейчас.

Примечания

- ¹ «Жаркие споры» в данном случае — совсем не образное выражение; «Большой спор» между астрономами Харлоу Шепли и Гербером Кёртисом случился в 1920 году в Смитсоновском институте в Вашингтоне, США. Позиция Шепли заключалась в том, что Млечный Путь — это и есть вся Вселенная, тогда как Кёртис утверждал, что туманности (по крайней мере некоторые, в частности Туманность Андромеды M_{31}) сами по себе являются отдельными галактиками. Хотя в итоге Шепли оказался на проигравшей стороне в этих великих дебатах, он был абсолютно прав, утверждая, что Солнце находится не в центре Млечного Пути.
- ² Это небольшая поэтическая вольность. Как мы узнаем позже, космологическое красное смещение принципиально отличается от эффекта Доплера, несмотря на кажущееся сходство. Причина красного смещения — расширение пространства, через которое движется свет, тогда как эффект Доплера создают объекты, движущиеся сквозь пространство.
- ³ Десятилетия героического труда не пропали даром — современным астрономам наконец-то удалось зафиксировать точное значение этого важного космологического параметра: 72 км/с за мегапарсек (*Freedman, W. L. et al. Final Results from the Hubble Space Telescope Key Project to Measure the Hubble Constant // Astrophysical J.*, 2001, vol. 553, No. 1, P. 47–72). Это означает, что каждому миллиону парсеков, отделяющих нас

от какой-либо галактики, соответствует видимая скорость удаления, равная 72 км/с. Для сравнения: текущий размер наблюдаемой Вселенной — около 28 миллиардов парсеков. Парсек равен приблизительно 3,26 светового года, или 30 триллионам километров.

- ⁴ Строго говоря, в этой фразе не хватает уточнения, что речь идет о галактиках, разнесенных на достаточное расстояние. Соседние галактики под действием взаимного гравитационного притяжения могут объединяться в пары, группы или скопления. Такие структуры, как и любые другие связанные системы, не расширяются вместе со Вселенной; принято говорить, что они «вырвались из потока Хаббла».
- ⁵ Согласен, это утверждение может показаться спорным. Всего лишь две сноски назад я сообщил, что диаметр обозримой Вселенной составляет «28 миллиардов парсеков». С момента Большого взрыва прошло 14 миллиардов лет, поэтому, казалось бы, логично предположить, что нас от края обозримой Вселенной отделяет 14 миллиардов световых лет. Умножая на два, получаем, что диаметр Вселенной — 28 миллиардов лет, или около 9 миллиардов парсеков, так? Или где-то вкралась опечатка? Как эти данные согласуются между собой? На самом деле оценку расстояний сильно усложняет тот факт, что Вселенная расширяется, и этот процесс непрерывно ускоряется благодаря темной энергии. В настоящее время самые удаленные галактики в нашей обозримой Вселенной находятся от нас гораздо дальше, чем в 14 миллиардах световых лет. Если выполнить все необходимые вычисления, то станет понятно, что расстояние от нас до самой далекой точки, когда-либо принадлежавшей обозримой части Вселенной, сейчас составляет около 46 миллиардов световых лет, или 14 миллиардов парсеков.
- ⁶ Хочу особо подчеркнуть: заявление о том, что частицы не рождаются из пустого пространства, — это всего лишь предположение, хотя и достаточно обоснованное, по крайней мере в современной Вселенной. (Позже мы узнаем, что в ускоряющейся Вселенной, в ходе процесса, аналогичного изучению Хокинга в окрестности черных дыр, частицы могут возникать из вакуума, хотя и крайне редко.) Бытовавшая некогда теория стационарной Вселенной основывалась на противоположном предположении, но ей веры нет: для того чтобы она реально работала (хотя в действительности этого никогда не было), ее последователям пришлось выдумать несколько новых типов физических процессов.
- ⁷ Для того чтобы соблюсти должную точность, следует отметить, что термин «Большой взрыв» употребляют в двух разных значениях. Один из них мы только что рассмотрели: Большим взрывом зовется гипотетический момент бесконечной плотности в самом начале существования Вселенной или, по крайней мере, состояние Вселенной, когда она была очень, очень близка к этому моменту. Однако мы также говорим о модели Большого взрыва, представляющей собой общий формализм описания расширяющейся Вселенной от горячего плотного состояния в соответствии с правилами общей теории относительности (при этом слово «модель» мы иногда опускаем). Вам может попасться на глаза газетная статья, рассказывающая, как специалисты по космологии «тестируют предсказания Большого взрыва». Но невозможно проверить предсказания какого-то момента во времени, можно лишь протестировать предсказания модели. Таким образом, эти два понятия достаточно независимы. Позднее в этой книге мы приведем доводы, что полная теория Вселенной должна предложить что-то более совершенное вместо привычной сингулярности Большого взрыва, но модель Большого взрыва, описывающая развитие

Вселенной на протяжении последних 14 миллиардов лет, обоснована, подтверждена и никуда не денется.

- ⁸ История открытия реликтового излучения полна недоразумений. Георгий Гамов, Ральф Альфер и Роберт Херман в конце 1940-х — начале 1950-х годов написали серию статей, в которых со всей очевидностью предсказывали существование реликтового микроволнового излучения, доставшегося нам в наследство от Большого взрыва, однако об этих работах впоследствии каким-то образом забыли. В 1960-е годы Роберт Дик в Принстонском университете, а также Андрей Дорошкевич и Игорь Новиков в Советском Союзе независимо друг от друга заявили о существовании и возможности обнаружения такого излучения. Дик даже собрал группу талантливых молодых космологов (включая Дэвида Уилкинсона и Филипа Гиббса, которые сегодня по праву считаются ведущими специалистами в этой области), для того чтобы построить антенну и самостоятельно заняться поисками фонового излучения. Их опередили находящиеся всего в нескольких милях Пензиас и Уилсон, которые к тому же даже не подозревали о работе, проводимой молодыми учеными. Гамов скончался в 1968 году, и до сих пор остается загадкой, почему предсказания Альфера и Хермана не были отмечены Нобелевской премией. Они изложили свое видение истории в совместной книге «Genesis of the Big Bang» (*Alpher and Herman, Oxford: Oxford University Press, 2001*). В 2006 году премию получили Джон Мазер и Джордж Смут за измерение спектра и температурной анизотропии реликтового излучения. Они использовали спутник NASA под названием COBE (Cosmic Background Explorer, «исследователь космического фона»).
- ⁹ Фаррелл рассказывает эту историю целиком (*Farrell, J. The Day Without Yesterday: Lemaitre, Einstein, and the Birth of Modern Cosmology. New York: Basic Books, 2006*.)
- ¹⁰ *Bondi, H., Gold, T. The Steady-State Theory of the Expanding Universe // Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 1948, 108, p. 252–270; Hoyle, F. A New Model for the Expanding Universe // Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 1948, 108, p. 372–382.*
- ¹¹ См., например: *Wright, E. L. Errors in the Steady State and Quasi-SS Models (2008)*. <http://www.astro.ucla.edu/~wright/stdystat.htm>
- ¹² Само собой, это всего лишь упрощение, а реальная история куда интереснее. Считается, что сверхновые типа Ia появляются в результате катастрофического гравитационного коллапса белых карликов. Белый карлик — это звезда, израсходовавшая все свои запасы ядерного топлива. Она тихонько висит на небе благодаря лишь тому факту, что электроны занимают определенное место. Однако у некоторых белых карликов есть звезды-компаньоны, вещество с которых может постепенно просачиваться на белого карлика. В конечном счете карлик достигает критического состояния — предела Чандрасекара (названного так в честь Субраманьяна Чандрасекара), когда направленное наружу давление, создаваемое электронами, оказывается не в силах соперничать с силой притяжения, и звезда схлопывается в нейтронную звезду, отбрасывая внешние слои и производя вспышку сверхновой. Поскольку предел Чандрасекара примерно одинаков для всех белых карликов во Вселенной, яркость взрыва всех сверхновых типа Ia также практически одна и та же (существуют и другие типы сверхновых, но они не имеют никакого отношения к белым карликам). Кроме того, астрономы научились корректировать разницу в яркостях, используя тот эмпирический факт, что после достижения пикового значения светимости более яркие сверхновые угасают дольше. Историю о том, как астрономы искали сверхновые и как они в итоге сумели обнаружить ускорение Вселенной, можно прочитать

в следующих книгах: *Goldsmith, D. The Runaway Universe: The Race to Find the Future of the Cosmos*. New York: Basic Books, 2000; *Kirshner, R. P. The Extravagant Universe: Exploding Stars, Dark Energy, and the Accelerating Cosmos*. Princeton, NJ: Princeton University Press, 2004; *Gates, E. I. Einstein's Telescope*. New York: W.W. Norton, 2009. Исходные статьи: *Riess, A. et al., Supernova Search Team. Observational Evidence from Supernovae for an Accelerating Universe and a Cosmological Constant // Astronomical J.*, 1998, 116, p. 1009–1038; *Perlmutter, S. et al., Supernova Cosmology Project. Measurements of Omega and Lambda from 42 High Redshift Supernovae // Astrophysical J.*, 1999, 517, p. 565–586.

¹³ Еще один тонкий момент, требующий разъяснения. Скорость расширения Вселенной оценивается с помощью константы Хаббла, связывающей расстояние с красным смещением. В действительности это не «константа» — в ранней Вселенной расширение происходило намного быстрее, поэтому значение того, что правильнее было бы называть параметром Хаббла, было тогда значительно больше. Казалось бы, можно ожидать, что фраза «Вселенная ускоряется» подразумевает: «значение параметра Хаббла увеличивается», однако это не так: это всего лишь означает, что «значение параметра Хаббла не очень сильно уменьшается». Термин «ускорение» относится к увеличению с течением времени видимой скорости любой отдельно взятой галактики. Однако эта скорость равна параметру Хаббла, умноженному на расстояние, а расстояние с расширением Вселенной увеличивается. Таким образом, нельзя утверждать, что в ускоряющейся Вселенной увеличивается значение параметра Хаббла; ускоряющаяся Вселенная — это та, в которой увеличивается произведение параметра Хаббла на расстояние до некоторой галактики. Оказывается, даже с учетом космологической постоянной значение параметра Хаббла в действительности не увеличивается; просто скорость его уменьшения снижается по мере того, как Вселенная расширяется и разреживается. В конечном итоге, когда все вещество разлетится и не останется ничего, кроме космологической постоянной, параметр Хаббла достигнет постоянного значения.

¹⁴ Не помешает также сделать замечание о необходимости различать две формы энергии, играющие наиболее важную роль в развитии современной Вселенной: «энергию вещества», то есть медленно движущихся частиц, разбегающихся в стороны по мере расширения Вселенной, и «темную энергию» — какую-то загадочную штуку, которая совсем не разреживается, а, наоборот, сохраняет постоянную плотность энергии. Помимо этого, само вещество может принимать две разные формы: «обычное вещество», включающее все типы частиц, которые когда-либо были экспериментальным путем обнаружены на Земле, и «темное вещество» — какой-то другой вид частиц, который не может быть ничем, что нам уже доводилось непосредственно наблюдать. Масса (и, следовательно, энергия) обычного вещества в основном сосредоточена в ядрах атомов — протонах и нейтронах, однако и электроны также вносят свой вклад. Обычное вещество включает вас, меня, Землю, Солнце, звезды и весь газ, пыль и камни во Вселенной. Мы знаем, сколько всего этого вещества, и его совершенно точно недостаточно для того, чтобы объяснить все обнаруженные в галактиках и кластерах гравитационные поля. Таким образом, должно существовать некое темное вещество. Никакие известные нам частицы его не образуют, зато физики-теоретики составили впечатляющий список возможных кандидатов, включая «аксионы», и «нейтралы», и «частицы Кауцы—Клейна». При всем при этом обычное вещество составляет приблизительно 4 % энергии во Вселенной, темное вещество — примерно 22 %, а темная энергия — оставшиеся 74 %. Создание или непо-

средственное обнаружение темной материи — важнейшая задача современной экспериментальной физики. Подробнее об этом — в работах: *Hooper, D. Dark Cosmos: In Search of Our Universe's Missing Mass and Energy*. New York: HarperCollins, 2007; *Carrroll, S. M. Dark Matter and Dark Energy: The Dark Side of the Universe* / Лекции на DVD. Chantilly, VA: Teaching Company, 2007; *Gates, E. I. Einstein's Telescope*. New York: W. W. Norton, 2009.

¹⁵ Итак, как много энергии содержится в этой темной энергии? Примерно 0,03 калории в кубическом километре. Здесь надо заметить, что для измерения калорийности продуктов обычно используются килокалории (1000 калорий). Если, например, мы возьмем весь объем озера Мичиган (около 5000 км³), то полная величина темной энергии, заключенной в этом объеме, будет меньше энергетической ценности одного Биг-Мака. Или еще пример: если преобразовать всю темную энергию из всех кубических сантиметров, составляющих объем Земли, в электричество, то получится примерно столько же, сколько потребляет за год средний американец. Суть в том, что темной энергии в одном кубическом сантиметре вообще-то совсем немного — она размазана тонким слоем по всей Вселенной. Разумеется, преобразовать темную энергию ни в какую полезную форму энергии невозможно, она абсолютно бесполезна. (Почему? Потому что она находится в состоянии с высокой энтропией.)

¹⁶ В действительности Планк не занимался квантовой гравитацией. В 1899 году при попытке разобраться с некоторыми загадками излучения черного тела он столкнулся с необходимостью в новой фундаментальной константе, описывающей законы природы. Сегодня эта константа носит название постоянной Планка и обозначается символом \hbar . Планк взял эту новую величину и принялся умножать и делить ее разными способами на скорость света c и ньютоновскую гравитационную постоянную G . В результате он пришел к системе фундаментальных единиц измерения, которые сегодня считают общепринятыми характеристиками квантовой гравитации: планковская длина $l_P = 1,6 \cdot 10^{-35}$ метра, планковское время $t_P = 5,4 \cdot 10^{-44}$ секунды и планковская масса $M_P = 2,2 \cdot 10^{-8}$ килограмма, а также энергия Планка. Интересный факт: Планк первым делом предположил, что универсальная природа этих величин — основанная на законах физики, а не определенная в соответствии с какими-то человеческими условиями — однажды поможет нам в общении с внеземными цивилизациями.

¹⁷ Фред Адамс и Грег Лафлин посвятили этому целую книгу, и я настоятельно рекомендую вам с ней ознакомиться (*Adams, F., Laughlin, G. The Five Ages of the Universe: Inside the Physics of Eternity*. New York: Free Press, 1999).

¹⁸ Хью Прайс очень уверенно раскритиковал эту тенденцию (*Price, H. Time's Arrow and Archimedes' Point: New Directions for the Physics of Time*. New York: Oxford University Press, 1996). Он обвинил космологов в двойных стандартах, так как к ранней Вселенной применяются критерии естественности, которые никто не стал бы использовать для поздней Вселенной, и наоборот. По мнению Прайса, непротиворечивая космология, управляемая симметричными во времени законами, должна описывать симметричную во времени эволюцию. Учитывая, что у Большого взрыва была низкая энтропия, в будущем должен случиться симметричный коллапс — Большое сжатие, также имеющее низкую энтропию. В такой Вселенной — она называется Вселенной Голда в честь Томаса Голда, знаменитого своей поддержкой теории стационарной Вселенной, — стрела времени изменила бы направление, как только Вселенная достигла бы максимального размера, и энтропия начала бы уменьшаться по направлению к Сжатию. Поскольку мы уже открыли

темную энергию, подобный сценарий сейчас кажется совсем маловероятным. (В этой книге мы все же ответим на вызов Прайса, попытавшись представить, что время во Вселенной действительно симметрично на больших масштабах, и в далеком прошлом, точно так же, как в далеком будущем, у Вселенной высокая энтропия — что, очевидно, может быть правдой только в том случае, если история Вселенной начинается гораздо раньше Большого взрыва.)

- ¹⁹ На самом деле Вселенная не сколлапсирует в одну большую черную дыру. Как мы уже обсуждали выше, она попросту опустеет. Примечательно, однако, что в присутствии темной энергии даже у пустого пространства есть энтропия, и мы получаем то же значение (10^{120}) для максимальной энтропии наблюдаемой Вселенной. Обратите внимание, что 10^{120} — это также величина расхождения между теоретической оценкой энергии вакуума и ее наблюдаемым значением. Это очевидное совпадение двух разных величин — уже знакомое нам совпадение между текущей плотностью вещества (связанной с максимальной энтропией) и плотностью энергии вакуума. В обоих случаях численное значение равно квадрату размера наблюдаемой Вселенной — примерно 10 миллиардов световых лет, разделенному на квадрат планковской длины.

Часть II

Время во Вселенной Эйнштейна

Глава 4

Время — штука личная

Время идет различным шагом с различными людьми.

*Уильям Шекспир.
Как вам это понравится*

Скажите «ученый» — и большинство людей сразу же вспомнят Эйнштейна. Альберт Эйнштейн — фигура культовая; многим ли физикам-теоретикам удавалось достичь такой степени известности, что их лица начинали печатать на футболках? Однако Эйнштейн — знаменитость далекая, пугающая. Большинство из тех, кто считает это имя знакомым, затрудняются назвать его конкретные достижения,¹ в отличие, например, от успехов Тайгера Вудса.² Нам всем знаком образ Эйнштейна как неуклюжего рассеянного профессора в мешковатом свитере и с всклокоченными волосами — образ человека, полностью посвятившего себя науке и равнодушного ко всему земному. А его работы — рассуждения об эквивалентности массы и энергии, искривлении пространства и времени и поиске окончательной теории — являют для нас вершину абстракции, бесконечно удаленную от каждодневных бытовых проблем.

Настоящий Эйнштейн куда интереснее этого устоявшегося образа. Во-первых, всклокоченный вид и прическа, как у Дона Кинга, стали фирменным стилем Эйнштейна уже в более позднем возрасте — вы вряд ли узнали бы знаменитого ученого в опрятном и ухоженном молодом человеке с пронзительным взором, не раз перевернувшем физику с ног на голову в начале XX века.³

Во-вторых, теория относительности родилась не из пустых рассуждений о природе пространства и времени; ее источники кроются в абсолютно практических задачах доставки людей и груза в правильное место в правильное время.

Специальная теория относительности, объясняющая, каким образом скорость света может быть одной и той же для любых наблюдателей, появилась в самом начале XX века благодаря усилиям сразу нескольких исследователей. (Авторство общей теории относительности, которая интерпретирует гравитацию как результат искривления пространства — времени, практически всецело принадлежит Эйнштейну.) Крупнейший вклад в развитие специальной теории относительности внес французский математик и физик Анри Пуанкаре. Несмотря на то что именно Эйнштейн поставил окончательную точку, приняв, что «время», измеряемое любым движущимся наблюдателем, ничем не хуже «времени», измеряемого любым другим наблюдателем, оба ученых в своих исследованиях относительности пришли к очень похожим формальным выводам.⁴

Историк Питер Галисон в своей книге «Часы Эйнштейна, карты Пуанкаре: империя времени» («Einstein's Clocks, Poincaré's Maps: Empires of Time») излагает доводы в пользу того, что и на исследования Эйнштейна, и на исследования Пуанкаре одинаково повлияли как эзотерические размышления об архитектуре физики, так и обычные земные профессии ученых.⁵ Эйнштейн в то время работал патентным клерком в Швейцарии, в Берне, где основной задачей считалось создание точных часов. Между европейскими городами выростала сеть железных дорог, и решение проблемы синхронизации часов на больших расстояниях представляло огромный коммерческий интерес. Пуанкаре, будучи на два десятилетия старше, служил президентом французского Бюро долгот. Развитие морских перевозок и водных торговых путей требовало более точных методов определения долготы при нахождении в открытых водах — как для ориентирования отдельных кораблей, так и для составления точных карт.

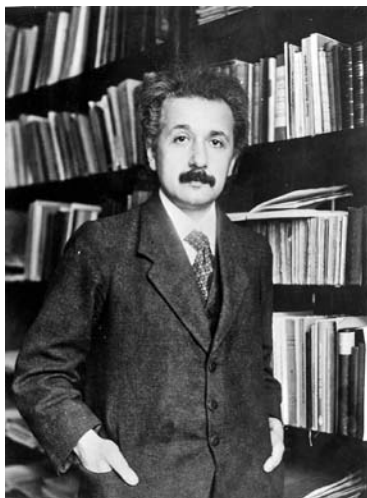


Рис. 4.1. Альберт Эйнштейн в 1912 году. «Удивительным годом» для него стал 1905 год, а исследования по общей теории относительности дали первые устойчивые результаты в 1915 году

И вот мы имеем то, что имеем: карты и часы. Пространство и время. В частности, теперь мы знаем, что важные вопросы — вовсе не «Где мы в действительности находимся?» или «Сколько сейчас в действительности времени?», а «Где мы находимся по отношению к другим объектам?» и «Какое время показывают наши часы?». Жесткое, абсолютное пространство и время ньютоновской механики превосходно согласуются с нашим интуитивным пониманием мира; теория относительности же требует перейти на совершенно иной уровень абстракции. Физикам, работавшим в начале прошлого столетия, удалось сделать этот критически важный шаг. Они поняли, что не следует пытаться запереть мир в рамки, навязываемые нашей интуицией, а нужно серьезно отнестись к тому, что поддается измерению реальными приборами.

Специальная теория относительности и общая теория относительности формируют основу современного представления о пространстве и времени, и в этой главе мы попробуем разобраться, что же скрывается за составляющей «время» в «пространстве—времени». ⁶ Мы постараемся ненадолго забыть и об энтропии, и о втором начале термодинамики, и о стреле времени, найдя прибежище в чистом, точном мире фундаментально обратимых законов физики. И все же без уверенного понимания теории относительности и понятия пространства—времени нам не удастся найти окончательное объяснение такого явления, как стрела времени.

Потерянные в пространстве

В дзэн-буддизме существует такая концепция, как «сознание начинающего»: состояние, в котором человек свободен от любых предрассудков и готов принимать мир таким, какой он есть. Можно долго спорить, реально ли достичь такого состояния и есть ли вообще смысл пытаться, однако сама концепция может оказаться весьма полезной при знакомстве с теорией относительности. Так что давайте забудем все, что, как нам кажется, мы знаем о времени во Вселенной, и проведем несколько мысленных экспериментов (о результатах которых нам известно на основании реальных опытов). Наша цель — понять, что нового теория относительности может сказать про время.

Для этого представьте себе, что мы находимся внутри космического корабля, свободно парящего в космическом пространстве и не подверженного влиянию никаких звезд или планет. Мы обеспечены всеми необходимыми запасами: у нас есть вода, воздух и предметы первой необходимости. Кроме того, на борту имеется простейшее оборудование для проведения научных экспериментов в виде блоков, весов и т. п. Единственное ограничение — мы не можем выгля-

нуть наружу и посмотреть на вещи, находящиеся за пределами корабля. В нашем эксперименте мы будем считать, что корабль оборудован различными датчиками, расположенными внутри и снаружи корабля.

Прежде всего, давайте подумаем, что мы можем узнать, находясь внутри корабля. У нас есть пульт управления, и мы можем вращать судно вокруг любой оси. Также мы можем запустить двигатели и переместиться в любом желаемом направлении. Итак, мы проводим время, вращая корабль в разные стороны и перемещаясь туда-сюда, не зная и не особо беспокоясь о том, в каком направлении мы движемся, и проводя заодно разнообразные эксперименты.

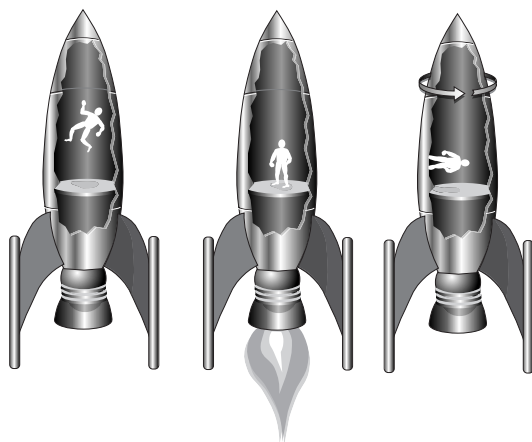


Рис. 4.2. Изолированный космический корабль.
Слева направо: свободное падение, ускорение, вращение

Что мы можем узнать? Очевидно, что нам не составляет труда заметить ускорение корабля. Когда он движется без ускорения, наша любимая обеденная вилка невесома и свободно парит в воздухе. Однако как только мы запускаем двигатели, она падает вниз, где под «низом» понимается «направление, противоположное тому, в котором корабль ускоряется».⁷ Если мы еще поэкспериментируем, то сможем даже научиться распознавать вращение космического корабля. В этом случае предмет сервировки, расположенный точно на оси вращения, продолжает свободно парить на одном месте; однако любые предметы, находящиеся на периферии, «притягиваются» к корпусу корабля и остаются там.

Таким образом, определенные сведения о состоянии корабля мы можем узнавать экспериментально, с помощью несложных опытов внутри судна.

Тем не менее есть также вещи, которые мы понять попросту *не можем*. Например, мы не знаем, где находимся. Скажем, мы проводим несколько экспериментов внутри нашего неускоряющегося, неврещающегося корабля. Затем мы включаем двигатели, куда-то стремительно переносимся и снова выключаем, — и вот мы опять в неускоряющемся и неврещающемся корабле и можем повторить предыдущие эксперименты. При условии, что у нас есть хоть малейшие навыки проведения физических экспериментов, мы получим точно такие же результаты. Если мы потрудились записать величину ускорения и продолжительность работы двигателей, то, возможно, сумеем вычислить расстояние, на которое переместился корабль; однако, прибегая исключительно к локальным экспериментам, мы при всем желании не сможем отличить одно местоположение от другого.

Аналогично, нам не под силу отличить одну скорость от другой. Как только мы выключаем двигатели, корабль снова начинает свободно парить в пространстве, и совершенно неважно, какую скорость он успел набрать; необходимости замедляться нет. И ориентацию корабля мы тоже определить не можем — в пустынных бескрайних просторах межзвездного пространства все направления одинаковы. Можно понять, вращается судно или нет; однако если включить подходящие направляющие двигатели (или использовать соответствующие бортовые гироскопы) и прекратить вращение, то никакой локальный эксперимент не позволит нам определить угол, на который успел повернуться корабль.

Эти простые выводы открывают нам сокровенные тайны процессов, происходящих в реальном мире. Любые манипуляции, которые мы совершаем с нашим аппаратом, при условии, что они не влияют на результаты экспериментов, — мы меняем его местоположение, поворачиваем, заставляем двигаться с постоянной скоростью, — отражают *симметрию* законов природы. Принципы симметрии в физике играют важнейшую роль: именно они накладывают строгие ограничения на то, какую форму могут принимать законы природы и какого типа экспериментальные результаты мы можем получить.

Разумеется, у обнаруженных нами видов симметрии есть свои названия. Изменение местоположения объекта в пространстве называется «переносом», изменение ориентации в пространстве — это «поворот», а изменение скорости движения сквозь пространство — «буст». В контексте специальной теории относительности набор поворотов и бустов называется преобразованиями Лоренца, а полный комплект, включающий переносы, — преобразованиями Пуанкаре.

Главная идея, лежащая в основе этих преобразований симметрии, высказывалась учеными задолго до появления специальной теории относительности. Еще Галилео утверждал, что законы природы должны быть инвариантными относительно того, что мы сегодня называем переносами, поворотами и бустами. Даже без теории относительности, если бы Галилео и Ньютон оказались правы в своих утверждениях о законах механики, мы все равно были бы не в состоянии определять положение, ориентацию и скорость, находясь в изолированном свободно движущемся космическом корабле. Различие между теорией относительности и представлениями Галилео лежит лишь в области того, что происходит, когда мы перемещаемся в систему координат движущегося наблюдателя. Волшебство относительности заключается в том, что у изменения скорости много общего с изменением пространственной ориентации; буст — всего лишь пространственно-временная версия поворота.

Прежде чем начинать разбираться с этим, давайте остановимся на мгновение и спросим себя: а могли бы законы физики работать по-другому? Например, выше мы утверждаем, что абсолютное положение объекта не поддается определению — и абсолютная скорость тоже, однако абсолютное ускорение вполне измеримо.⁸ Можно ли вообразить мир с такими физическими законами, в котором невозможно оценить абсолютное положение, однако абсолютная скорость поддается объективному измерению?⁹

Это совсем несложно. Представьте себе, что вы движетесь сквозь неподвижную среду, такую как воздух или вода. Если бы мы жили в бескрайнем водоеме, то нам не к чему было бы привязать свое местоположение, однако мы могли бы без труда измерять свою скорость по отношению к воде. Можно было бы даже предположить, что окружающее пространство тоже напитано подобной средой.¹⁰ В конце концов, еще Максвелл в своих работах по изучению электромагнетизма доказал, что свет — это всего лишь тип волны. А если есть волна, вполне естественно думать, что есть и среда для ее распространения. Например, чтобы распространялся звук, нужен воздух — в космосе никто не услышит ваш крик. Однако свет успешно распространяется в безвоздушном пространстве, значит (следуя этой логике, которая окажется в итоге ошибочной), и там существует какая-то среда, сквозь которую он перемещается.

Таким образом, физики конца XIX века считали, что электромагнитные волны распространяются сквозь невидимую, но играющую невообразимо важную роль среду, которой они дали название «эфир». И ученые-экспериментаторы поставили себе целью найти доказательства существования этой субстанции. Однако они потерпели поражение, а их неудача подготовила почву для специальной теории относительности.

Ключ к относительности

Представьте, что мы снова вернулись в космическое пространство, но на этот раз взяли с собой более изощренное оборудование для проведения экспериментов. В частности, у нас есть впечатляющая штукавина, сделанная по последнему слову лазерной техники и умеющая измерять скорость света. Для того чтобы откалибровать устройство, мы в свободном падении (без ускорения) проверяем, будет ли скорость света всегда одной и той же независимо от направления. Все правильно, это действительно так. Инвариантность относительно выбора направления — неотъемлемое свойство распространения света, как мы и подозревали.

Теперь попробуем измерить скорость света при движении с разными скоростями. Для этого мы проведем один тест, затем ненадолго включим двигатели и снова выключим их, чтобы набрать постоянную скорость относительно первоначального движения, и после этого повторим эксперимент. Поразительно — какую бы скорость мы ни набрали, значение скорости света, получаемое в результате измерений, всегда остается одинаковым. Если бы действительно существовала эфирная среда, сквозь которую свет распространялся бы так же, как звук распространяется по воздуху, то в зависимости от того, с какой скоростью по отношению к эфиру мы движемся, мы бы получали разные результаты. Однако этого не происходит. Можно было бы предположить, что свет получает какой-то толчок вследствие того, что источник его находится внутри движущегося космического судна. Для того чтобы проверить это, мы поднимем шторы на окнах и позволим проникнуть внутрь свету из внешнего мира. Однако измерение скорости света, источник которого находится снаружи, снова дает тот же результат: скорость света не зависит от скорости нашего космического корабля.

На практике этот эксперимент был выполнен в 1887 году Альбертом Майкельсоном и Эдвардом Морли. За неимением космического корабля с мощным двигателем они воспользовались лучшим, что у них было: движением Земли вокруг Солнца. Орбитальная скорость Земли составляет около 30 километров в секунду, так что зимой ее полная скорость примерно на 60 километров в секунду отличается от ее скорости летом, когда Земля движется в обратном направлении. Не так много по сравнению со скоростью света, которая равна примерно 300 000 километров в секунду, однако Майкельсон сконструировал хитроумное устройство, известное под названием интерферометра, чрезвычайно чувствительное к малейшим изменениям скорости в разных направлениях. Ученые получили тот же самый ответ, к которому пришли мы в своем

мысленном эксперименте: скорость света всегда одна и та же, независимо от того, насколько быстро мы движемся.

Научные достижения редко бывают простыми и однозначными, и как правильно интерпретировать результат эксперимента Майкельсона—Морли, ученые также догадались не сразу. А вдруг Земля тянет за собой эфир, из-за чего наша относительная скорость оказывается совсем небольшой? После некоторого неистового теоретизирования с метанием от одной идеи к другой физики все же пришли к выводу, который сегодня считается единственно верным: скорость света представляет собой универсальную константу. Для любого наблюдателя скорость света всегда одна и та же, независимо от того, с какой скоростью он сам двигался при проведении измерений.¹¹ Всю суть специальной теории относительности можно свести к двум основным принципам:

- ◆ никакие локальные эксперименты не позволяют отличить наблюдателей, движущихся с постоянными скоростями;
- ◆ скорость света одинакова для всех наблюдателей.

Используя выражение «скорость света», мы неявно подразумеваем, что речь идет о скорости, с которой свет движется через пустое пространство. Ничуть не сложно заставить свет двигаться с другой скоростью — нужно всего лишь поместить на его пути прозрачную среду. Сквозь стакан с водой свет проходит медленнее, чем сквозь пустое пространство, однако это ничего особенного о законах физики не говорит. Действительно, в этой пьесе главную роль играет не свет как таковой. Для нас важнее всего то, что в пространстве—времени существует некоторая специальная скорость — просто так получилось, что свет распространяется с этой скоростью в пустом пространстве. Ключевой момент — это существование предела скорости, а не способность света двигаться настолько быстро.

Необходимо остановиться и осознать, насколько это все удивительно. Предположим, вы находитесь в космическом корабле, а ваш друг, также путешествующий в космосе, сигнализирует вам фонариком из иллюминатора своего космического судна. Вы измеряете скорость света от фонарика и видите, что она равна 300 000 километров в секунду. Затем включаете двигатели и начинаете ускоряться навстречу другу, пока не достигаете скорости 200 000 километров в секунду. Вы снова измеряете скорость света, излучаемого фонариком, и снова получаете тот же результат: 300 000 километров в секунду. Безумие какое-то! Любому человеку в здравом уме ожидал бы, что результат будет равен 500 000 километров в секунду. Что же происходит?

Ответ, согласно специальной теории относительности, заключается в том, что от системы отсчета зависит не скорость света, а то, что мы понимаем под

«километром» и «секундой». Когда мимо нас на большой скорости проносятся линейка, мы наблюдаем эффект «сокращения длины» — кажется, что она короче такой же линейки, находящейся в покое относительно нашей системы координат. Аналогичным образом, если мимо нас на большой скорости проносятся часы, для них происходит «растяжение времени» — кажется, что они идут медленнее часов, находящихся в покое. Действуя совместно, эти явления точно компенсируют любое относительное движение, поэтому для любого наблюдателя скорость света всегда остается одной и той же.¹²

Существует важное следствие инвариантности скорости света: ничто не может двигаться быстрее света. Доказать это довольно просто; представьте, что вы в ракете пытаетесь перегнать свет, излучаемый фонариком. В начальный момент времени ракета неподвижна (в нашей системе координат), а свет движется со скоростью 300 000 километров в секунду. Затем ракета изо всех сил ускоряется, набирая колоссальную скорость. Когда команда ракеты измеряет скорость света от фонарика (теперь находящегося на большом удалении), они убеждаются, что свет все так же распространяется со скоростью 300 000 километров в секунду. Что бы они ни делали, как бы сильно и долго ни ускорялись, свет все равно движется быстрее, и его относительная скорость всегда одна и та же.¹³ (В их системе отсчета, конечно. С точки зрения внешнего наблюдателя скорость ракеты постепенно приближается к скорости света, но никогда не достигает ее.)

Несмотря на то что сокращение длины и растяжение времени прекрасно согласуются со специальной теорией относительности, обычных людей эти явления могут ввести в заблуждение. Когда мы говорим о «длине» какого-то физического объекта, мы имеем в виду, что объект надо измерить от одного конца до другого. Но при этом мы подразумеваем, что измерение должно производиться *одномоментно*. (Если вы отметите на стене уровень пола, а затем вскарабкаетесь на стремянку и сделаете вторую отметку на уровне головы, то не сможете утверждать, что расстояние между двумя метками отражает ваш реальный рост.) Однако дух специальной теории относительности говорит нам, что не следует делать никаких заявлений относительно удаленных друг от друга событий, происходящих одновременно. Значит, давайте подойдем к проблеме с другой стороны и разложим по полочкам все, что знаем о таком понятии, как пространство—время.

Пространство—время

Снова возвращаемся на космический корабль. На этот раз, однако, мы не ограничены экспериментами внутри изолированного корабля — у нас есть

небольшой флот автоматических исследовательских аппаратов, оснащенных собственными двигателями и навигационными компьютерами. Мы можем программировать эти зонды, для того чтобы отправлять их наружу в полет и возвращать обратно. На каждом зонде также установлены очень точные атомные часы. Мы начинаем с того, что тщательно синхронизируем часы на всех исследовательских аппаратах с часами на нашем главном бортовом компьютере и проверяем, что все часы идут синхронно, не отставая и не забегая вперед.

Затем мы отправляем несколько зондов в окружающее пространство. Они должны полетать некоторое время и вернуться на борт. Когда машины возвращаются, мы сразу же замечаем, что показания установленных на них часов расходятся с данными бортового компьютера. Поскольку это мысленный эксперимент, мы уверены, что рассинхронизация произошла не из-за космических лучей, ошибки в программе или проделок шаловливых инопланетян, — для зондов действительно прошел другой период времени.

К счастью, это необычное явление легко объясняется. Время, которое показывают часы, — это не какая-то абсолютная величина, единая для всей Вселенной. Его нельзя измерить раз и навсегда, как расстояние между ядовыми линиями на поле для американского футбола. Измеряемое часами время зависит от конкретной траектории перемещения этих часов — точно так же игрок может пересечь поле разными способами по траекториям разной длины. Вместо того чтобы засылать исследовательские аппараты, оборудованные часами, в космос, мы могли бы с наземной базы отправить колесных роботов покататься по кругу. Во втором случае никто не удивится, увидев по возвращении на одометрах разных роботов разные значения. Суть в том, что часы похожи на одометры. Оба типа устройств предназначены для измерения пройденного пути (сквозь время или сквозь пространство) по определенной траектории.

Если часы — это аналог одометра, то время должно быть аналогом пространства. Вспомните, что до формулировки специальной теории относительности, если мы верили в абсолютное пространство и время а-ля Исаак Ньютон, ничто не мешало нам объединить их в единую сущность под названием «пространство—время». И для того чтобы обозначить любое событие во Вселенной, нам, как и сегодня, требовалось охарактеризовать его четырьмя числами (три из них задают положение в пространстве, а четвертое — во времени). Однако в ньютоновском мире пространство и время считались независимыми. Имея два индивидуальных события, например «выход из дома в понедельник утром» и «приход на работу чуть позднее тем же утром», мы могли совер-

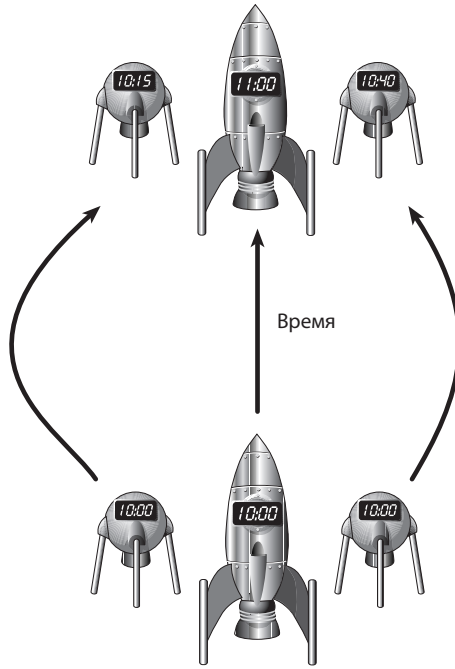


Рис. 4.3. Время, измеренное зондами, которые покинули корабль и вернулись на него по разным траекториям, меньше, чем время, измеренное бортовыми часами космического корабля

шенно независимо (и однозначно, не боясь двусмысленности) обсуждать расстояние между этими двумя событиями и время, прошедшее между ними. Специальная теория относительности утверждает, что это неправильно. Нельзя считать отдельными и независимыми такие вещи, как «расстояние в пространстве», измеряемое одометром, и «продолжительность во времени», измеряемую часами. Правильно говорить лишь об *интервале в пространстве—времени*, разделяющем два события. Он соответствует обычному расстоянию, если события разделены в основном пространственно, и продолжительности, измеряемой часами, если события разнесены в основном по времени.

Однако чем определяется это «в основном»? Скоростью света. Скорость измеряется в километрах в секунду или в любых других единицах расстояния в единицу времени; следовательно, существование особой скорости, зависящей исключительно от законов природы, помогает связать пространство и время. Когда вы перемещаетесь со скоростью, не превышающей скорость света, вы

движетесь в основном сквозь время; если бы вы могли превысить скорость света (что у вас вряд ли получится), то вы двигались бы в основном сквозь пространство.

Давайте конкретизируем некоторые детали. Изучая показания часов на исследовательских аппаратах, мы замечаем, что, несмотря на разницу в показаниях, у всех у них есть одна общая особенность: они показывают время *меньшее*, чем время на стационарных часах с главного космического корабля. Это поразительно! Ведь только что мы говорили, что время аналогично пространству, а часы отражают путь, проделанный сквозь пространство—время. В старом добром пространстве произвольные перемещения туда-сюда всегда делают путь длиннее; кратчайшее расстояние между двумя точками в пространстве — это всегда прямая линия. Если наши часы говорят правду (а они не врут), то получается, что движение без ускорения (если угодно, прямая линия сквозь пространство—время) соответствует самому долгому периоду времени между двумя событиями.

А чего вы ожидали? Время во многом похоже на пространство, однако очевидно, что оно не повторяет его во всех мелочах (можно не опасаться, что какой-нибудь автомобильный навигатор попросит вас выполнить левый поворот во вчера). Даже не учитывая вопросы энтропии и стрелы времени, мы сумели открыть фундаментальную особенность, отличающую время от пространства: лишнее движение *уменьшает* время, проведенное между двумя событиями в пространстве—времени, но *увеличивает* расстояние, пройденное между двумя точками в пространстве.

Если перед нами стоит задача переместиться в пространстве из одной точки в другую, то мы можем сделать фактический путь до цели сколь угодно длинным, всего лишь описав кучу произвольных петель (или сделав несколько кругов, прежде чем выдвигаться к точке назначения). Однако рассмотрим случай перемещения между двумя событиями в пространстве—времени конкретными точками в пространстве в конкретные моменты времени. Если двигаться по «прямой линии» — все время перемещаться с постоянной скоростью без ускорения, то мы затратим на путешествие максимально возможное время. Но если заняться прямо противоположным — начать носиться туда-сюда со всей возможной скоростью, не забыв, однако, прибыть в точку назначения в строго определенное время, то продолжительность нашего путешествия окажется гораздо меньше. Если мы научимся перемещаться со скоростью, в точности равной скорости света, то какие бы петли мы ни выписывали, у нас это не будет занимать вообще никакого времени. Разумеется, это недостижимо, однако в наших силах подойти к этому рубежу бесконечно близко.¹⁴

Как раз в этом смысле время и похоже на пространство: пространство— время является обобщением понятия пространства с еще одним, временным, измерением, свойства которого слегка отличаются от свойств пространственных измерений. В повседневной жизни мы с этим не сталкиваемся, так как передвигаемся со скоростью намного ниже скорости света. А двигаясь с низкой — намного меньше скорости света — скоростью, мы ведем себя как защитник в американском футболе, который шагает строго вдоль футбольного поля, никогда не отклоняясь от прямой линии влево или вправо. Для такого игрока «пройденный путь» идентичен «набранному количеству ярдов», без всяких двусмысленностей. Именно так время проявляет себя в нашей повседневной жизни: поскольку мы и все наши друзья перемещаемся со скоростью, даже близко не приближающейся к скорости света, мы естественным образом считаем время универсальной характеристикой Вселенной, не задумываясь о том, что это всего лишь способ оценки длины пространственно-временного интервала вдоль конкретных траекторий.

Оставаясь в своем световом конусе

В качестве одного из приемов, помогающих понять, как работает пространство—время согласно специальной теории относительности, можно использовать карту. Изобразите пространство и время и укажите, куда у вас есть возможность переместиться. Давайте для разминки начертим схему ньютоновского пространства—времени. Поскольку ньютоновские пространство и время абсолютны, мы на своей карте уникальным образом определим «моменты постоянного времени». Возьмем четыре измерения пространства и времени и порежем их на уникальные трехмерные экземпляры пространства в определенные моменты времени, как показано на рис. 4.4. (На странице книги мы можем рисовать лишь двумерные картинки; используйте свое воображение и представьте себе на каждом срезе мгновенный снимок трехмерного пространства.) Принципиально то, что ни у кого не возникает возражений относительно различий между пространством и временем; здесь нет никакого произвола.

Каждый ньютоновский объект (человек, атом, космический корабль) определяет мировую линию — путь, по которому этот объект движется сквозь пространство—время (даже когда вы сидите абсолютно неподвижно, вы все равно путешествуете через пространство—время, ведь вы непрерывно стареете, не так ли?¹⁵). И эти мировые линии подчиняются строгому правилу: пройдя через какой-то момент во времени, они не могут сделать пол-оборота назад

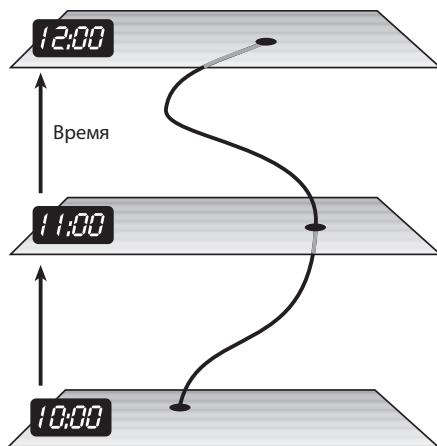


Рис. 4.4. Ньютоновские пространство и время. Вселенная нарезана на моменты постоянного времени, однозначно разделяющие время на прошлое и будущее. Мировые линии реальных объектов никогда не смогут вернуться назад по своим следам и пережить какой-то момент времени более одного раза

и пройти через тот же самый момент второй раз. Ваша скорость может быть сколь угодно высокой — сейчас вы здесь, а секунду спустя уже на расстоянии миллиарда световых лет, но вы обязаны двигаться во времени только вперед, и ваша мировая линия пересекает каждый момент в точности один раз.

В теории относительности все совсем не так. На смену ньютоновскому правилу «вы обязаны двигаться вперед во времени» приходит новое правило: вы обязаны двигаться со скоростью меньше скорости света. (Если только вы не фотон или другая безмассовая частица; в таком случае ваша скорость в пустом пространстве всегда в точности совпадает со скоростью света.) А структура, в которую мы выше облекли ньютоновское пространство—время (набор слов, представляющих уникальные моменты времени), заменяется структурой нового вида: *световыми конусами*.

Концептуально световые конусы довольно просты. Возьмите событие — одиночную точку в пространстве—времени — и вообразите всевозможные пути, которыми свет мог добраться до этого события или покинуть его; эти пути и образуют световой конус, связанный с данным событием. Гипотетические лучи света, исходящие из события, определяют световой конус будущего, а лучи, приходящие к событию, соответствуют световому конусу прошлого. Говоря «световой конус», мы имеем в виду оба этих конуса. Правило, гласящее, что вы не можете двигаться со скоростью, превышающей скорость света,

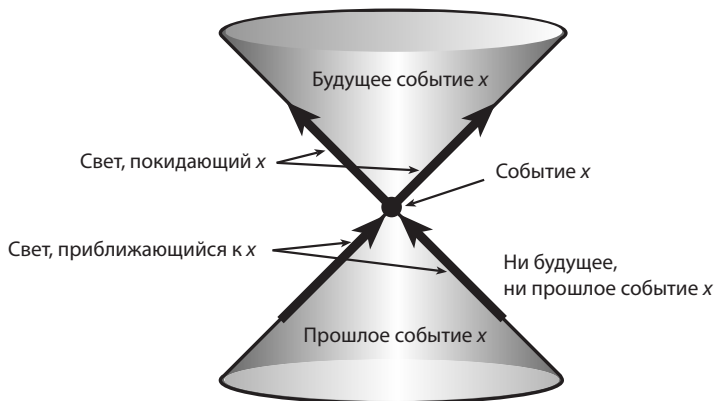


Рис. 4.5. Пространство—время вблизи определенного события x . Согласно теории относительности, у каждого события есть световой конус, объединяющий все возможные пути, по которым свет мог бы прийти к этой точке или покинуть ее. События за пределами такого конуса невозможно однозначно отнести к «прошлому» или к «будущему»

эквивалентно заявлению о том, что ваша мировая линия не должна выходить за пределы световых конусов тех событий, через которые она проходит. Мировые линии, подчиняющиеся этому правилу и описывающие объекты со скоростями, не превышающими скорость света, называются времениподобными. Если каким-то образом вам удалось бы превысить скорость света, то ваша мировая линия стала бы «пространственноподобной», так как располагалась бы больше вдоль пространства, чем времени. Мировую линию объекта, движущегося в точности со скоростью света, можно назвать «светоподобной».

В ньютоновском пространстве—времени можно, начиная с одиночного события, определить поверхность постоянного времени, однозначно рассекающую Вселенную на две части. Для этого необходимо набор всех событий разделить на события в прошлом и в будущем (плюс «одновременные» события, расположенные точно на поверхности). В мире, подчиняющемся теории относительности, это невозможно. Световой конус, связанный с событием, разделяет пространство—время на прошлое данного события (события внутри светового конуса прошлого), будущее данного события (события внутри светового конуса будущего), сам световой конус и набор точек за его пределами, не относящихся ни к прошлому, ни к будущему.

Обычно окончательно запутывает людей именно этот, последний фрагмент. Подсознательно основываясь на ньютоновском способе мышления о мире, мы

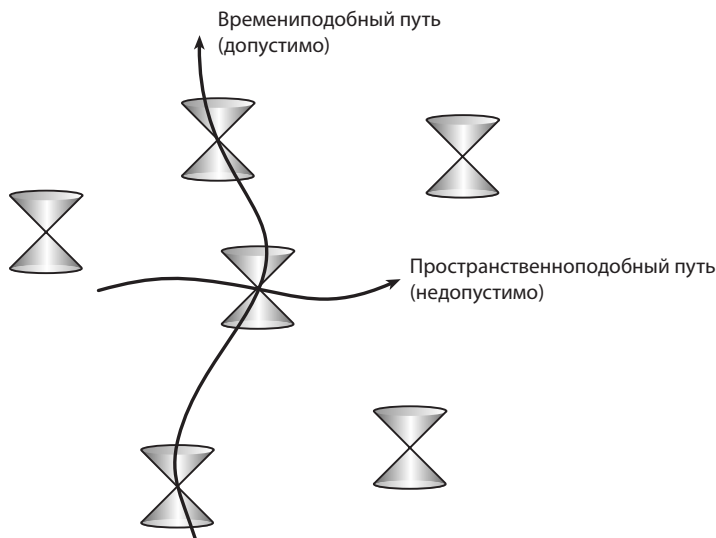


Рис. 4.6. Световые конусы приходят на замену моментам постоянного времени из ньютоновского пространства—времени. Мировые линии массивных частиц должны приходить в событие через световой конус прошлого, а покидать его через световой конус будущего — это времениподобный путь. Пространственноподобные пути соответствуют движению быстрее света и, следовательно, недопустимы

считаем, что события либо случились в прошлом, либо произойдут в будущем, либо происходят одновременно по отношению к некоторому событию на нашей собственной мировой линии. В мире теории относительности события, разделенные пространственноподобным интервалом (то есть находящиеся за пределами световых конусов друг друга) невозможно отнести ни к одной из перечисленных категорий. При желании мы могли бы *по своему усмотрению* начертить несколько поверхностей, рассечь ими пространство—время и обозначить их как поверхности постоянного времени. Это позволило бы использовать время как координаты в пространстве—времени (вспомните обсуждение в главе 1). Однако результат отражал бы наш личный выбор, а не реальные особенности Вселенной. В теории относительности понятие «одновременных удаленных событий» просто не имеет смысла.¹⁶

Когда вы рисуете карту пространства—времени, аналогичную изображенной на рис. 4.6, кажется естественным добавить на чертеж вертикальную ось, обозначенную «время», и горизонтальную (или даже две), обозначенную «пространство». Свою версию мы умышленно нарисовали без обозначения

каких-либо осей. Смысл пространства—времени в общей теории относительности в том и заключается, что в нем отсутствует фундаментальное разделение на «время» и «пространство». Световые конусы, устанавливающие границы возможного прошлого и будущего для каждого события, не появляются дополнительно к ньютоновскому разделению пространства—времени на время и пространство; они полностью *заменяют* собой эту структуру. Время можно измерять вдоль каждой отдельной мировой линии, но недопустимо считать его неотъемлемым свойством всего пространства—времени.

С нашей стороны было бы безответственно продолжать обсуждение, не уделив особого внимания еще одному различию между временем и пространством: у времени только одно измерение, тогда как пространство трехмерно.¹⁷ Мы не можем точно сказать, почему это так. Я имею в виду, что мы еще недостаточно глубоко понимаем фундаментальные законы физики, для того чтобы с уверенностью говорить о существовании причин, по которым у времени не может быть более одного измерения или, если уж на то пошло, почему их не может быть ноль. Мы знаем только, что жизнь была бы совсем другой, если бы у времени было несколько измерений. При наличии единственного измерения физическим объектам (движущимся по времениподобным путям) не остается ничего другого, кроме как перемещаться в единственно возможном направлении. Если бы измерений было несколько, не было бы ничего, что заставило бы нас двигаться вперед во времени; мы могли бы, например, ходить кругами. Остается открытым вопрос, можно ли в этом случае построить согласованную физическую теорию, но наша жизнь точно была бы совершенно иной.

Самое знаменитое уравнение Эйнштейна

Опубликованная в 1905 году основная статья Эйнштейна «К электродинамике движущихся тел», в которой он изложил принципы специальной теории относительности, заняла тридцать страниц в *Annalen der Physik*, ведущем немецком научном журнале того времени. Вскоре после этого ученый опубликовал двухстраничную статью под заголовком «Зависит ли инерция тела от содержащейся в нем энергии?»,¹⁸ в которой указывал на очевидный, но интересный вывод из первой, более длинной работы: энергия объекта, находящегося в покое, пропорциональна его массе. (Понятия «масса» и «инерция» здесь взаимозаменяемы.) По сути, в этом и состоит идея, несомненно, самого знаменитого уравнения в истории:

$$E = mc^2.$$

Постараемся как следует осмыслить это уравнение, ведь зачастую его понимают не совсем верно. Множитель c^2 — это, разумеется, скорость света в квадрате. Заметив в уравнении скорость света, физики сразу подумают: «Ага! Значит, здесь не обошлось без теории относительности». Множитель m — это масса рассматриваемого объекта. В некоторых источниках вы можете прочитать о «релятивистской массе», которая увеличивается, когда объект находится в движении, но это не самая удобная характеристика. Лучше считать m единственной и постоянной массой объекта, которой тот обладает в состоянии покоя. Наконец, E — это не совсем «энергия». В данном уравнении эта величина обозначает энергию покоящегося объекта. Если объект начнет движение, его энергия, конечно же, возрастет.

Таким образом, знаменитое уравнение Эйнштейна утверждает, что энергия объекта, находящегося в покое, равна произведению массы данного объекта на квадрат скорости света. Обратите внимание на, казалось бы, безобидный термин «объект». В мире есть не только объекты. Например, мы уже упоминали темную энергию, ответственную за ускорение Вселенной. Непохоже, чтобы она представляла собой множество частиц или других объектов; темная энергия равномерно наполняет пространство—время. Поэтому если речь идет именно о темной энергии, уравнение $E=mc^2$ неприменимо. Аналогично, некоторые объекты (такие, как фотоны) попросту не могут находиться в состоянии покоя, так как они всегда перемещаются со скоростью света. В таких случаях уравнение Эйнштейна также неприменимо.

Каждому известен практический смысл данного уравнения: даже небольшой объем вещества, обладающего массой, эквивалентен огромному запасу энергии (по сравнению со значениями, с которыми мы имеем дело в обычной жизни, скорость света — огромное число). Существует много разных форм энергии, и специальная теория относительности утверждает, что масса — это одна из форм, которую может принимать энергия. Энергия может переходить из одной формы в другую и обратно, и это происходит постоянно. Область применения формулы $E = mc^2$ не ограничивается покрытыми тайнами сферами ядерной физики и космологии; она распространяется на все типы покоящихся объектов — хоть на Марсе, хоть в вашей гостиной. Если взять лист бумаги и сжечь его, позволив получившимся фотонам улететь вместе со своим запасом энергии, то оставшийся пепел вместе с другими продуктами горения будет весить чуть меньше (как бы мы ни старались собрать их все), чем исходный лист бумаги плюс участвовавший в горении кислород. $E = mc^2$ — это не только атомные бомбы, это важнейшая характеристика круговорота энергии в окружающем мире.

Примечания

- ¹ С другой стороны, какими достижениями объясняется популярность Пэрис Хилтон, остается не меньшей загадкой.
- ² Эдрик Тонт (Тайгер) Вудс — знаменитый американский гольфист. — *Примеч. ред.*
- ³ В 1905 году — в свой «удивительный год» — Эйнштейн опубликовал серию работ, каждая из которых в отдельности способна была вознести карьеру практически любого ученого до невероятных высот: окончательная формулировка специальной теории относительности, объяснение фотоэлектрического эффекта (подразумевающее существование фотонов и закладывающее основы квантовой механики), построение теории броуновского движения в терминах случайных столкновений на атомном уровне и открытие эквивалентности массы и энергии. Большую часть следующего десятилетия он посвятил разработке теории гравитации; свой окончательный ответ — общую теорию относительности — Эйнштейн получил в 1915 году, когда ему было тридцать шесть лет. Скончался Эйнштейн в 1955 году в возрасте семидесяти шести лет.
- ⁴ Необходимо также вспомнить нидерландского физика Хендрика Антона Лоренца, который еще в 1892 году высказал идею о том, что время и расстояние для объектов, движущихся со скоростью, близкой к скорости света, становятся иными, и разработал «преобразование Лоренца» — соотношения, устанавливающие связь между измерениями, полученными движущимися один относительно другого наблюдателями. Лоренц измерял скорости относительно некоего фона — *эфира*; Эйнштейн первым догадался, что эфир — ненужная выдумка.
- ⁵ *Galison, P. Einstein's Clocks, Poincaré's Maps: Empires of Time.* New York: W.W. Norton, 2003. По прочтении книги Галисона может создаться впечатление, что он находит работу Пуанкаре более интересной, чем исследования Эйнштейна. Тем не менее когда автору выпадает возможность поставить фамилию Эйнштейна в заглавие книги, она обычно оказывается на первом месте. Эйнштейн — залог успешных продаж.
- ⁶ Джордж Джонсон (*Johnson, G. The Theory That Ate the World // New York Times*, 2008, August 22, BR16) в своей рецензии на книгу Леонарда Сасскинда «Битва при черной дыре» (*Susskind, L. The Black Hole War: My Battle with Stephen Hawking to Make the World Safe for Quantum Mechanics.* New York: Little, Brown, 2008) жалуется на несчастную судьбу современного читателя научно-популярных книг по физике: «Мне не терпелось узнать, каким же образом Сасскинд и компания показали, что Хокинг, вероятно, не совсем прав, — что информация действительно сохраняется. Однако для начала мне пришлось пройти 66-страничный ускоренный курс теории относительности и квантовой механики. Создается впечатление, что без этого не обходится ни одна книга о современной физике, — а каково тем, кто интересуется темой и прочитал куда больше одной? (Представьте себе, что в предвыборной кампании президента каждое выступление начинается с доклада об истоках афинской демократии и наследии французского просвещения.)» Решение очевидно: основы теории относительности и квантовой механики должны входить в стандартный курс среднего образования наравне с истоками афинской демократии и наследием французского просвещения, а до тех пор эта глава будет служить частью неизбежного ускоренного курса. Хорошие новости: мы в основном сосредоточимся на

роли «времени» и, таким образом, постараемся избежать в своих рассуждениях избитых истин и банальных аналогий.

- ⁷ Создатели научно-популярных фильмов и сериалов по большей части относятся к этому закону природы с ужасающим пренебрежением — в основном потому, что имитировать невесомость чрезвычайно трудно. (В одной из серий фильма «Звездный путь: Энтерпрайз» есть уморительная сцена, в которой космический корабль «потерял гравитацию» как раз в тот момент, когда капитан Арчер принимал душ.) Искусственная гравитация, позволяющая капитану и команде целеустремленно вышагивать по капитанскому мостику, не совместима с законами физики в том виде, какими мы их знаем. Если вы не ускоряетесь, то единственный способ создать необходимую силу тяжести — таскать с собой предмет массой с небольшую планету, что, как вы понимаете, не совсем практично.
- ⁸ Скорость — это всего лишь темп изменения положения, а ускорение — темп изменения скорости. В терминах дифференциального исчисления скорость — это первая производная положения, а ускорение — вторая. Важное свойство классической механики состоит в том, что положение и скорость полностью задают состояние частицы, ускорение же определяется локальными условиями и соответствующими законами физики.
- ⁹ Упражнение для читателей: можно ли вообразить мир, в котором абсолютная ориентация в пространстве поддается точному определению? А как насчет мира, в котором нельзя определить абсолютное положение, скорость и ускорение, но зато темп изменения ускорения является наблюдаемым?
- ¹⁰ Проигрывая возможные ситуации, постарайтесь все же не слишком увлекаться. Сегодня мы твердо убеждены, что никакой среды, пронизывающей все пространство и относительно которой мы могли бы измерять нашу скорость, не существует. Однако в конце XIX века люди верили в ее существование, называя такую среду эфиром. С другой стороны, мы верим в существование в каждой точке пространства полей, причем некоторые поля (например, поле Хиггса) в пустом пространстве могут даже иметь ненулевые значения. Сегодня мы верим, что волны — электромагнитные и иные — это распространяющиеся колебания этих полей. Однако поле не считается настоящей «средой» по двум причинам: во-первых, оно может иметь нулевое значение, а во-вторых, невозможно измерить скорость по отношению к нему. Кроме того, вполне вероятно, что мы многого не знаем. Некоторые отличающиеся богатым воображением физики-теоретики всерьез задаются вопросом, а нет ли вокруг нас каких-то новых полей, которые задают абсолютную систему координат, относительно которой мы могли бы измерять свою скорость (см., например: *Mattingly, D. Modern Tests of Lorentz Invariance // Living Reviews in Relativity*, 2005, 8, p. 5). Подобные поля иронично называют «эфиром», но это совершенно не тот эфир, о котором говорилось в XIX веке. В частности, они никак не связаны с распространением электромагнитных волн и прекрасно согласуются с основными принципами теории относительности.
- ¹¹ Некоторую историческую информацию вы найдете в книге *Miller, A. I. Albert Einstein's Special Theory of Relativity. Emergence (1905) and Early Interpretation (1905–1911)*. Reading: Addison-Wesley, 1981.
- ¹² Для того чтобы в реальности испытать сокращение длины или растяжение времени, нам потребуются либо невероятно точные измерительные приборы, либо аппарат, позволяющий перемещаться со скоростью, близкой к скорости света. В нашей жизни ни

подобные приборы, ни подобные аппараты на каждом углу не встречаются, из-за чего вся эта специальная теория относительности кажется нам такой нелогичной и непонятной. Несомненно, тот факт, что большинство окружающих нас объектов движутся с малыми относительными скоростями по сравнению со скоростью света, — интересная особенность окружающего мира, и полная теория Вселенной должна попытаться ее объяснить.

- ¹³ Вероятно, вам кажется, что этот пример не доказывает невозможность движения со скоростью, превышающей скорость света, — только невозможность разогнать медленный объект, то есть придать ему ускорение, позволяющее достигнуть и превысить скорость света. Возможно, существуют какие-то объекты, всегда движущиеся со скоростью выше скорости света, и их даже не требуется для этого как-то специально ускорять. Такая логическая возможность действительно существует; соответствующие гипотетические частицы называют тахионами. Однако, насколько нам известно, в реальном мире тахионы не существуют, и это даже хорошо: возможность отправлять сигналы со скоростью выше скорости света подразумевала бы возможность отправлять сигналы в прошлое, а это бы попергло в хаос все наши представления о причинно-следственных связях.
- ¹⁴ Иногда вам будут попадаться утверждения о том, что специальная теория относительности не способна справиться с ускорением тел и для того, чтобы учесть ускорение, требуется общая теория относительности. Это полная чепуха. Необходимость в общей теории относительности возникает тогда (и только тогда), когда важную роль начинают играть сила притяжения, а пространство—время искривляется. Вдалеке от любых гравитационных полей, когда пространство—время плоское, прекрасно действуют законы специальной теории относительности, независимо от того, что происходит с участниками событий, — пусть даже они ускоряются. Траектории равномерного прямолинейного движения (без ускорения) в специальной теории относительности действительно имеют особый статус, так как все они равноправны. Однако совершенно недопустимо на основании этого делать вывод о том, что траектории движения с ускорением вообще не поддаются описанию на языке специальной теории относительности.
- ¹⁵ Прошу прощения за некрасивое проявление временного шовинизма (в моем предположении, что человек движется вперед во времени), не говоря уже о том, что я не устоял перед метафорой «движения» сквозь время. Фраза «каждый объект движется сквозь пространство—время» полна предвзятости, и гораздо правильнее было бы сказать «история каждого объекта описывает мировую линию, протянувшуюся сквозь пространство—время». Однако иногда такая педантичность попросту надоедает.
- ¹⁶ Один из способов связать общую теорию относительности с ньютоновским пространством—временем — вообразить, что скорость света внезапно стала бесконечно большой. В этом случае световые конусы на нашей схеме расширятся до предела, а пространственно-подобная область сожмется и превратится в поверхность — в точности как в ньютоновском случае. Это соблазнительный путь, но все же неприемлемый. Как минимум, мы всегда можем выбрать такие единицы измерения, в которых скорость света будет равна единице; просто попробуйте измерять время в годах, а расстояние — в световых годах. В действительности в этой ситуации мы пытаемся изменить все существующие в природе константы, для того чтобы остальные скорости по сравнению со скоростью света

уменьшились. Даже если бы нам это удалось, процесс был бы неоднозначным, ведь мы выбрали предел, переводящий световые конусы в какие-то конкретные поверхности постоянного времени.

¹⁷ Имеется в виду, что у пространства не менее трех измерений. Вполне возможно (и считается само собой разумеющимся в некоторых сообществах физиков-теоретиков), что в пространстве существуют дополнительные измерения, невидимые для нас, по крайней мере при низких энергиях, которые могут непосредственно наблюдаться. Дополнительные измерения могут быть спрятаны несколькими способами, см., например: *Greene, B. The Elegant Universe: Superstrings, Hidden Dimensions, and the Quest for the Ultimate Theory.* New York: Vintage, 2000; *Randall, L. Warped Passages: Unraveling the Mysteries of the Universe's Hidden Dimensions.* New York: HarperCollins, 2005. Существование скрытых времениподобных измерений куда менее вероятно, однако ничего нельзя утверждать наверняка.

¹⁸ Оба повторно опубликованы в сборнике: *Einstein, A., ed. The Principle of Relativity / Translated by W. Perrett and G. B. Jeffrey.* Mineola: Dover, 1923.

Глава 5

Время гибкое

Вселенная вечна потому, что она живет не для себя; преображаясь, она дает жизнь другим.

Лао-цзы. Дао дэ цзин

Основным стимулом к разработке специальной теории относительности стали не труднообъяснимые результаты экспериментов (хотя эксперимент Майкельсона—Морли, определенно, относится к этой категории), а очевидный конфликт между двумя существовавшими теоретическими подходами.¹ С одной стороны, у нас была ньютоновская механика — основа всего, что мы знали о физических законах, на базе которой строились последующие теории, с другой — предложенная в середине XIX века Джеймсом Клерком Максвеллом теория, объединяющая электричество и магнетизм, которая объяснила впечатляющий диапазон экспериментальных явлений. Проблема заключалась лишь в том, что эти две удивительно успешные теории не сочетались друг с другом. Ньютоновская механика подразумевала, что относительная скорость двух объектов, движущихся мимо друг друга, всегда равна векторной сумме их скоростей; максвелловский электромагнетизм утверждал, что скорость света — исключение из этого правила. Специальная теория относительности сумела объединить эти две теории в единое целое, представив новый формализм для механики, где скорость света действительно занимает особое место, а медленные частицы все так же подчиняются правилам ньютоновской модели.

Триумф специальной теории относительности, как и многих других идей, кардинально поменявших актуальную картину мира, имел свою цену. В данном случае теория тяготения, безупречно объяснявшая движение планет, — величайший успех ньютоновской физики — оказалась выброшенной на обочину. Поскольку гравитация, как и электромагнетизм, — самая очевидная сила во Вселенной, Эйнштейн поставил себе целью описать ее на языке теории относительности. Казалось бы, это должно было означать модификацию пары-тройки уравнений, для того чтобы согласовать формулу Ньютона с инвариантностью относительно буста, однако попытки проследовать по этому пути печальнейшим образом провалились.

В конечном итоге Эйнштейна, конечно же, осенила блестящая догадка. По сути, это произошло благодаря тому же эксперименту с космическим кораблем, который мы рассматривали в предыдущей главе (он придумал его первым). Описывая наше путешествие в этом гипотетическом изолированном

корабле, я специально несколько раз упомянул, что мы находимся вдалеке от любых гравитационных полей, поэтому нам не приходится беспокоиться о возможности падения на звезду или о том, что наши зонды притянет к себе ближайшая планета. Однако как изменились бы условия задачи, если бы мы находились поблизости от сильного гравитационного поля? Представьте себе, что наш корабль кружит по околоземной орбите. Как бы это повлияло на эксперименты, проводимые внутри космического судна?

Ответ Эйнштейна был таким: гравитационное поле никак не повлияло бы на результаты экспериментов при условии, что мы ограничимся относительно небольшими областями пространства и короткими интервалами времени. Мы можем проводить любые эксперименты, какие только нам заблагорассудится: измерять скорости химических реакций, ронять мячи и смотреть, как они будут падать, наблюдать за поведением весов на пружинах — и при этом получать на околоземной орбите в точности такие же результаты, как если бы мы улетели далеко в межзвездное пространство. Разумеется, если подождать достаточно долго, мы могли бы догадаться, что движемся по орбите. Предположим, мы позволили вилке и ложке свободно парить по кабине, причем из двух предметов чуть ближе к Земле оказалась вилка. Следовательно, гравитационное притяжение на вилку действует чуть сильнее, чем на ложку. Таким образом, вилка будет постепенно отдаляться от ложки, но для того, чтобы заметить это, необходимо, чтобы прошло достаточно много времени. Если же ограничиться достаточно маленькими областями пространства и времени, то какие бы эксперименты мы ни проводили, ни один не укажет на действие силы тяжести, не дающей кораблю покинуть околоземную орбиту.

Сравните сложность обнаружения гравитационного поля с легкостью обнаружения, например, электрического поля. Последнее сделать проще простого: возьмите те же самые вилку и ложку, но придайте вилке положительный заряд, а ложке — отрицательный. Электрическое поле будет толкать противоположно заряженные предметы в противоположные стороны — благодаря этому совсем несложно проверить, есть ли поблизости какие-нибудь электрические поля.

В случае гравитации отличие заключается в том, что не существует такого понятия, как отрицательный гравитационный заряд. Гравитация *универсальна* — все во Вселенной реагирует на ее воздействие одинаково. Следовательно, ее невозможно обнаружить в небольшой области пространства—времени только по различиям в ее воздействии на объекты в разных событиях пространства—времени. Эйнштейн поднял это наблюдение до статуса закона природы, *принципа эквивалентности*: никакие локальные эксперименты не позволяют обнаружить существование гравитационного поля.

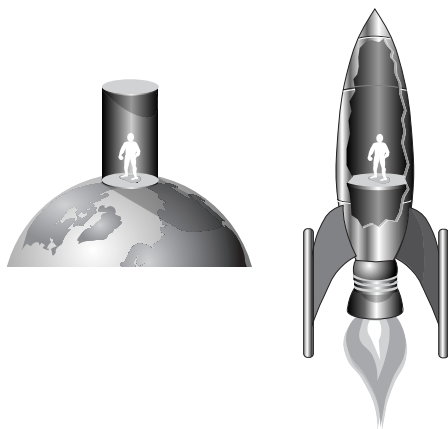


Рис. 5.1. Гравитационное поле планеты локально неотлично от результата ускорения ракеты

Я знаю, о чем вы думаете: «Да у меня нет никаких проблем с обнаружением силы тяготения. Я сижу в своем кресле, а не парю по комнате только благодаря гравитации». Но откуда вы знаете, что это гравитация? Проверить это можно, лишь выглянув в окно и убедившись, что вы все еще на поверхности Земли. Если бы вы находились внутри ускоряющегося космического корабля, вас точно так же вдавливало бы в кресло. Как свободное падение в межзвездном пространстве ничем не отличается от свободного падения на околоземной орбите, постоянное ускорение в космическом корабле абсолютно аналогично сидению в кресле в гравитационном поле Земли. Именно об этой «эквивалентности» и идет речь в эйнштейновском принципе: видимое воздействие силы притяжения эквивалентно нахождению в ускоряющейся системе координат. То, что вы чувствуете, сидя в кресле, — это не сила притяжения; это сила реакции кресла подталкивает вас в мягкое место. Согласно общей теории относительности, свободное падение — это естественное, непринудительное состояние движения, и лишь реакция поверхности Земли сбивает нас с пути, не позволяя следовать в заданном направлении.

Искривляя прямые линии

Вы или я, догадавшись в результате долгих размышлений о природе гравитации до великолепного принципа эквивалентности, просто кивнули бы с чувством выполненного долга и продолжили жить дальше. Однако Эйнштейн был куда

умнее — он в полной мере осознал, какое важное открытие в действительности сделал. Если силу притяжения невозможно обнаружить с помощью локальных экспериментов, то это на самом деле вовсе никакая и не «сила» — в том смысле, в каком мы считаем силами электричество и магнетизм. Поскольку сила притяжения универсальна, гораздо логичнее думать о ней как о некотором свойстве самого пространства—времени, а не представлять себе гравитацию как силовое поле, растянувшееся на все пространство—время.

В частности, догадался Эйнштейн, гравитацию можно считать проявлением *искривления* пространства—времени. Мы уже много раз обсуждали роль пространства—времени как обобщения понятия пространства и говорили о том, что время, прошедшее вдоль определенной траектории, — это мера пройденного расстояния в пространстве—времени. Однако пространство не обязательно должно быть жестким, плоским и прямолинейным; оно может искривляться, растягиваться и деформироваться. Эйнштейн утверждает, что то же самое может происходить и с пространством—временем.

Проще всего визуализировать двумерное пространство с помощью модели, например, выполненной из листа бумаги. Плоский лист бумаги не искривлен, и причина, по которой мы в этом уверены, заключается в том, что он подчиняется принципам старой доброй евклидовой геометрии. Две параллельные линии, например, никогда не пересекутся, и расстояние между ними никогда не увеличится и не уменьшится.

И наоборот, рассмотрим двумерную поверхность сферы. В первую очередь нам необходимо обобщить понятие прямой линии, поскольку для сферы данное понятие совсем не так очевидно. В евклидовой геометрии, которую мы изучали в школе, прямая линия соответствует кратчайшему расстоянию между двумя точками. Поэтому давайте сформулируем аналогичное определение: «прямой линией» в искривленной геометрии мы будем называть самую короткую кривую, соединяющую две точки. Такая кривая на сфере представлена дугой большой окружности. Если взять на сфере два исходно параллельных пути, идущих вдоль больших окружностей, то они в итоге пересекутся. Это доказывает, что принципы евклидовой геометрии более не имеют силы, и это один из способов проверить, что геометрия на поверхности сферы действительно искривлена.

Эйнштейн предположил, что четырехмерное пространство—время может быть искривлено, — в точности как поверхность двумерной сферы. Однако в отличие от сферы кривизна пространства—времени не обязательно везде одинакова, величина и форма кривизны могут меняться от точки к точке. Но самая соль вот в чем: даже когда мы видим, что планета «отклоняется от

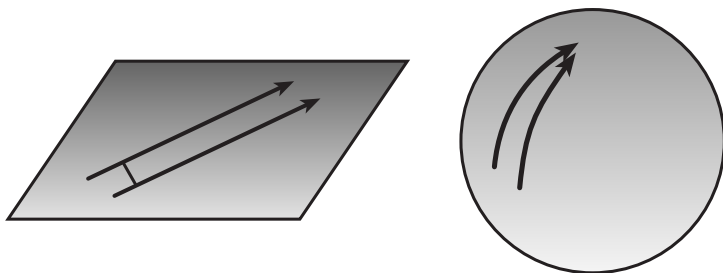


Рис. 5.2. Плоская геометрия, где параллельные прямые никогда не пересекаются, и геометрия искривленной поверхности, на которой первоначально параллельные прямые в конце концов пересекаются

прямого направления силой притяжения», Эйнштейн заявляет, что в действительности эта планета движется по прямой линии. По крайней мере, настолько прямой, насколько это возможно в кривом пространстве—времени, сквозь которое путешествует планета. Так как траектория прямолинейного равномерного движения соответствует максимальному времени, которое часы могут измерить между двумя событиями, можно сказать, что прямая линия сквозь пространство—время — та, которая максимизирует показания на часах, точно так же, как прямая линия в пространстве минимизирует показания одометра.

Давайте, если можно так выразиться, опустимся на Землю. Рассмотрим спутник, движущийся по орбите и оборудованный часами. Также возьмем другие часы и установим их на вершине башни такой же высоты, как и вращающийся спутник. В момент, когда спутник проходит мимо башни, часы синхронизируются. Какие показания мы увидим на обоих часах, когда спутник совершит один оборот? (В целях этого абсолютно нереального мысленного эксперимента мы проигнорируем вращение Земли.) С точки зрения общей теории относительности часы на спутнике движутся без ускорения; они находятся в состоянии свободного падения, и их траектория сквозь пространство—время максимально приближена к прямой линии. В то же время часы, установленные на башне, движутся с ускорением: сила, с которой на них действует башня, не дает им перейти в состояние свободного падения. Следовательно, при следующей встрече спутника с башней часы на спутнике покажут больше времени, чем часы на башне. Таким образом, часы на свободно падающем спутнике идут быстрее, чем часы на набирающей ускорение башне.

Не существует башен, способных вершиной коснуться спутника на околоземной орбите. Однако здесь, на поверхности Земли, есть много часов, которые регулярно обмениваются сигналами с часами на спутниках. Это — основной

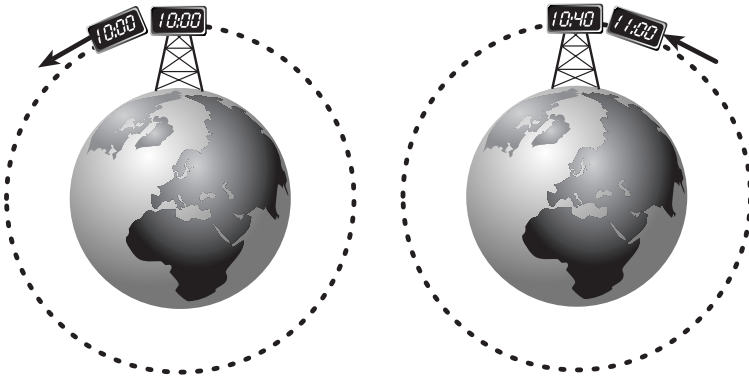


Рис. 5.3. Для часов на башне пройдет меньше времени, чем для часов на спутнике, так как траектория первых соответствует движению с ускорением

механизм системы глобального позиционирования (Global Positioning System, GPS), позволяющей в режиме реального времени оказывать помощь в навигации водителям автомобилей. Ваш личный GPS-приемник получает сигналы сразу с нескольких спутников, вращающихся вокруг Земли, и определяет свое местоположение, сравнивая время в разных сигналах. Если бы в расчетах не учитывалось гравитационное растяжение времени, обусловленное общей теорией относительности, то они бы потеряли всякую связь с реальностью. Для GPS-спутника на околоземной орбите продолжительность дня приблизительно на 38 микросекунд больше, чем для предметов на поверхности Земли. Чтобы не обучать приемники уравнениям общей теории относительности, инженеры придумали намного более простое решение: они настраивают часы на спутниках так, чтобы те шли чуть-чуть медленнее, обеспечивая, таким образом, согласованность времени на спутниках и на Земле.

Главное уравнение Эйнштейна

Говорят, каждая формула в книге вдвое сокращает объем ее продажи. Надеюсь, эта страница запрятана достаточно глубоко, и никто не обратит на нее внимания до покупки, потому что я все же поддамся искушению и добавлю одно уравнение, а именно уравнение Эйнштейна для гравитационного поля в общей теории относительности:

$$R_{\mu\nu} - \left(\frac{1}{2}\right)Rg_{\mu\nu} = 8\pi GT_{\mu\nu}.$$

Именно это уравнение сразу приходит на ум любому физика, когда речь заходит об уравнении Эйнштейна; знакомое всем соотношение $E = mc^2$ — всего лишь частная форма другого глобального закона. Вышеприведенное уравнение выражает основополагающий закон физики — оно показывает, как под воздействием материи во Вселенной пространство—время искривляется, создавая, таким образом, гравитацию. Как слева, так и справа от знака равенства в данном уравнении стоят не простые числа, а *тензоры* — геометрические объекты, объединяющие сразу несколько величин (если представлять их себе как массивы чисел размером 4×4 , вы будете недалеко от истины). Левая часть уравнения характеризует кривизну пространства—времени. Правая часть включает всевозможные величины, заставляющие пространство—время искривляться: энергию, импульс, давление и т. п. Одним махом уравнение Эйнштейна объясняет, как любой отдельно взятый набор частиц и полей во Вселенной создает кривизну пространства—времени определенного типа.

Согласно Исааку Ньютону, источником гравитации является масса; более тяжелые объекты порождают более сильные гравитационные поля. Во Вселенной Эйнштейна дело обстоит несколько сложнее. Центральное место занимает не масса, а энергия, а также важную роль в искривлении пространства—времени играют другие величины. Энергия вакуума, например, характеризуется не только энергией, но и натяжением — чем-то вроде отрицательного давления. В растянутой струне или резиновой ленте возникает натяжение, которое не расталкивает объект, а, наоборот, стягивает его обратно в исходное состояние. Именно комбинированное воздействие энергии и натяжения заставляет Вселенную ускоряться в присутствии энергии вакуума.²

Взаимодействие энергии с искривлением пространства—времени порождает удивительное следствие: в общей теории относительности энергия не сохраняется. Не каждый эксперт согласится с данным утверждением, и вовсе не потому, что это противоречит прогнозам теории, а потому, что мнения людей относительно того, как определять «энергию» и «сохранение», в значительной степени расходятся. В ньютоновском абсолютном пространстве—времени существует хорошо определенное понятие энергии отдельных объектов, которую мы можем суммировать для получения полной энергии Вселенной, и эта величина никогда не меняется (остается одной и той же в каждый момент времени). Однако в общей теории относительности, которая рассматривает пространство—время динамически, при движении пространства—времени энергия может закачиваться в вещество или высасываться из него. Например, при расширении Вселенной плотность энергии вакуума остается абсолютно постоянной. Это означает, что энергия кубического сантиме-

тра постоянна, а количество кубических сантиметров увеличивается, — следовательно, энергия растет. И наоборот, во Вселенной, где преобладает излучение, полная энергия уменьшается, так как каждый фотон теряет энергию вследствие космологического красного смещения.

Казалось бы, уйти от вывода, что энергия не сохраняется, совсем несложно — нужно просто учесть «энергию гравитационного поля». Однако не все так просто. Оказывается, что однозначного локального определения энергии в гравитационном поле не существует (и неудивительно, ведь гравитационное поле не поддается локальному обнаружению). Приходится стиснув зубы признать, что в общей теории относительности энергия действительно не сохраняется, за исключением некоторых особых случаев.³ Однако не следует думать, что, признавая это, мы смиряемся с погружением мира во тьму хаоса; зная искривление пространства—времени, можно точно предсказать видоизменение любого интересующего нас источника энергии.

Дыры в пространстве—времени

Вероятно, самое занимательное и впечатляющее предсказание общей теории относительности — существование черных дыр. Им часто дают довольно приземленное определение: «Объекты, гравитационное поле которых настолько сильно, что покинуть их не могут даже кванты света». В действительности все намного интереснее.

Даже в ньютоновской теории гравитации ничто не мешает нам рассматривать настолько массивные и плотные объекты, что скорость убегания от них будет выше скорости света, — это, по сути, «черные» тела. Данная идея не нова — ее рассматривали, в частности, британский геолог Джон Митчелл в 1783 году и Пьер-Симон Лаплас в 1796-м.⁴ В то время ее жизнеспособность вызывала определенные сомнения, ведь никто не мог однозначно сказать, влияет ли гравитация на свет, а скорость света еще не приобрела ту фундаментальную значимость, которая ей приписывается в теории относительности. Однако еще важнее то, что, казалось бы, незначительно отличающиеся формулировки «скорость убегания выше скорости света» и «кванты света не могут покинуть» на самом деле скрывают огромные различия в базовых понятиях. Скорость убегания — это скорость, с которой объект должен начать двигаться вверх, для того чтобы вырваться из гравитационного поля тела *без какого-либо дополнительного ускорения*. Если я захочу запустить бейсбольный мяч в космическое пространство, мне придется бросить его в воздух со скоростью, превышающей скорость убегания. Но почему бы мне, с другой стороны,

не поместить тот же самый мячик в ракету и не отправить в космос путем постепенного ускорения? В таком случае мне даже не придется заботиться о том, чтобы достичь скорости убегания. Другими словами, не обязательно достигать скорости убегания для того, чтобы фактически покинуть гравитационное поле тела; если у вас достаточно топлива, вы можете перемещаться с той скоростью, которая вам удобна, даже если она будет намного ниже.

Однако настоящая черная дыра, согласно общей теории относительности, — штука куда более суровая. Это настоящая область невозврата: оказавшись в черной дыре, вы уже не сможете ее покинуть, какие бы технологические диковинки ни находились в вашем распоряжении. Причина в том, что общая теория относительности, в отличие от ньютоновской гравитации и специальной теории относительности, допускает искривление пространства—времени. В каждой точке пространства—времени присутствуют световые конусы, делящие пространство на прошлое, будущее и области, достичь которых невозможно. Однако, в отличие от специальной теории относительности, в общей теории относительности световые конусы не закреплены и не выстроены; они могут наклоняться и растягиваться, а пространство—время искривляется под действием вещества и энергии. Световые конусы, находящиеся вблизи тяжелого объекта, наклоняются в его сторону в полном соответствии с утверждением о том, что объекты притягиваются гравитационными полями. Черная дыра — это область пространства—времени, в которой световые конусы наклонились так сильно, что покинуть ее соответствующие объекты смогли бы, только превысив скорость света. Несмотря на сходство формулировок, это намного более серьезное заявление, чем «скорость убегания больше скорости света». Граница, определяющая область черной дыры и отделяющая области, из которых у вас еще есть шанс сбежать, от областей, где вам ничего не остается, кроме как продолжать погружаться в глубь неизвестности, называется *горизонтом событий*.

В реальном мире черные дыры могут образовываться разными способами, но стандартным сценарием считается коллапс достаточно массивной звезды. В конце 1960-х годов Роджер Пенроуз и Стивен Хокинг доказали одно поразительное свойство общей теории относительности: когда гравитационное поле становится достаточно сильным, *обязательно* образуется сингулярность.⁵ Возможно, вам это кажется само собой разумеющимся, ведь сила притяжения становится все больше и больше и в итоге стягивает вещество в одну точку. Однако в ньютоновской гравитационной теории все происходит совсем не так. Если очень сильно постараться, то добиться сингулярности, конечно, можно, но в общем случае вещество при сжатии всего лишь достигает максимальной

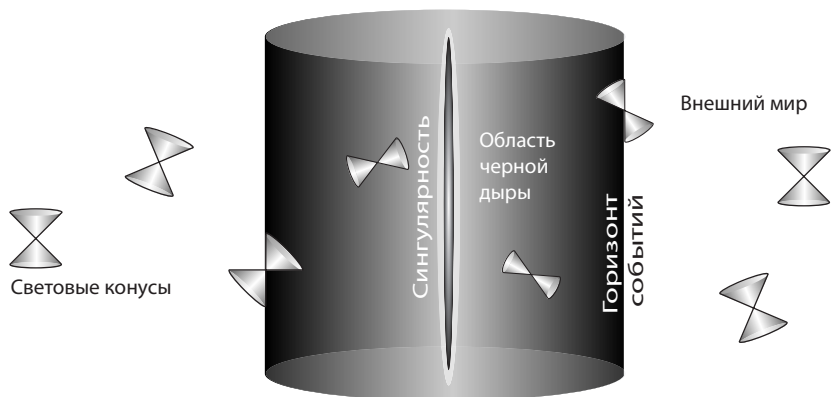


Рис. 5.4. Световые конусы наклоняются вблизи черной дыры. Горизонт событий, определяющий границу черной дыры, — это место, где конусы наклоняются так сильно, что единственной надеждой на побег становится движение со скоростью, превышающей скорость света

плотности, и больше ничего не происходит. В противоположность этому, в общей теории относительности плотность и кривизна пространства—времени возрастают неограниченно до тех пор, пока не образуют сингулярность бесконечной кривизны. Подобную сингулярность можно найти в любой черной дыре.

Было бы неверно считать, что сингулярность находится в «центре» черной дыры. Если внимательно рассмотреть схему на рис. 5.4, иллюстрирующую пространство—время вблизи черной дыры, то мы увидим, что световые конусы внутри горизонта событий продолжают наклоняться в сторону сингулярности. Нам уже известно, что световые конусы *определяют* то, что наблюдатель в данном событии называет «будущим». Таким образом, как и сингулярность Большого взрыва в прошлом, сингулярность черной дыры в будущем — это момент во времени, а не место в пространстве. И оказавшись за горизонтом событий, вы не сможете повернуть назад: сингулярность станет вашей суровой, но неизбежной судьбой, потому что она находится впереди во времени, а не по какому-то направлению в пространстве. Уклониться от попадания в сингулярность так же нереально, как уклониться от попадания в завтра.

Пересекая горизонт событий, вы вряд ли заметите что-то необычное. Это не какой-то силовой барьер, не энергетическая стена, проходя сквозь которую вы понимаете, что попали в черную дыру.⁶ Это всего лишь уменьшение числа вариантов развития событий; вариант «возвращение во внешнюю Вселенную» становится невозможным, а единственно доступным остается «нырок

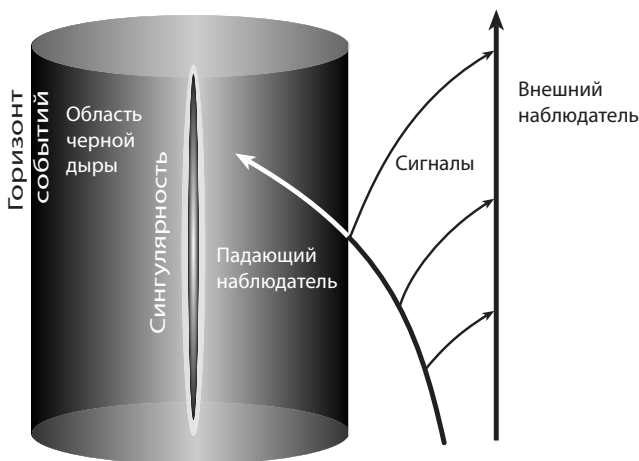


Рис. 5.5. Объект приближается к горизонту событий, но удаленному наблюдателю кажется, что он всего лишь замедляется и краснеет. Момент на мировой линии объекта, когда он пересекает горизонт, — это последнее мгновение, когда его можно увидеть снаружи

в сингулярность». Вообще, зная массу черной дыры, вы могли бы даже точно рассчитать, сколько времени (согласно вашим часам) пройдет до момента достижения сингулярности, когда вы прекратите существовать. В черной дыре, масса которой равна массе Солнца, это займет около одной миллионной доли секунды. Возможно, вы попробовали бы отсрочить ужасную гибель и сбежать от сингулярности, запустив ракетный двигатель, однако на самом деле это сыграло бы против вас. Согласно теории относительности, движение без ускорения *максимизирует* время между двумя событиями. Пытаясь бороться с неизбежным, вы лишь ускорили бы приближение конца.⁷

Момент на вашей траектории, когда вы, падая, пересекаете горизонт событий, определяется однозначно. Предположим, что вы отправляете своему другу, находящемуся за пределами черной дыры, непрерывный поток радиосигналов. Он получит только те сигналы, которые вы успели отправить до прохождения горизонта событий, и ни одного сигнала изнутри черной дыры. Но при этом вы не исчезнете внезапно из его поля зрения. Он продолжит получать ваши радиосигналы — просто через все более долгие интервалы и в искаженном виде, поскольку из-за большего красного смещения длина волны сигналов также будет постоянно возрастать. Последний момент вашего падения

перед пересечением горизонта с точки зрения внешнего наблюдателя вообще будет «заморожен», хотя картинка и будет с течением времени становиться все более тусклой и краснеть.

Белые дыры: черные дыры наоборот

Если вдуматься, во всей этой истории с черными дырами есть кое-что очень интригующее — выраженная асимметрия времени. В предыдущем обсуждении мы то и дело играючи вворачивали выражения, предполагающие направленность времени: мы говорили «стоит вам зайти за горизонт событий, вы уже не сможете вернуться» — но не «выйдя за пределы горизонта событий, вы уже не сможете вернуться». И это не проявление нашей лингвистической беспечности — сама природа черной дыры подразумевает асимметричность во времени. Сингулярность всегда в вашем будущем, а не в прошлом, и на этот счет не может быть двух мнений.

Это не проявление каких-то основополагающих физических законов. Общая теория относительности идеально симметрична во времени: для каждого пространства—времени, представляющего решение уравнения Эйнштейна, существует другое решение, которое идентично предыдущему, но обладает обратным ходом времени. Черная дыра — это одно из решений уравнения Эйнштейна, поэтому существуют и эквивалентные решения, «живущие в другую сторону», — *белые дыры*.

Для того чтобы получить определение белой дыры, нужно всего лишь взять описание черной дыры и заменить все слова, относящиеся ко времени, терминами с противоположным значением. В таком случае сингулярность окажется в прошлом, из которого появляются световые конусы. Горизонт событий будет лежать в будущем относительно сингулярности, а еще дальше будет находиться внешний мир. Горизонт обозначает место, выйдя за пределы которого вы уже никогда не сможете вернуться в область белой дыры.

Однако почему мы постоянно слышим о черных дырах во Вселенной, а о белых практически никто не говорит? Начнем с того, что «создать» белую дыру невозможно. Поскольку мы находимся во внешнем мире, сингулярность и горизонт событий белой дыры обязательно остались у нас в *прошлом*. Так что нас вообще не должен волновать вопрос, как сконструировать белую дыру. Если мы когда-либо обнаружим такой объект, это будет означать, что он существовал во Вселенной с самого начала.

Если подходить к вопросу со всей серьезностью, то нас должно насторожить слово «создать». Почему в мире, живущем в соответствии с обратимыми зако-

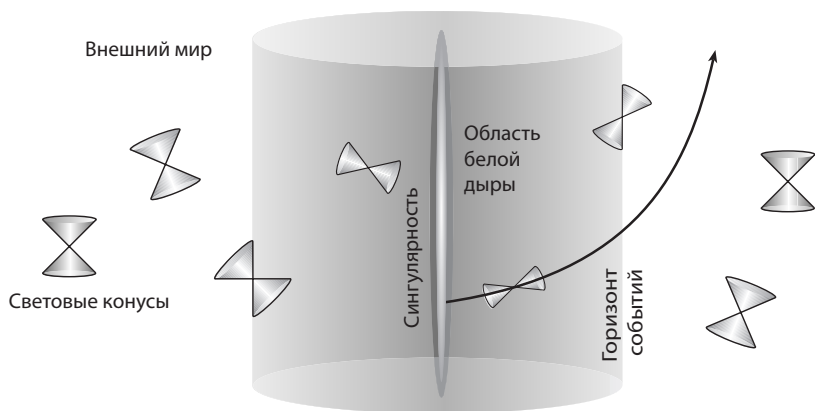


Рис. 5.6. Пространство—время белой дыры — это отраженная во времени версия черной дыры

нами физики, мы мыслим в терминах «создания» вещей, которые продолжают существовать в будущем, но не вещей, способных попасть в прошлое и занять достойное место там? По той же причине, почему мы верим в свободу воли: условие низкой энтропии в прошлом ставит жесткие ограничения на то, что могло произойти раньше, а отсутствие подобных граничных условий в будущем оставляет практически бесконечное число возможностей дальнейшего развития событий.

Следовательно, ответ на вопрос «Почему процесс образования черной дыры кажется достаточно понятным, а белые дыры мы если и найдем во Вселенной, то уже в готовом состоянии?» должен быть очевидным: потому что энтропия черной дыры больше, чем энтропия тех вещей, из которых ее можно было бы сделать. На самом деле вычислить значение энтропии весьма непросто; при этом необходимо принимать во внимание излучение Хокинга (мы поговорим об этом в главе 12). Ключевой момент для нас — то, что энтропия черной дыры чрезвычайно велика. Именно черные дыры способны пролить свет на связь между гравитацией и энтропией — двумя важнейшими ингредиентами окончательного объяснения стрелы времени.

Примечания

¹ Специальная теория относительности появилась вследствие несовместимости ньютоновской механики с максвелловской электродинамикой, а общая теория относительности, в свою очередь, родилась благодаря несочетаемости специальной теории относитель-

ности с ньютоновской силой тяготения. Сегодня физика решает очередной вопрос критической несовместимости, и на этот раз в главных ролях общая теория относительности и квантовая механика. Мы искренне надеемся, что однажды у нас получится объединить их в общей теории квантовой гравитации. По состоянию на текущий момент самый обнадуживающий кандидат — теория струн, однако до конца еще ничего не ясно.

- ² Кажется нелогичным, что натяжение, заставляющее вещи стягиваться все ближе друг к другу, также ответственно за ускорение Вселенной, вследствие которого они разлетаются. Все очень просто: натяжение темной энергии одинаково во всех точках пространства, так что прямой эффект стягивания отсутствует. Мы имеем дело всего лишь с косвенным влиянием темной энергии на искривление пространства—времени, заключающимся в постоянном подталкивании Вселенной (мы знаем, что плотность темной энергии не уменьшается).
- ³ Можно думать об этом так: тот факт, что в ньютоновской механике энергия остается постоянной, отражает базовую симметрию этой теории — инвариантность относительно сдвига во времени. Фоновое пространство—время, в котором движутся частицы, зафиксировано раз и навсегда. Однако в общей теории относительности это уже не так: пространство становится динамическим и принимается подталкивать вещи то туда, то сюда, меняя их энергию.
- ⁴ См. *Michell, J. Philosophical Transactions of the Royal Society (London), 74 (1784), p. 35–57*; эссе Лапласа переиздано в форме приложения к книге *Hawking, S. W., Ellis, G. F. R. The Large-Scale Structure of Spacetime — Cambridge: Cambridge University Press, 1974*. Многие ученые любят напоминать (под многозначительный шепот и выразительное поднимание бровей) о том, что радиус «черной звезды», вычисленный в ньютоновской гравитации, в точности совпадает с гравитационным радиусом черной дыры (радиусом Шварцшильда) в общей теории относительности ($2GM/c^2$, где G — ньютоновская гравитационная постоянная, M — масса объекта, а c — скорость света). Это совпадение абсолютно случайно и образовалось в основном потому, что существует не так много способов сконструировать величину размерности длины, используя только G , M и c .
- ⁵ В целях этой главы мы будем считать истинной классическую общую теорию относительности. В то же время мы прекрасно понимаем, что для объяснения сингулярностей ее необходимо заменить новой, более общей теорией. Подробнее об этом говорится в книгах *Hawking, S. W. A Brief History of Time: From the Big Bang to Black Holes. — New York: Bantam, 1988*; *Thorne, K. S. Black Holes and Time Warps: Einstein's Outrageous Legacy. — New York: W. W. Norton, 1994*.
- ⁶ Совсем недавно, уже после публикации этой книги на английском языке, некоторые ученые неожиданно изменили свое мнение — см., например, работу *Almheiri A., Marolf D., Polchinski J., Sully J. Black Holes: Complementarity or Firewalls?, JHEP 1302 (2013) 062*. Информационный парадокс, связанный с физикой черных дыр, заставил их предположить, что старые (существующие уже некоторое время) черные дыры покрыты огненными стенами — пучками высокоэнергичных частиц, движущихся вдоль горизонта. Если это предположение верно, то наблюдатель, падающий в черную дыру, сгорит в момент пересечения горизонта. — *Примеч. науч. ред.*
- ⁷ Какую мораль из этого извлечь — решать вам.

Глава 6

Петля во времени

О да, мой сын,
в пространстве время здесь!

Рихард Вагнер. Парсифаль

Все знают, как выглядит машина времени: это такие стимпанковские сани с красным бархатным креслом, переливающимися огоньками и гигантским вращающимся штурвалом позади. Для представителей юного поколения сносной заменой будет навороченный спортивный автомобиль, увешанный хитрыми приспособлениями, а наши британские читатели наверняка отдадут предпочтение лондонской полицейской будке в стиле 50-х годов.¹ Функциональные подробности могут различаться от модели к модели, но одно известно точно: отправляясь в путешествие во времени, машина обязана дематериализоваться в облаке спецэффектов, для того чтобы возникнуть где-то за многие тысячелетия в прошлом или будущем.

Однако на самом деле все происходит совсем не так. Не потому, что путешествия во времени невозможны, а сама идея выглядит нелепицей; реальные или нереальные путешествия во времени — вопрос куда более сложный и неопределенный, чем вы можете себе вообразить. Я много раз подчеркивал сходство времени с пространством. Продолжим эту мысль: если вам повезет наткнуться на рабочую машину времени в лаборатории какого-нибудь сумасшедшего изобретателя, то вы увидите обычную «машину пространства» — банальное транспортное средство того или иного рода, предназначенное для перемещения из одного места в другое. Если уж вам хочется визуализировать путешествие в машине времени, представляйте себе ее старт как запуск космического корабля, а не как исчезновение в клубах дыма.

Так что же в действительности подразумевает путешествие во времени? Для нас интерес могут представлять два случая: путешествие в будущее и путешествие в прошлое. В будущее попасть легко: как сидели в кресле, так и продолжайте сидеть. Каждый час вы будете перемещаться ровно на час в будущее. Вы возразите: «Но ведь это скучно! Я хочу попасть далеко в будущее и как можно быстрее, а не переползать за каждый час всего лишь на один час вперед. Я хочу увидеть двадцать четвертый век еще до обеда!» Однако нам известно, что невозможно двигаться со скоростью, превышающей один час в час относительно часов, которые путешествуют вместе с вами. Вы можете попытаться

перехитрить себя, погрузившись в сон или в искусственную кому, но время идти не перестанет.

С другой стороны, вы можете изменить промежуток времени, затрачиваемый на прохождение вдоль вашей мировой линии по сравнению с мировыми линиями других людей. В ньютоновской Вселенной это невозможно, так как время универсально и вдоль всех мировых линий, соединяющих одни и те же два события, проходит один и тот же период времени. Однако специальная теория относительности позволяет нам управлять промежутками времени путем перемещения в пространстве. Движению без ускорения соответствует самый длинный временной интервал между двумя событиями; поэтому если вы желаете быстро (с вашей точки зрения) попасть в будущее, вам нужно всего лишь двигаться сквозь пространство—время по сильно искривленному пути. Вы можете улететь в межзвездное пространство на скорости, близкой к скорости света, а затем вернуться или, если запас топлива на вашей ракете достаточно велик, просто летать кругами на сверхвысокой скорости, никогда особенно не удаляясь от стартовой точки в пространстве. Когда вы приземлитесь и выйдете из космического корабля, помимо головокружения у вас будет понимание, что вы «переместились в будущее», или, точнее, что вдоль вашей мировой линии прошло меньше времени, чем вдоль мировых линий всех тех людей, с которыми вы попрощались при старте. Путешествовать в будущее просто, а как быстро вы будете перемещаться — вопрос исключительно ваших технологических возможностей. Это абсолютно не противоречит фундаментальным законам физики.

Однако в какой-то момент вам захочется вернуться обратно, и тут вы столкнетесь с настоящими трудностями. Главные проблемы путешествия во времени связаны как раз с путешествием в *прошлое*.

Жульничество с пространством—временем

Несмотря на уроки, которые мы извлекли из фильмов о Супермене, путешествие назад во времени не означает изменения направления вращения Земли на обратное. В этом должно участвовать само пространство—время. Если только, разумеется, вы не решите сжульничать, начав двигаться со скоростью выше скорости света.

В ньютоновской Вселенной вопрос путешествия назад во времени вообще не ставится. Мировые линии пронзают пространство—время, которое однозначно разделяется на трехмерные моменты равного времени, и правило о том, что мировые линии не могут менять направление и возвращаться назад, наруσιμο. В специальной теории относительности дела обстоят не намного

лучше. Определение «моментов равного времени» во Вселенной достаточно произвольно, однако в каждом событии мы сталкиваемся с ограничениями, накладываемыми световыми конусами. Будучи существами, сделанными из обычной материи, мы вынуждены двигаться из любого события вперед, внутрь светового конуса. Поэтому у нас нет никакого шанса вернуться во времени назад; на диаграмме пространства—времени мы неустанно шагаем вверх.

Если бы мы были сделаны из чего-то необычного, например *таххионов* — частиц, скорость движения которых всегда превышает скорость света, ситуация была бы немного интереснее. К сожалению, мы состоим не из тахионов, и есть веские основания полагать, что тахионы вообще не существуют. В отличие от обычных частиц, тахионы всегда вынуждены двигаться за пределами светового конуса. В специальной теории относительности объект, движущийся вне светового конуса, с точки зрения некоторых наблюдателей перемещается во времени назад. Кроме того, световые конусы — единственные структуры, определенные в пространстве—времени теории относительности; такого понятия, как «пространство в какой-то момент времени», попросту нет. Таким образом, если вы с какой-то частицей оказываетесь в одном и том же событии и она вылетает за пределы вашего светового конуса (быстрее света), это означает, что относительно вас она может перемещаться в прошлое. Остановить ее невозможно.

Получается, что тахион способен совершить нечто пугающее и непредсказуемое: «стартовать» из некоего события на мировой линии обычного, движущегося медленнее скорости света объекта (мы помним, что событие определяется некоторым положением в пространстве и некоторым моментом времени) и проследовать по пути, который приведет его в *предыдущую* точку на той же самой мировой линии. Вооружившись фонариком, испускающим тахионы, вы (по идее) могли бы сконструировать хитрую систему зеркал и отправлять световые сигналы азбукой Морзе в прошлое самому себе. Вы могли бы предостеречь себя в прошлом, что вот в то посещение ресторана креветки заказывать не стоит, или что не нужно идти на свидание со странноватой коллегой, или что неразумно вкладывать все свои сбережения в акции Pets.com.

Очевидно, что путешествия назад во времени порождают возможность возникновения парадоксов, а это способно любого человека выбить из колеи. Однако вернуть все на свои места совсем несложно: объявите, что тахионы, скорее всего, не существуют, а также несовместимы с законами физики.² Это одновременно и продуктивно, и недалеко от истины, по крайней мере до тех пор, пока вы не выходите за рамки специальной теории относительности. Когда в игру вступит искривленное пространство—время, все станет куда запутаннее и увлекательнее.

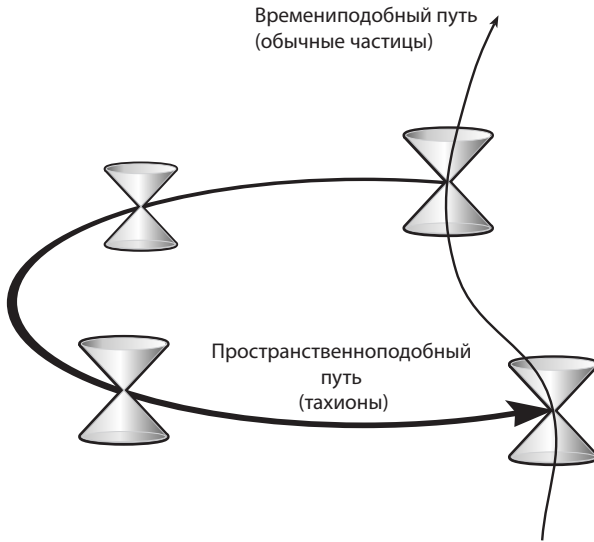


Рис. 6.1. Если бы тахионы существовали, они могли бы испускаться обычными объектами и улетать, для того чтобы быть поглощенными в прошлом. В каждом событии на своей траектории тахион двигается за пределом светового конуса

Круги во времени

Траектории в пространстве—времени тех из нас, кто сделан не из тахионов, ограничены скоростью света. Начиная с события, определяющего наше текущее местоположение — каким бы оно ни было, мы можем двигаться только «вперед во времени», навстречу какому-то другому событию внутри нашего светового конуса. Говоря научным языком, мы движемся сквозь пространство—время по времениподобной траектории. Это локальное требование, распространяющееся не на всю Вселенную, а лишь на некоторую окрестность вокруг нас. Но в общей теории относительности пространство—время искривлено. Это означает, что световые конусы в нашей окрестности не обязательно смотрят «в ту же сторону», что и световые конусы где-то вдалеке, — они могут быть наклонены по отношению друг к другу. Вспомните обсуждение из предыдущей главы, где световые конусы наклонялись в сторону черной дыры, — здесь мы говорим о точно таком же явлении.

Теперь представьте себе, что, вместо того чтобы наклоняться в сторону сингулярности и создавать черную дыру в нашем пространстве—времени,

световые конусы формируют окружность, как показано на рис. 6.2. Очевидно, что это потребовало бы наличия чрезвычайно сильного гравитационного поля, но мы можем позволить себе принять такое допущение. Если бы пространство—время было искривлено таким способом, то это бы порождало потрясающее следствие: мы могли бы следовать по времениподобному пути всегда вперед, в световой конус будущего, но в конечном счете встречаться с самими собой в каком-то момент в прошлом. Иными словами, наша мировая линия описывала бы в пространстве замкнутую окружность, пересекающую саму себя, благодаря чему мы в какой-то момент своей жизни сталкивались бы с собой образца какого-то другого момента.

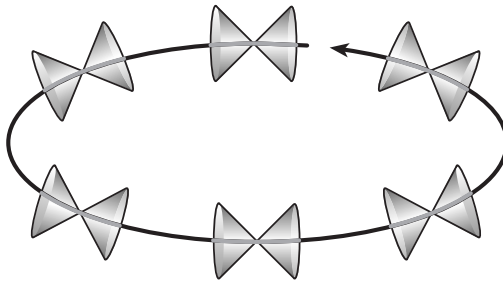


Рис. 6.2. В искривленном пространстве—времени световые конусы могли бы выстраиваться в окружность, формируя закрытые времениподобные пути

Такая мировая линия — всегда движущаяся вперед с локальной точки зрения, но умудряющаяся пересечься с самой собой в прошлом — называется *замкнутой времениподобной кривой*, или ЗВК. Именно ее мы имеем в виду, когда говорим о «машине времени» в рамках общей теории относительности. Для перемещения вдоль замкнутой времениподобной кривой вам потребуется обычное средство передвижения через пространство, скажем космический корабль. Возможно, сойдет и что-нибудь более приземленное: например, продолжать сидеть «без движения» в собственном кресле. Искривление пространства—времени само приведет вас в момент прошлого. Это центральное свойство общей теории относительности, которое сыграет важную роль позже, когда мы вернемся к обсуждению зарождения Вселенной и проблемы энтропии: пространство—время не высечено в мраморе, оно может меняться (даже появляться или исчезать), реагируя на воздействие материи и энергии.

В общей теории относительности легко найти пространство—время, и даже не одно, в котором встречаются замкнутые времениподобные кривые. Еще в 1949 году математик и логик Курт Гёдель нашел решение уравнения Эйнштейна

на, описывающее «вращающуюся» Вселенную. Его решение содержало замкнутые времениподобные кривые, проходящие через каждое событие. Гёдель подружился с бывшим уже в возрасте Эйнштейном во время работы в Институте перспективных исследований в Принстоне, и идея решения возникла из бесед между двумя учеными.³ В 1963 году новозеландский математик Рой Керр нашел точное решение, описывающее вращающуюся черную дыру; поразительно, что в этом случае сингулярность принимает форму быстро вращающегося кольца, в окрестности которого находятся замкнутые времениподобные кривые.⁴ А в 1974 году Франк Типлер доказал, что бесконечно длинный, состоящий из вещества вращающийся цилиндр, при условии, что он обладает достаточной плотностью и вращается достаточно быстро, будет создавать вокруг себя замкнутые времениподобные кривые.⁵

Однако для того чтобы сконструировать пространство—время с замкнутыми времениподобными кривыми, совсем не обязательно прилагать такие усилия. Возьмите самое заурядное плоское пространство—время, знакомое вам еще по специальной теории относительности. А теперь представьте, что времениподобное направление (определяемое каким-то конкретным движущимся без ускорения наблюдателем) представляет собой *окружность*, а не простирается вперед в бесконечность. В такой Вселенной объект, движущийся вперед во времени, будет снова и снова возвращаться к одному и тому же моменту в истории Вселенной. В фильме Гарольда Рамиса «День сурка» герой Билла Мюррея каждое утро просыпается в одной и той же обстановке и в течение дня оказывается ровно в тех же ситуациях, которые уже пережил днем раньше. Вселенная с циклическим временем, о которой мы говорим здесь, приблизительно так и выглядит. Однако имеются два важных исключения: во-первых, все дни были бы совершенно одинаковыми, включая действия и поступки главного героя, а во-вторых, вырваться из этого круга было бы невозможно. В частности, даже завоевание Энди Макдауэлл вас бы не спасло.

Вселенная с циклическим временем — не только игровая площадка для создателей фильмов; она также представляет собой точное решение уравнения Эйнштейна. Как вы помните, выбрав движущуюся без ускорения систему координат, мы можем «нарезать» четырехмерное плоское пространство—время на трехмерные моменты одинакового времени. Возьмем два таких среза: скажем, полночь 2 февраля и полночь 3 февраля — два момента во времени, распространенные на всю Вселенную (в данном конкретном случае плоского пространства—времени в данной конкретной системе координат). Теперь возьмем этот отрезок пространства—времени длиной в один день между двумя срезами, а все остальное отбросим. Наконец, отождествим время начала и время

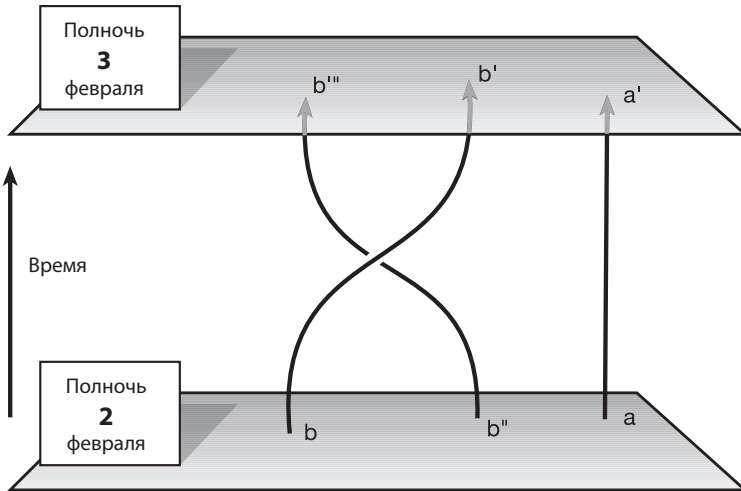


Рис. 6.3. Вселенная с циклическим временем, сконструированная путем отождествления двух моментов в плоском пространстве—времени. Показаны две замкнутые времениподобные кривые: первая замыкается за один проход (из a в a'), а вторая описывает две петли (из b в b' , затем из b'' в b''')

конца, то есть формулируем правило, согласно которому как только мировая линия доходит до какой-то точки в пространстве 3 февраля, она моментально заново появляется из соответствующей точки пространства в прошлом, 2 февраля. По сути, это то же самое, что скатать в трубочку лист бумаги и склеить края. В любом событии, даже в полночь 2 и 3 февраля, все выглядит совершенно гладко. Пространство—время плоское: время представляет собой окружность, а все точки на окружности абсолютно равноправны и ничем не отличаются друг от друга. Это пространство—время изобилует замкнутыми времениподобными кривыми, как показано на рис. 6.3. Возможно, у нас получилась не самая реалистичная Вселенная, однако мы убедились в том, что сами по себе правила общей теории относительности не противоречат существованию замкнутых времениподобных кривых.

Врата во вчера

Есть две основные причины, почему большинство людей, хотя бы немного времени посвятивших обдумыванию возможности путешествий во времени, поместили их на полку «Научная фантастика», а не «Серьезные исследования».

Во-первых, трудно представить, как на практике создать замкнутую времени-подобную кривую, несмотря на то что, как мы увидим далее, определенные идеи все же были высказаны. Во-вторых, и это куда более основательная причина, в действительности практически невозможно придумать разумное толкование такого явления, как «путешествие во времени». Стоит нам согласиться с возможностью путешествий в прошлое, и мы сможем легко привести массу примеров абсурдных и парадоксальных ситуаций.

Для того чтобы прояснить это утверждение, рассмотрим следующий простой пример машины времени: врата во вчерашний день (с тем же успехом мы могли бы взять «врата в завтра» — просто перемещаться нужно было бы в противоположную сторону). Представьте себе, что в поле стоят волшебные ворота. Это совершенно обычные, ничем не примечательные ворота, за одним важным исключением: когда вы проходите в них «спереди», то оказываетесь на том же самом поле с другой стороны ворот, но *на день раньше* — по крайней мере с точки зрения «фонового времени», измеряемого внешними наблюдателями, которые никогда не проходят сквозь ворота. (Предположим, что в поле установлены фиксированные часы, которые никто не пронесит сквозь ворота, и эти часы синхронизированы с покоящейся системой координат самого поля.) И наоборот, когда вы проходите сквозь ворота «сзади», вы оказываетесь перед ними, но на день позже того момента, когда вы собрались перешагнуть порог.

Это все звучит удивительно и волшебно, но в действительности мы всего лишь описали частный тип необычного пространства—времени, идентифицировав набор точек в пространстве в разные моменты времени. Никто не исчезает в клубах дыма; с точки зрения любого конкретного наблюдателя его мировая линия непрерывно продвигается в будущее, секунда за секундой. Заглядывая в ворота спереди, вы не натываетесь взором на чернильно-черную пустоту или всполохи психоделических цветов; вы видите поле, простирающееся с другой стороны ворот, — точно так же, как если бы посмотрели на него сквозь любую другую дверь. Единственное отличие заключается в том, что вы видите, как это поле выглядело *вчера*. Если вы наклоните голову и посмотрите на поле сбоку от ворот, то увидите, как оно выглядит сегодня, тогда как взгляд сквозь ворота спереди дает вам представление о вчерашнем состоянии поля. Аналогично, если обойти ворота и посмотреть сквозь них сзади, то вы увидите другую часть поля — в том состоянии, в котором она будет находиться завтра. Ничто не мешает вам пройти сквозь ворота и сразу же вернуться назад и проделывать это столько раз, сколько вам заблагорассудится. Более того, вы можете даже поставить ноги по обе стороны ворот и стоять

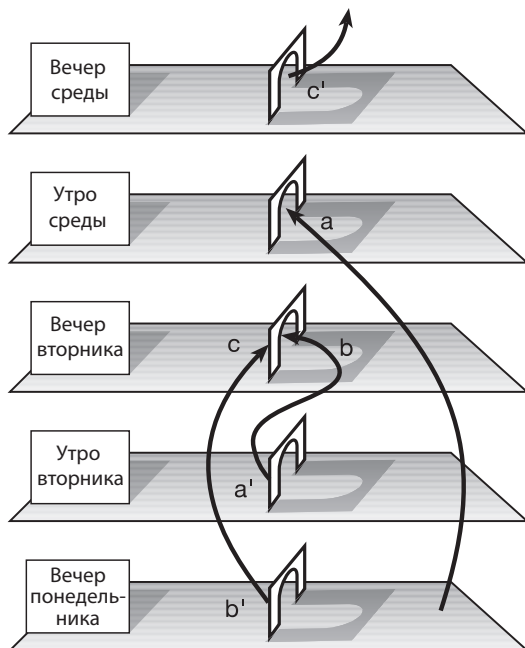


Рис. 6.4. Врата во вчера и одна из возможных мировых линий. Путешественник проходит через ворота спереди (а) (на рисунке это справа) и оказывается позади ворот на один день раньше (а'). Он проводит половину дня, гуляя по полю, а затем снова проходит через ворота опять спереди (b) и переносится на один день назад (b'). После этого он выжидает целый день и проходит через ворота сзади (с), появившись в итоге перед воротами через один день в будущем

так сколь угодно долго. Вы не будете чувствовать никакого странного покалывания, и у вас не возникнет никаких других необычных ощущений. Все будет казаться совершенно нормальным, за исключением точных часов, закрепленных по обоим сторонам ворот: разница показаний на этих часах будет составлять ровно одни сутки.

Пространство—время с вратами во вчера совершенно определенно содержит замкнутые времениподобные кривые. Все, что вам нужно сделать, — это пройти через ворота спереди, для того чтобы вернуться на один день назад, затем обойти ворота, снова оказавшись перед ними, и терпеливо подождать. Ровно через день вы обнаружите себя в том же месте и моменте пространства—времени, в котором вы находились сутки назад (по вашим персональным часам), и, разумеется, вы встретитесь там с копией себя образца прошлых суток. При

желании вы сможете обменяться любезностями с собой из прошлого и обсудить подробности прошедшего дня. В этом и заключается суть замкнутой времениподобной кривой.

И здесь в игру вступают парадоксы. По какой-то причине физикам нравится делать свои мысленные эксперименты как можно более жестокими и беспощадными; вспомните, к примеру, Шрёдингера и его несчастного кота.⁶ Когда дело доходит до путешествий во времени, стандартный сценарий включает перемещение в прошлое и убийство своего дедушки до того, как тот успеет встретиться с бабушкой, чтобы, таким образом, предотвратить собственное рождение. Парадокс, порожаемый этим деянием, очевиден: если ваши дедушка с бабушкой так и не встретились, то как вы могли появиться на свет, а потом отправиться в прошлое и убить одного из своих предков?⁷

Однако не обязательно воображаемые события должны быть настолько драматичными. Вот более простой и мирный пример парадокса. Вы подходите к воротам во вчера и замечаете, что вас там ждет ваша копия, выглядящая примерно на день старше, чем вы сейчас. Поскольку вам известно о существовании замкнутых времениподобных кривых, вы не слишком удивляетесь такому повороту событий: очевидно, что ваша копия просто бродила вокруг ворот в ожидании встречи с вами, для того чтобы пожать руку своей версии из прошлого. Итак, вы двое мило беседуете некоторое время, а затем вы покидаете компанию своей копии и проходите через ворота спереди, попадая в результате во вчерашний день. Но после этого — исключительно из упрямства — вы решаете, что более не желаете придерживаться традиции. Вместо того чтобы болтаться на этом поле, готовясь к встрече со своей более молодой копией, вы уходите отсюда, ловите такси в аэропорт и садитесь на рейс до Багамских островов. Вы даже не встречаетесь с той копией себя, которая первой прошла через ворота. Однако та копия встречалась со своей копией из будущего — ведь вы храните воспоминания об этой встрече. Что же происходит?

Одно простое правило

Существует простое правило, разрешающее все возможные парадоксы путешествий во времени.⁸ Оно гласит: парадоксов не бывает.

Вот так. Проще простого.

Пока что ученые не обладают достаточными знаниями для того, чтобы говорить, допускают ли физические законы существование макроскопических замкнутых времениподобных кривых. Если нет, то и необходимости беспоко-

иться о парадоксах тоже нет. Но гораздо интереснее такой вопрос: *всегда* ли замкнутые времениподобные кривые приводят к возникновению парадоксов? Если это так, то их существование невозможно и вопрос закрыт.

Однако вполне возможно, что парадоксы не являются непременными спутниками замкнутых времениподобных кривых. Мы все согласны, что события, противоречащие логике, происходить не могут. В частности, в классической физике, с которой мы работаем в данный момент (в противоположность квантовой механике⁹), существует один-единственный верный ответ на вопрос «Что произошло в окрестности данного события в пространстве—времени?». В каждой области пространства—времени что-то происходит: вы проходите сквозь ворота, вы находитесь в одиночестве, вы встречаете кого-то еще, вы почему-то не приходите на встречу, — что угодно. И это что-то является именно тем, чем является, и было именно тем, чем было, и будет именно тем, чем будет, сейчас и всегда. Если в каком-то событии пространства—времени ваш дедушка заигрывал с вашей бабушкой, то именно это и происходило в том событии. Вы никак не сможете это изменить, потому что это уже случилось. Одинаково невозможно повлиять на события в прошлом как пространства—времени, содержащего замкнутые времениподобные кривые, так и пространства—времени, где таких кривых нет.¹⁰

Очевидно, что непротиворечивые истории *возможны*, причем даже в пространствах—временах с замкнутыми времениподобными кривыми. На рис. 6.4 изображена мировая линия одного бесстрашного путешественника, который дважды перепрыгивает назад во времени, а затем ему становится скучно, и он делает один прыжок в будущее, прежде чем уйти от волшебных ворот. Его перемещения не таят никаких парадоксов. Точно так же мы могли бы взять сценарий из предыдущего раздела и немного переделать его, чтобы исключить парадоксы. Вы подходите к воротам, видите свою копию, которая старше вас на один день; вы обмениваетесь любезностями, а затем проходите через ворота спереди и оказываетесь во вчерашнем дне. Однако вместо того чтобы продемонстрировать упрямство и уходить прочь, вы выжидаете один день и встречаетесь со своей более молодой копией, с которой обмениваетесь любезностями, прежде чем пойти по своим делам. Какой бы участник событий ни описал происходящее, его версия будет превосходно согласована.

Мы могли бы придумать массу куда более драматичных историй, которые тем не менее будут безупречно согласованы. Вообразите, что нас назначили Стражами Врат, и наша работа — неусыпно наблюдать за проходящими сквозь ворота. Однажды, стоя по сторонам от ворот, мы замечаем незнакомца, вышедшего из ворот с тыльной стороны. Ничего странного; это всего лишь

означает, что незнакомец завтра войдет (или уже вошел? — в нашем языке нет подходящих конструкций для описания путешествий во времени) в ворота спереди. Продолжая бдительно охранять ворота, мы видим, что этот незнакомец бродит по округе в течение дня, а затем, спустя ровно двадцать четыре часа, спокойно проходит через ворота спереди. Никто больше ниоткуда не появлялся, а знакомцы, один из которых вошел в ворота, а другой вышел из них, формируют замкнутый цикл — эти двадцать четыре часа и есть полное время жизни незнакомца. История может показаться жутковатой и невероятной, однако в ней отсутствуют парадоксы и нет никаких логических противоречий.¹¹

Вопрос же, который интересует нас больше всего, — что произойдет, если мы попытаемся мутить воду? Если решим, что не хотим следовать предписанному плану? В истории, где вы встречаетесь со своей копией старше вас на один день, а затем пересекаете порог врат и оказываетесь в прошлом, есть потенциальная развилка. Кажется, что после того, как вы прошли сквозь врата, у вас есть *выбор*: вы можете послушно выполнить свое предназначение или же взбунтоваться и уйти прочь. Итак, если вы все же решите пойти наперекор, что вас остановит? Вот здесь вся эта история с парадоксами и становится по-настоящему серьезной.

Мы знаем ответ: парадоксы невозможны. Если вы встретились со своей старшей копией, то мы можем утверждать с абсолютной метафизической уверенностью, что как только вы достигнете этого возраста, вы обязаны будете встретиться со своим более молодым дублем. Представьте себе, что мы убрали из условий задачи непослушные человеческие создания и рассматриваем простые неодушевленные объекты, например последовательность бильярдных шаров, прокатывающихся сквозь ворота. Существует масса наборов согласованных явлений, которые могли бы происходить в различных событиях пространства—времени, но только один из наборов произойдет в действительности.¹² Согласованные истории случаются, несогласованные — нет.

Энтропия и машины времени

Если заглянуть в самую суть вещей, то станет очевидно, что в действительности нас волнуют вовсе не законы физики: главная проблема — свобода воли. Мы живем с уверенностью, что над нами не может довлеть никакое предопределение, согласно которому мы так или иначе сделаем то, чего делать не хотим. Трудно сохранять такое ощущение, увидев, что мы уже делаем это.

Иногда наша свободная воля порабощается законами физики. Если выбросить человека из окна на верхнем этаже небоскреба, то он со свистом пронесется вниз и ударится о землю, как бы сильно ему ни хотелось улететь и безопасно приземлиться где-нибудь подальше. С таким вариантом предопределения мы смирились в состоянии. Однако принять намного более детализированное предопределение, навязываемое замкнутыми времениподобными кривыми, куда труднее. Создается впечатление, что существование непротиворечивой истории в пространстве—времени исключает возможности проявления свободной воли, которые были бы доступны в противном случае. Конечно, если бы мы были убежденными детерминистами, то верили бы, что атомы наших тел вступают в сговор с внешним миром и, подчиняясь непреложным законам ньютоновской механики, заставляют нас действовать во избежание парадоксов в точности по предписанному сценарию. Однако это все же не согласуется с тем, как мы привыкли мыслить о себе и своем месте в этом мире.¹³

Суть проблемы заключается в том, что при условии наличия замкнутых времениподобных кривых существование согласованной и непротиворечивой стрелы времени становится невозможным. Общая теория относительности меняет формулировку утверждения: «Мы помним прошлое, но не будущее»; теперь оно звучит так: «Мы помним события из светового конуса прошлого, но не из светового конуса будущего». Однако на замкнутой времениподобной кривой есть события, принадлежащие как световому конусу прошлого, так и световому конусу будущего — ведь эти два конуса перекрываются. Так что же, должны мы помнить такие события или нет? Мы могли бы согласовать события на замкнутой времениподобной кривой с законами физики на микроскопическом уровне, однако они не могут быть совместны с непрерывным увеличением энтропии вдоль кривой.

Для того чтобы в полной мере осознать значимость этого утверждения, подумайте о гипотетическом незнакомце, который выходит из ворот, а затем, сутки спустя, снова в них входит, но уже с другой стороны. Таким образом, история всей его жизни — это однодневный цикл, повторяющийся снова и снова, до бесконечности. Задумайтесь, какой непревзойденный уровень точности необходим, чтобы воспроизводить этот цикл день за днем (если считать, что цикл начинается в некоторой «стартовой» точке). Каждый день в одно и то же время незнакомец должен убеждаться, что каждый атом его тела занял именно то положение, в котором будет возможно его плавное слияние с самим собой из прошлого. Он должен проверять, например, что на

его одежде не осело ни единой новой пылинки, которой не было сутки назад, что содержимое его пищеварительной системы в точности такое же, как день назад, и что его волосы и ногти абсолютно такой же длины. Мягко говоря, это несовместимо с нашим представлением о том, как происходит увеличение энтропии, даже это не есть прямое нарушение второго начала термодинамики (так как незнакомец не является закрытой системой). Если бы он просто пожал руку своей копии из прошлого, вместо того чтобы становиться ею, это бы не потребовало такого невообразимого уровня точности; однако в любом случае необходимость находиться в правильном месте в правильное время накладывает чрезвычайно строгие ограничения на возможные действия в будущем.

Наша концепция свободной воли тесно связана с идеей о том, что прошлое увековечено на скрижалях истории, тогда как будущее мы творим сами по своему разумению. Даже если верить, что законы физики точно фиксируют изменение какого-то конкретного состояния Вселенной, мы все равно не знаем, что это за состояние, так что в реальном мире увеличение энтропии приводит к бесконечному числу вариантов будущего. Тот тип предопределения, к которому приводит непротиворечивая эволюция в присутствии замкнутых времениподобных кривых, абсолютно аналогичен предопределению во Вселенной, где задано граничное условие в будущем, приводящее там к низкой энтропии — только в локальном масштабе.

Другими словами, если бы замкнутые времениподобные кривые существовали, то непротиворечивая эволюция в их присутствии казалась бы нам такой же странной и неестественной, как кино, прокручиваемое в обратном направлении, или любой другой пример развития событий по сценарию уменьшения энтропии. Это не невозможно — просто крайне маловероятно. Таким образом, либо замкнутые времениподобные кривые не существуют, либо большие макроскопические объекты не могут перемещаться сквозь пространство — время по действительно замкнутым путям — ну, или все, что, как нам кажется, мы знаем о термодинамике, неверно.

Предсказания и причуды

Жизнь на замкнутой времениподобной кривой кажется ужасающе предопределенной: если система движется по замкнутому контуру вдоль этой кривой, то она обязана каждый раз возвращаться точно в то состояние, с которого движение началось. При этом с точки зрения внешнего наблюдателя замкнутые

времениподобные кривые также поднимают проблему, казалось бы, совершенно противоположной природы: исходное состояние Вселенной не позволяет однозначно предсказать, что будет происходить на этих кривых. Получается, что у нас есть очень строгое ограничение, в соответствии с которым движение вдоль замкнутых времениподобных кривых должно происходить самосогласованно, но в то же время число таких самосогласованных и непротиворечивых движений чрезвычайно велико, и никакие законы физики не в состоянии дать точный ответ, какое из них выберет система.¹⁴

Мы обсуждали различия между взглядом на Вселенную презентистов, которые считают реальным лишь текущий момент, и этерналистов — приверженцев концепции блочной Вселенной, в соответствии с которой все события на протяжении всей истории Вселенной одинаково реальны. Это интересный философский спор — какой взгляд представляет более плодотворную версию реальности; для физика они, однако, практически идентичны. Принято считать, что законы физики работают как компьютер: вы даете им на вход текущее состояние, а они сообщают, каким это состояние станет мгновение спустя (или было мгновением раньше, если интересно). Повторяя этот процесс много-много раз, мы можем получить предсказание для всей истории Вселенной от начала и до конца. В этом смысле всестороннее знание текущего состояния подразумевает полное знание всей истории Вселенной.

Замкнутые времениподобные кривые делают подобные «программы» невозможными; чтобы убедиться в этом, достаточно простого мысленного эксперимента. Еще раз обратим наше внимание на незнакомца, вышедшего из врат во вчера, который сутки спустя снова вошел в них с другой стороны, сформировав замкнутый цикл. Нет никакого способа предсказать существование такого незнакомца, отталкиваясь от какого-то более раннего состояния Вселенной. Предположим, что мы начинаем свой эксперимент во Вселенной, в которой в этот конкретный момент не существует замкнутых времениподобных кривых. Предполагается, что законы физики позволяют предсказать, что произойдет в будущем этого момента. Однако если кто-то создаст замкнутую времениподобную кривую, мы лишимся такой возможности. Как только во Вселенной появляется возможность существования замкнутых времениподобных кривых, загадочные незнакомцы и прочие случайные объекты начинают появляться тут и там и перемещаться вдоль этих кривых... или нет. Невозможно предсказать, что произойдет дальше, исходя лишь из полного знания состояния Вселенной в один из предыдущих моментов времени.

Другими словами, мы сколько угодно можем говорить о том, что происходящее в присутствии замкнутых времениподобных кривых *непротиворечиво*,

а парадоксы отсутствуют. Однако это не делает происходящее также и *предсказуемым*, то есть не дает нам возможности предсказать будущее с помощью законов физики, начиная с состояния Вселенной в какой-то конкретный момент времени. Более того, замкнутые времениподобные кривые делают несостоятельным само определение «Вселенной в какой-то конкретный момент времени». В предыдущем нашем обсуждении пространства—времени критически важным моментом была возможность «нарезки» четырехмерной Вселенной на трехмерные «моменты времени», которые мы помечали соответствующими значениями временной координаты. Однако в присутствии замкнутых времениподобных кривых мы, по сути, не в состоянии этого сделать.¹⁵ Локально — в ближайшей окрестности любого интересующего нас события — деление пространства—времени на «прошлое» и «будущее» с помощью световых конусов абсолютно такое же. Глобально мы не сможем последовательно разделить Вселенную на моменты времени.

Следовательно, в присутствии замкнутых времениподобных кривых нам придется позабыть о понятии «детерминизма» — идее о том, что состояние Вселенной в любой конкретный момент времени определяет ее состояния во все остальные моменты. Так ли высоко мы ценим детерминизм, чтобы эта проблема заставила нас полностью отвергнуть возможность существования замкнутых времениподобных кривых? Совсем не обязательно. Можно просто по-другому представлять себе работу законов физики — не как компьютера, вычисляющего состояние в следующий момент на основании текущего состояния. Например, мы можем считать физические законы неким набором условий, которые наложены на историю Вселенной в целом. Пока что неясно, что это могут быть за условия, но нельзя отбрасывать эту идею исключительно на основании умозрительных заключений.

Все эти метания из стороны в сторону могут казаться неуместными, однако они иллюстрируют важный урок. Частично наше понимание времени базируется на логике и известных законах физики, однако отчасти мы также руководствуемся бытовым удобством и кажущимися правдоподобными предположениями. Мы *думаем*, что возможность единственным образом предсказывать будущее на основании знаний о текущем состоянии важна, но у реального мира могут быть совсем иные мысли на этот счет. Если бы замкнутые времениподобные кривые могли существовать, то вечному спору между этерналистами и презентистами пришел бы конец: победа была бы обеспечена блочной Вселенной этерналистов. Очевидно, что возникающие то тут, то там замкнутые времениподобные кривые не позволили бы поделить Вселенную на последовательность «состояний настоящего».

Окончательный ответ на загадку замкнутых времениподобных кривых заключается в том, что они, вероятно, попросту не существуют (и не могут существовать). И если это действительно так, то причина в том, что законы физики не позволяют пространству—времени искривляться в достаточной мере, для того чтобы формировать подобные кривые, а не в том, что подобные кривые открыли бы путь к убийству наших предков. Так что менять нужно физические законы.

Флатландия

Замкнутые времениподобные кривые предлагают нам интересную лабораторию для мысленных экспериментов по исследованию природы времени. Тем не менее для того, чтобы всерьез воспринимать их, нам необходимо понять, возможно ли существование этих кривых в реальном мире, по крайней мере согласно правилам общей теории относительности.

Ранее были перечислены несколько решений уравнения Эйнштейна, включающих замкнутые времениподобные кривые: Вселенная с циклическим временем, Вселенная Гёделя, внутренняя область рядом с сингулярностью вращающейся черной дыры и вращающийся бесконечный цилиндр. Однако ни одно из них не помогает найти способ «построить» настоящую машину времени — создать замкнутую времениподобную кривую там, где ее не было. Во Вселенной с циклическим временем, Вселенной Гёделя и Вселенной с вращающимся цилиндром подразумевается, что замкнутые времениподобные кривые существуют с самого начала.¹⁶ Настоящий вопрос звучит так: «Можем ли мы своими силами создавать замкнутые времениподобные кривые в локальной области пространства—времени?»

Обратившись вновь к рис. 6.2, легко понять, почему все эти решения включают вращение того или иного рода: недостаточно всего лишь наклонить световые конусы, нужно «положить их на бок», выстроив в замкнутую цепочку. Итак, если сесть и подумать, как же создать в пространстве—времени замкнутую времениподобную кривую, то первым делом на ум приходит какой-нибудь вращающийся объект — если не бесконечный цилиндр или черная дыра, то, возможно, достаточно длинный цилиндр или всего лишь массивная звезда. Результат может быть еще более впечатляющим, если взять два гигантских массивных тела и запустить их навстречу друг другу с громадной относительной скоростью. А затем, если повезет, гравитационное притяжение этих тел в достаточной степени повлияет на ориентацию окружающих их световых конусов, чтобы сформировать замкнутую времениподобную кривую.

Все это как-то слишком просто. Действительно, мы немедленно сталкиваемся с различными сложностями. Общая теория относительности — сложная штука, причем не только концептуально, но и технически; уравнения, описывающие искривление пространства—времени, невероятно сложны для решения в любой ситуации, возникающей в реальном мире. Все известные нам точные предсказания теории связаны с сильно идеализированными случаями, обладающими высокой симметрией, такими как статическая звезда или совершенно однородная Вселенная. Расчет кривизны пространства—времени, образовавшейся в результате пролета двух черных дыр мимо друг друга со скоростью, близкой к скорости света, лежит за пределами наших возможностей (хотя методы расчетов улучшаются с каждым днем).

С целью сильного упрощения мы можем задать вопрос, что произойдет, если два массивных объекта пройдут близко друг от друга на высокой относительной скорости, но во Вселенной с *трехмерным пространством—временем*, где вместо трех измерений пространства и одного измерения времени, как в нашем реальном четырехмерном пространстве—времени, будут всего лишь два измерения пространства и одно измерение времени.

Отбрасывая для простоты одно измерение пространства, мы совершаем достойный признания шаг. Эдвин Э. Эббот в своем романе «Флатландия» описывал существ, живущих в двумерном пространстве. Он пытался показать, что и в нашем мире может быть *более* трех измерений, попутно высмеивая Викторианскую культуру.¹⁷ Мы позаимствуем терминологию Эббота и будем называть Вселенную с двумя пространственными измерениями и одним временным Флатландией, даже если на самом деле она вовсе не такая плоская¹⁸, так как нас интересуют случаи искривления пространства—времени, когда световые конусы могут наклоняться, а времениподобные кривые — замыкаться.

Изучение машин времени во Флатландии (и в Кембридже)

Рассмотрим ситуацию, показанную на рис. 6.5: два массивных объекта с высокой скоростью проносятся мимо друг друга во Флатландии. В трехмерной Вселенной прекрасно то, что в ней уравнение Эйнштейна упрощается на несколько порядков, позволяя найти точное решение задачи, которая в реальной четырехмерной Вселенной была бы невообразимо сложной. В 1991 году астрофизик Ричард Готт закатал рукава и рассчитал искривление пространства—времени для этой ситуации. В частности, он обнаружил, что во Флатландии тяжелые объекты, проходя мимо друг друга, *действительно* создают

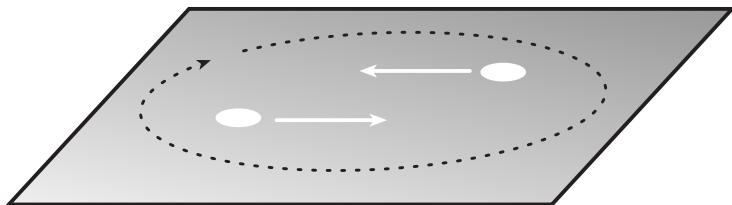


Рис. 6.5. Машина времени Готта во Флатландии. Если два объекта пройдут мимо друг друга с достаточно высокой относительной скоростью, то возникнет замкнутая времениподобная кривая, обозначенная на рисунке пунктирной линией. Обратите внимание, что показанная здесь плоскость на самом деле двумерная — это не проекция трехмерного пространства

замкнутые времениподобные кривые — при условии, что движутся они с достаточно высокой скоростью. Для каждого конкретного значения массы двух тел Готт рассчитал скорость, с которой те должны двигаться, чтобы в нужной степени наклонить окружающие световые конусы и предоставить возможность путешествия во времени.¹⁹

Интересный результат, но это не считается за «построение» машины времени. В пространстве—времени Готта все предопределено: объекты в самом начале разнесены на большое расстояние, затем проходят в непосредственной близости друг от друга, а после этого снова разлетаются в стороны. В конечном счете замкнутые времениподобные кривые просто не могут не образоваться; во всей истории развития системы не найдется такой точки, где их появления можно было бы избежать. Итак, вопрос остается на повестке дня: можем ли мы своими руками построить машину времени Готта? Например, пусть во Флатландии есть два массивных объекта, находящихся друг относительно друга в покое. К каждому из этих объектов мы приделаем ракетные двигатели (не забывайте повторять про себя: «Это мысленный эксперимент»). Сможем ли мы придать объектам достаточно высокую скорость, чтобы это привело к образованию замкнутых времениподобных кривых? Это можно было бы заслуженно назвать построением машины времени, пусть даже в не очень реалистичных обстоятельствах.

Ответ на этот вопрос чрезвычайно интересен, и мне повезло оказаться в первых рядах зрителей, когда этот поразительный результат был достигнут.²⁰ В 1991 году, когда была опубликована статья Готта, я был аспирантом в Гарварде и работал в основном со своим научным руководителем Джорджем Филдом. Как и многие другие студенты Гарварда, я часто пользовался подземной линией Red Line, чтобы доехать до Массачусетского технологического института (MIT) и прослушать курсы, которых не было в моем университете (множество

студентов МІТ ездили в противоположную сторону по аналогичной причине). Среди интересовавших меня лекций были великолепный курс по теоретической физике элементарных частиц Эдварда (Эдди) Фари и курс по космологии ранней Вселенной Алана Гута. Эдди был молодым парнем с типичным акцентом жителей Бронкса и весьма серьезным отношением к физике (насколько это возможно для человека, работы которого носят названия вроде «Можно ли создать Вселенную в лаборатории путем квантово-механического туннелирования?»²¹). Алан — исключительно здравомыслящий физик, заслуживший мировую известность как изобретатель инфляционного сценария развития Вселенной. Оба они были дружелюбными и увлеченными людьми, ребятами, с которыми было интересно проводить время, даже когда у нас не происходило увлекательных бесед о физике.

Итак, я был счастлив и горд тем, что эти двое пригласили меня поучаствовать в поиске ответа на вопрос, можно ли построить машину времени Готта. Над той же проблемой работала еще одна команда теоретиков в составе Стэнли Дезера, Романа Джакива и нобелевского лауреата Герарда 'т Хоофта. Они открыли интересное свойство двух движущихся тел во Вселенной Готта: несмотря на то что каждый объект в отдельности перемещается со скоростью, меньшей скорости света, совокупный импульс системы, включающей оба эти объекта, такой же, как у тахиона. Словно система двух совершенно обычных частиц является новой частицей, которая движется быстрее света. В специальной теории относительности, где сила притяжения не учитывается, а пространство—время совершенно плоское, это было бы невозможно: совокупный импульс любого числа частиц, скорость которых ниже скорости света, при любых условиях будет соответствовать движению медленнее скорости света. За такой интересный результат сложения скоростей двух объектов мы должны благодарить особые свойства искривленного пространства—времени. Однако для нас это открытие еще не поставило финальную точку в вопросе; кто сказал, что особенности искривленного пространства—времени не позволяют создавать тахионы?

Мы решили добавить к условиям задачи космический корабль, для того чтобы взять объекты, движущиеся с небольшой скоростью, и разогнать их так сильно, чтобы создать машину времени. Возможно ли это? В такой формулировке ответ кажется очевидным: легко! Главное, чтобы ракета была достаточно большая и мощная.

В действительности во Вселенной попросту не хватит для этого энергии. Для начала мы решили рассматривать «открытую Вселенную» — поверхность во Флатландии, по которой двигались наши частицы, простиралась до бесконеч-

ности. Однако одной из своеобразных особенностей силы притяжения во Флатландии является существование безусловного верхнего предела на полную энергию, которая способна поместиться в открытую Вселенную. Попробуйте добавить еще немного, и пространство—время искривится настолько, что Вселенная замкнется на саму себя.²² В четырехмерном пространстве—времени во Вселенной может находиться сколько угодно энергии; каждая порция энергии искривляет ближайшую окрестность пространства—времени, однако на большом удалении от источника эффект ослабевает. В противоположность этому в трехмерном пространстве—времени влияние силы притяжения не может ослабевать — оно лишь усиливается. Следовательно, в открытой трехмерной Вселенной существует максимальный возможный объем энергии — и его недостаточно для построения машины Готта с нуля.

Получается, Природа предусмотрела интересный способ, как избежать создания машины времени. Мы написали две статьи: в первой мы изложили разумное обоснование этого результата, ее авторами стали мы вдвоем. Вторая статья была написана в соавторстве с Кеном Олумом, там было представлено более общее доказательство. Однако во время поисков мы заметили кое-что очень интересное. Действительно, верхний предел энергии существует — но для открытой Вселенной Флатландии; а что насчет закрытой? Если попытаться запихнуть слишком много энергии в открытую Вселенную, то она замкнется на саму себя. Но попробуем превратить эту проблему в характерную особенность и рассмотрим закрытые Вселенные, где пространство выглядит скорее как сфера, а не как плоскость.²³ В них существует одно-единственное допустимое значение полной энергии и никакого пространства для маневров. Суммарная кривизна пространства должна быть равной кривизне сферы, а это в два раза больше, чем может поместиться в открытую Вселенную.

Мы сравнили полную энергию закрытой Вселенной во Флатландии с энергией, необходимой для создания машины времени Готта, и обнаружили, что этого количества достаточно. Это произошло уже после того, как была подготовлена и принята к публикации в *Physical Review Letters*, ведущем журнале в этой области, наша первая статья. Однако журналы позволяют до публикации вставлять в статьи небольшие примечания: «добавлено при проверке», и мы воспользовались этой возможностью, указав, что, *вероятно*, машину времени можно было бы построить в закрытой Вселенной Флатландии, несмотря на то что в открытой Вселенной это совершенно точно невозможно.

Мы сгупили (в такой ситуации очень удобно быть молодым ученым, работающим в компании знаменитых старших коллег; ты всегда можешь оправдаться: «Если даже *эти* ребята пропустили такую ошибку, может быть,

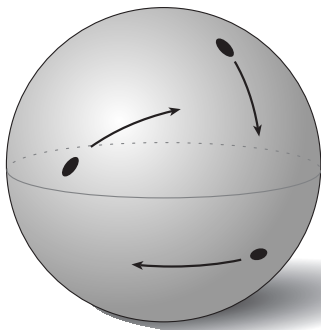


Рис. 6.6. Движущиеся частицы в закрытой Вселенной Флатландии, обладающей топологией сферы. Представьте себе муравьев, ползающих по поверхности пляжного мяча

она и не настолько глупая»). Нам показалось забавным, что Природа так изобретательно предотвращает создание машин времени Готта в открытых Вселенных, но при этом в закрытых Вселенных, судя по всему, никаких проблем с машинами времени не существует. Определенно, в закрытой Вселенной хватит энергии, чтобы разогнать объекты до желаемых скоростей — что может пойти не так?

Очень скоро Герард 'т Хоофт выяснил, что закрытая Вселенная, в отличие от открытой, обладает конечным общим объемом (хотя, поскольку у нас только два пространственных измерения, то «конечной общей площадью», но смысл вы поняли). Он продемонстрировал, что если заставить частицы двигаться в закрытой Вселенной Флатландии таким образом, чтобы инициировать возникновение машины времени Готта, то объем Вселенной начнет очень быстро сокращаться. По сути, Вселенная стремительно помчится навстречу Большому сжатию. Как только вам на ум придет эта мысль, вы сразу же поймете, каким образом пространство — время избегает машин времени: оно схлопывается до нулевого объема еще до того, как появляются замкнутые времениподобные кривые. Уравнения не глут; так что Эдди, Алан и я признали это и отправили в *Physical Review Letters* уведомление об ошибке. Научный прогресс продолжил движение вперед, пусть и получив по пути небольшое ранение.

С учетом нашего результата, описывающего открытые Вселенные, и догадки 'т Хоофта о закрытых Вселенных становится очевидно, что во Флатландии ни при каких условиях невозможно создать новую машину времени Готта, то есть машину, которой до нас там не существовало. Может показаться, что большая часть аргументов, посредством которых мы пришли к этому резуль-

тату, применима только в нереалистичном случае трехмерного пространства—времени, — и это действительно так. Однако совершенно ясно, что общая теория относительности пытается донести до нас простую мысль: замкнутые времениподобные кривые ей не по нраву. Можете сколько угодно пытаться создавать их, но каждый раз что-нибудь да пойдет не так. Определенно, нам было очень интересно, насколько это заключение применимо к реальному миру с четырехмерным пространством—временем.

Кротовые норы

Весной 1985 года Карл Саган работал над своим романом «Контакт», в котором астрофизик Элли Эрроуэй (позднее ее роль в экранизации романа сыграет Джоди Фостер) осуществляет первый контакт с инопланетной цивилизацией.²⁴ Сагану нужно было придумать способ быстрого перемещения на космические расстояния, однако он не хотел идти по ленивому пути писателей научной фантастики и использовать варп-двигатель, который заставил бы ракету лететь быстрее света. Поэтому он поступил так, как поступил бы на его месте любой уважающий себя автор: он бросил свою героиню в черную дыру в надежде, что она выскочит, целая и невредимая, за двадцать шесть световых лет от места сброса.

Маловероятно. Бедную Элли точно не выбросило бы на безопасный берег; приливные силы, действующие вблизи сингулярности черной дыры, сделали бы из нее спагетти — весьма печальный конец. Нельзя сказать, что Саган не был осведомлен о физике черных дыр; он имел в виду вращающиеся черные дыры, где световые конусы не заставляют вас на полной скорости врезаться в сингулярность, — по крайней мере, такую возможность оставляло точное решение, обнаруженное Роем Керром еще в шестидесятых. Однако он понимал, что точно не является мировым экспертом в области черных дыр, и в своем романе старался подходить к научным вопросам со всей тщательностью. К счастью, он дружил с человеком, которого без тени сомнения можно назвать мировым экспертом в этой области, — Кипом Торном, физиком-теоретиком из Калтеха, признанным авторитетом в вопросах общей теории относительности.

Торн с большим интересом прочитал рукопись Сагана и заметил одну проблему: современные исследования указывают, что в реальном мире черные дыры ведут себя совсем не так прилично, как в первоначальном решении Керра. Настоящая черная дыра, которую можно было бы создать с помощью физических процессов в нашей Вселенной, — неважно, вращающаяся или нет, —

зажевала бы бесстрашного астронавта и не выбросила бы наружу ни косточки. Но есть альтернативная идея: кротовая нора.

В отличие от черных дыр, которые практически стопроцентно существуют в реальном мире и наличие которых подтверждается огромным количеством подлинных эмпирических данных, кротовые норы — это целиком и полностью гипотетические игрушки физиков-теоретиков. Смысл кротовых нор примерно понятен из названия: они позволяют воспользоваться преимуществами динамической природы пространства—времени в общей теории относительности и соединить две разные области пространства коротким «мостом».

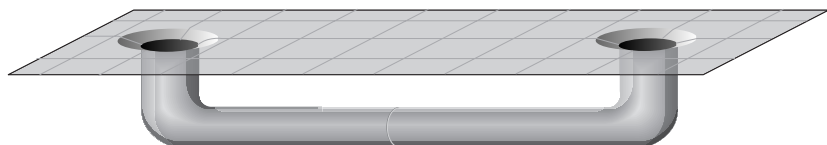


Рис. 6.7. Кротовая нора соединяет две удаленные области пространства. Хотя на рисунке это показать невозможно, длина «моста» в кротовой норе может быть намного меньше обычного расстояния между двумя ее устьями

Типичная кротовина показана на рис. 6.7. Плоскость символизирует трехмерное пространство, а что-то вроде трубы под ней — это и есть кротовая нора, что-то типа трубы, представляющей собой короткий путь между двумя удаленными областями пространства. Места, в которых кротовая нора соединяется с внешним пространством, называются «устьями», а сама труба — «горловиной». Она не выглядит как кратчайший путь; более того, исходя из вида картинки можно подумать, что путешествие по кротовой норе займет больше времени, чем традиционное перемещение от одного устья к другому в обычном пространстве. Однако это объясняется исключительно нашей манерой рисовать интересные искривленные пространства, погружая их в нашу скучную локально трехмерную область. Мы будем рассматривать вариант геометрии, допускающий фигуры вроде показанной на рисунке, но в которой длина кротовой норы может быть какой угодно — в том числе намного меньшей, чем расстояние между устьями в обычном пространстве.

На самом деле есть намного более интуитивно понятный способ представить себе кротовую нору. Вообразите себе обычное трехмерное пространство и «вырежьте» в нем две сферические области равного размера. Затем отождествите поверхности сфер, то есть объявите, что любой объект, входя-

щий в первую сферу, немедленно появляется на противоположной стороне второй. Результат показан на рис. 6.8; каждая сфера представляет собой одно из устьев кротовой норы. Это кротовая нора нулевой длины; пересекая поверхность первой сферы, вы мгновенно появляетесь из второй (на слове «мгновенно» у вас в голове должен сработать сигнал тревоги: мгновенно для кого?).

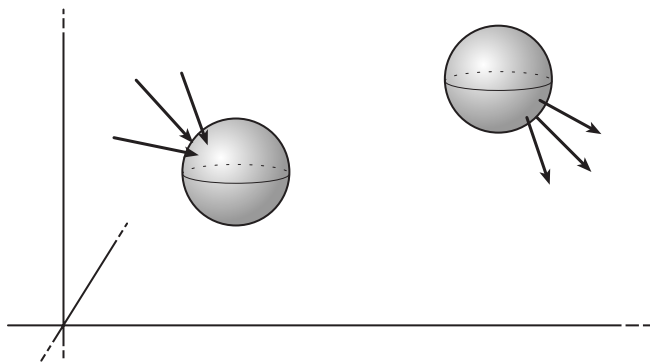


Рис. 6.8. Кротовая нора в трехмерном пространстве, сформированная путем отождествления двух сфер, внутренность которых была удалена. Все, что проходит внутрь одной сферы, моментально появляется на противоположной стороне другой сферы

Кротовая нора заставляет вспомнить наш предыдущий пример с воротами во вчера. Если вы заглянете в кротовую нору с одного конца, то не увидите психоделических цветовых завихрений; вашему зрению предстанет то, что фактически находится на противоположном конце, как если бы вы разглядывали этот пейзаж через своеобразный перископ (или увидели его на мониторе, подключенном к камере на другом конце кротовой норы). И вы с легкостью могли бы протянуть руку или даже прыгнуть сквозь кротовую нору, если она окажется достаточно большой.

Такой тип кротовой норы позволяет срезать путь через пространство— время, соединяя две удаленные области моментальным переходом. Он обеспечивает возможность исполнить трюк, который Сагану требовался для его романа, и по совету Торна автор переписал соответствующий раздел (в кинематографической версии, к сожалению, вы увидите и психоделические завихрения, и переливающиеся огоньки). Однако вопрос Сагана дал толчок развитию целой серии идей, результатом которых стало новаторское научное исследование, а не только точный с научной точки зрения рассказ.

Машина времени без особых затрат

Кротовая нора — это короткий путь через пространство—время; она позволяет добраться из одного места в другое намного быстрее, чем если бы вы воспользовались прямым маршрутом через обычное пространство—время. С вашей, локальной точки зрения ваша скорость никогда не превышает скорость света, однако вы добираетесь до точки назначения быстрее, чем это смог бы сделать свет в отсутствие кротовой норы. Мы знаем, что перемещения со сверхсветовой скоростью открывают нам двери к путешествиям в прошлое. Проход через кротовую нору — не в точности тот же самый, хотя и похожий процесс. В конечном счете Торн, работая совместно с Майклом Моррисом и Ульви Юртсевером, обнаружил способ, как при помощи кротовой норы создать замкнутую времениподобную кривую.²⁵

Секрет заключается вот в чем: когда мы бросаемся заявлениями вроде «кротовая нора соединяет две удаленные области пространства», мы не должны забывать о том, что в действительности это означает, что она соединяет два набора событий в *пространстве—времени*. Представим себе, что пространство—время абсолютно плоское (за исключением кротовой норы) и что мы определили «фоновое время» в некоторой покоящейся системе координат. Отождествляя две сферы для того, чтобы создать кротовую нору, мы делаем это «одновременно» по отношению к этой конкретной координате фонового времени. В какой-то другой системе координат соответствующие моменты времени не совпадали бы.

Теперь примем серьезное допущение: разрешим себе перемещать любое из устьев кротовины независимо от противоположного. Для того чтобы оправдать такое допущение в глазах других ученых, вам пришлось бы провести немало часов в жарких спорах, но в целях нашего мысленного эксперимента все совершенно нормально. Теперь пусть одно устье так и сидит себе спокойно на траектории, соответствующей движению без ускорения, а второе мы будем перемещать туда и сюда на очень высокой скорости.

Для того чтобы понять, чем это обернется, вообразите, что и к одному и к другому устью мы прикрепили часы. Часы на стационарном устье идут с той же скоростью, что и часы, отсчитывающие координату фонового времени. Однако для часов на движущемся устье времени проходит намного меньше — так происходит в теории относительности с любым движущимся объектом. В результате, когда мы снова располагаем устья рядом друг с другом, часы на том конце, который мы перемещали с большой скоростью, здорово отстают по сравнению с часами, которые оставались на одном месте.

Попробуем рассмотреть ту же ситуацию с точки зрения наблюдателя, глядящего сквозь кротовую нору. Вспомните, что, заглянув в горловину, вы не увидите ничего пугающего — только то, что находится на противоположном конце кротовой норы. Когда мы смотрим в устье кротовой норы, нам кажется, что часы на обоих концах неподвижны друг относительно друга. Причина в том, что длина горловины всегда остается неизменной (в нашем упрощенном примере она равна нулю), даже когда мы передвигаем одно из устьев. Для наблюдателя, находящегося возле кротовой норы, эти двое часов всего лишь стоят рядом друг с другом совершенно неподвижно. Следовательно, идут они абсолютно синхронно, и оба циферблата показывают точное время.

Как двое часов могут показывать одинаково точное время, если часы, прикрепленные к подвижному устью, в конце эксперимента должны сильно отставать? Легко! Когда на часы смотрит внешний наблюдатель, показания на них отличаются, а если смотреть на часы сквозь кротовую нору, то время они показывают одинаковое. Этот загадочный феномен объясняется очень просто: как только два устья начинают двигаться по разным путям через пространство — время, с точки зрения внешнего наблюдателя они больше не принадлежат одному и тому же моменту времени. Сфера, представляющая одно устье, по-прежнему отождествлена со сферой, представляющей второе устье, но теперь они отождествлены в *разные моменты времени*. Проходя сквозь одно устье, вы перемещаетесь в прошлое — относительно фонового времени; проходя по кротовой норе в обратную сторону, вы снова переноситесь в будущее.

Следовательно, такой тип кротовой норы абсолютно идентичен вратам во вчера. Манипулируя входами кротовой норы с коротким туннелем, мы соединили две разные области пространства — времени, «живущие» в совершенно разных временах. Теперь мы можем проходить сквозь кротовую нору и перемещаться во времени точно так же, как по замкнутым времениподобным кривым, и снова начинать беспокоиться о всевозможных парадоксах. Если бы эту процедуру можно было воспроизвести в реальном мире, то результат, несомненно, можно было бы считать построением настоящей машины времени, отвечающей требованиям из нашего предыдущего обсуждения.

Защита от машин времени

При обсуждении машины времени на основе кротовой норы создается впечатление, что замкнутые времениподобные кривые могли бы существовать в реальном мире. Казалось бы, проблема исключительно в технологических воз-

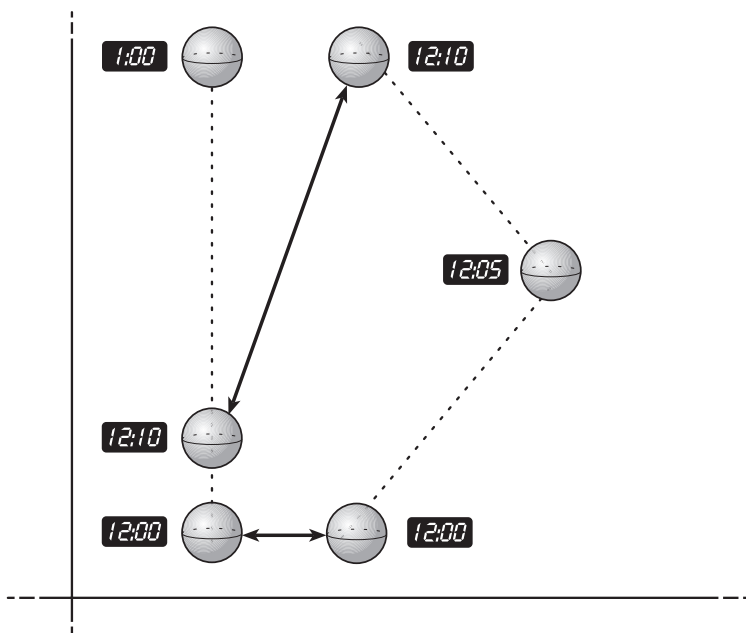


Рис. 6.9. Машина времени на основе кротовой норы. Двухнаправленные стрелки обозначают отождествление сферических устьев кротовой норы. Сначала устья находятся по соседству и отождествляются в один и тот же момент фонового времени. Одно устье остается неподвижным, а другое уносится в сторону со скоростью, близкой к скорости света. Когда оно возвращается, устья отождествляются в совершенно разные моменты фонового времени

возможностях, а вовсе не в ограничениях, налагаемых законами физики. Нам всего лишь нужно найти кротовую нору, научиться удерживать ее в открытом состоянии, передвинуть одно из устьев в правильном направлении... Нет, наверное, это все же нереально. Как вы наверняка подозревали с самого начала, оказывается, что существует масса причин, почему кротовые норы нельзя рассматривать в качестве практических инструментов построения машин времени.

Во-первых, кротовые норы не растут на деревьях. В 1967 году физик-теоретик Роберт Герош задался вопросом, насколько реально создать кротовую нору. Он доказал, что для этого необходимо не только скрутить пространство — время совершенно определенным способом, но и на одном из промежуточных шагов этого процесса создать замкнутую времениподобную кривую. Другими

словами, прежде чем приступать к построению машины времени с использованием кротовой норы, нужно построить машину времени, которая позволит создать кротовую нору.²⁶ Однако даже если вам повезет и вы совершенно случайно наткнетесь на существующую кротовую нору, то у вас на пути встанет новое препятствие: не так-то просто удерживать ее открытой. Действительно, это считается единственным серьезным доводом, позволяющим опровергнуть возможность построения машины времени на основе кротовой норы.

Проблема в том, что для удержания кротовой норы в открытом состоянии требуется отрицательная энергия. Гравитация означает притяжение: гравитационное поле, создаваемое обычным объектом с положительной энергией, заставляет вещи притягиваться друг к другу. Но взгляните еще раз на рис. 6.8: какой эффект кротовая нора оказывает на проходящие сквозь нее частицы? Она «дефокусирует их», разделяя частицы, которые первоначально перемещались все вместе, и заставляя их двигаться в разные стороны. Это прямая противоположность традиционному поведению гравитации и знак того, что в процессе должна принимать участие отрицательная энергия.

Существует ли отрицательная энергия в природе? Вероятно, нет; по крайней мере, не в той форме, которая потребовалась бы для поддержания работоспособности макроскопической кротовой норы. Тем не менее пока что мы не можем быть в этом уверены. Высказывались предположения о том, что квантовая механика способна помочь в создании «карманов» отрицательной энергии, однако они не были подкреплены достаточными обоснованиями. Трудность в том, что этот вопрос включает как гравитацию, так и квантовую механику, а мы пока что не очень хорошо понимаем, как пересекаются эти две теории.

Однако и это еще не все; даже если бы мы нашли кротовую нору и сумели удерживать ее открытой, скорее всего, она вела бы себя чрезвычайно нестабильно. Малейшее возмущение — и кротовая нора сколлапсировала бы в черную дыру. Это связано с еще одним вопросом, на который не так-то просто найти однозначный ответ, но базовая идея заключается в том, что любое крошечное возмущение энергии может увеличиваться, перемещаясь в окрестности замкнутой времениподобной кривой произвольно большое число раз. Согласно современной точке зрения, такие повторяющиеся перемещения неизбежны по крайней мере для некоторых небольших возмущений. Кротовая нора не просто чувствует массу единичной пылинки, пролетающей сквозь нее, — она ощущает это влияние снова и снова, создавая громадное гравитационное поле, размер которого достаточно велик для того, чтобы в конечном итоге разрушить нашу потенциальную машину времени.

Таким образом, природа прилагает массу усилий, для того чтобы не позволить нам построить машину времени. Накопленные косвенные улики заставили Стивена Хокинга высказать предположение, которое теперь носит название гипотезы защиты хронологии: законы физики (какими бы они ни были) запрещают создание замкнутых времениподобных кривых.²⁷ Мы располагаем множеством свидетельств того, что эти строки хотя бы отчасти правдивы, даже если надежных доказательств в нашем арсенале пока что нет.

Идея путешествий во времени завораживает нас — в том числе потому, что она открывает двери для парадоксов и ставит под вопрос наше понимание свободы воли. В то же время велика вероятность того, что путешествия во времени невозможны, а проблемы, связываемые с ними, по большей части надуманны (если только вы не сценарист из Голливуда — тогда они могут стать вашим хлебом). Стрела времени, с другой стороны, является неотъемлемой составляющей окружающей нас реальности, и поднимаемые ее существованием вопросы требуют ответов. Эти два явления связаны между собой: самосогласованная стрела времени во Вселенной может существовать лишь потому, что здесь нет замкнутых времениподобных кривых, а многие рассуждения, запрещающие такие кривые, порождаются их несовместимостью со стрелой времени. Отсутствие машин времени — обязательное условие, однако ни в коем случае не достаточное объяснение самосогласованности стрелы времени. Мы проделали огромную подготовительную работу, а это означает, что сейчас самое время, вооружившись вновь обретенными знаниями, пойти в прямое наступление на загадку направления времени.

Примечания

- ¹ Как вы догадались, мы намекаем на машины времени из снятого в 1960 году Джорджем Палом по роману Герберта Уэллса фильма «Машина времени», из фильма Роберта Земекиса «Назад в будущее» (1985 год) и из давнишнего сериала ВВС «Доктор Кто» соответственно.
- ² В интересах нашей истории мы относимся к тахионам не совсем беспристрастно. Допущение о существовании объектов, путешествующих быстрее света, открывает двери для парадоксов — но мы не обязаны проходить сквозь них. Мы можем в своем воображении строить модели, включающие в том числе и тахионы, но только если они не будут содержать противоречий. Некоторые подробности вы найдете в работах: *Feinberg, G. Possibility of Faster-Than-Light Particles // Physical Review, 1967, 159, p. 1089–1105; Nahin, P. J. Time Machines: Time Travel in Physics, Metaphysics, and Science Fiction. New York: Springer-Verlag, 1999.* Чтобы еще больше запутать ситуацию, в квантовой теории поля термин «тахион» часто используют для описания мгновенной нестабильной конфигурации поля, в которой в действительности ничего не движется со скоростью, превышающей скорость света.

- ³ Gödel, K. An Example of a New Type of Cosmological Solution of Einstein's Field Equations of Gravitation // *Reviews of Modern Physics*, 1949, 21, p. 447–450. Проводя исследования в ходе подготовки к написанию своего грандиозного учебного пособия «Гравитация» (1973), Чарльз Мизнер, Кип Торн и Джон Уилер посетили Гёделя с намерением побеседовать об общей теории относительности. Однако Гёделя в первую очередь интересовало, позволили ли современные астрономические наблюдения обнаружить какие-либо доказательства вращения Вселенной. Ему все так же хотелось знать, насколько его решение применимо к реальному миру.
- ⁴ Kerr, R. P. Gravitational Field of a Spinning Mass as an Example of Algebraically Special Metrics // *Physical Review Letters*, 1963, 11, p. 237–238. Решение Керра на техническом уровне разбирается во всех современных учебниках по общей теории относительности, а популярную интерпретацию можно найти в книге Thorne, K. S. *Black Holes and Time Warps: Einstein's Outrageous Legacy*. New York: W. W. Norton, 1994. Торн рассказывает о том, чем закончилось представление Керром своего решения на первом Техасском симпозиуме по релятивистской астрофизике: присутствующие астрофизики полностью (и можно даже сказать весьма грубо) его проигнорировали, чрезмерно увлекшись спорами о квазарах. Справедливости ради заметим, что в то время сам Керр не понимал, что это решение описывает черную дыру, хотя у него не вызвало сомнений, что это вращающееся решение уравнения Эйнштейна. Позднее астрофизики поняли, что квазары питаются энергией вращающихся черных дыр, описываемых пространством—временем Керра.
- ⁵ Tipler, F. J. Rotating Cylinders and the Possibility of Global Causality Violation // *Physical Review*, 1974, D 9, p. 2203–2206. Решение для кривизны пространства—времени вокруг бесконечного цилиндра в действительности было найдено в 1937 году Виллемом Якобом ван Стокумом, нидерландским физиком (и пилотом бомбардировщика). Однако ван Стокум не заметил, что его решение содержит замкнутые времениподобные кривые. Превосходный разбор обоих исследований, возможности существования машины времени в общей теории относительности, а также образа путешествий во времени в художественной литературе можно найти в книге Nahin, P. J. *Time Machines: Time Travel in Physics, Metaphysics, and Science Fiction*. New York: Springer-Verlag, 1999.
- ⁶ Эрвин Шрёдингер, один из пионеров квантовой механики, предложил знаменитый мысленный эксперимент, иллюстрирующий экстравагантную природу квантового принципа суперпозиции. Вообразите, что кот помещен в герметичную камеру, содержащую радиоактивное вещество, которое с вероятностью 50 % через какой-то фиксированный интервал может распасться и активировать источник, выпускающий в камеру ядовитый газ. Согласно традиционным представлениям квантовой механики, полученная в результате система представляет собой равную суперпозицию «живого кота» и «мертвого кота», по крайней мере до тех пор, пока кто-то не откроет камеру и не проверит состояние животного. Подробнее об этом говорится в главе 11.
- ⁷ Кип Торн заметил, что «парадокс дедушки» кажется чрезмерно изощренным — с этим дополнительным поколением и прочими сложностями, не говоря уже о том, что он совершенно точно патриархален. Торн предложил вместо этого рассматривать парадокс «матереубийства».
- ⁸ Это правило иногда повышают до статуса принципа; см. обсуждение в книгах: Новиков И. Д. *Эволюция вселенной*. — М.: Наука, 1983. или Horwich, P. *Asymmetries in Time: Problems in the Philosophy of Science*. Cambridge, MA: MIT Press, 1987. Такие философы, как Ганс

Рейхенбах («Философия пространства и времени». Либроком, 2009) и Хилари Патнэм (*Putnam, H. It Ain't Necessarily So // Journal of Philosophy* 59, no. 22 (1962): 658–71), также подчеркивали, что замкнутые времениподобные кривые не обязательно провоцируют возникновение парадоксов, — при условии, что события в пространстве—времени согласованы между собой. Действительно, это всего лишь здравый смысл. Совершенно очевидно, что в реальном мире парадоксов не бывает; вопрос лишь в том, как Природе удастся их избегать.

- ⁹ В главе 11, когда мы будем обсуждать квантовую механику, мы немного отойдем от этого утверждения. Квантовая механика предполагает, что в реальном мире может быть несколько классических историй, а не одна-единственная. Дэвид Дойч («Структура реальности» / Пер. с англ. М.; Ижевск, 2001) предложил использовать существование множества историй в своих интересах, выбрав одну, в которой мы прошли через Ледниковый период, и другую, в которой мы в него не попадали (а также бесконечное число иных).
- ¹⁰ «Назад в будущее» — вероятно, один из наименее правдоподобных фильмов о путешествии во времени среди всех, когда-либо снятых. Марти Макфлай переносится из 1980-х годов обратно в 1950-е и начинает менять прошлое направо и налево. Хуже того, каждый раз, когда он вмешивается в события, которые, предположительно, уже произошли, последствия этих изменений «моментально» распространяются в будущее, отражаясь даже на семейной фотографии, которую Марти носит с собой. Трудно представить, каким разумным способом можно было бы объяснить принцип «моментальности». Не то чтобы это было невозможно, но пришлось бы положить в основу объяснения существование дополнительного измерения, обладающего многими свойствами обычного времени. Сквозь это измерение индивидуальное сознание Марти будет проходить вследствие совершения им разнообразных действий. Наверняка кто-то должен был написать докторскую диссертацию на тему «К согласованной онтологии времени и памяти в трилогии “Назад в будущее” и далее». Непонятно только, на каком факультете ее можно было бы защитить.
- ¹¹ Более или менее окончательное слово о самосогласованных историях в присутствии замкнутых времениподобных кривых было сказано Робертом Хайнлайном в книге «Все вы зомби...» (1959). Путем нескольких прыжков во времени и одной операции по смене пола главный герой умудряется стать собственным отцом, матерью и вербовщиком временных войск. Обратите внимание, однако, на то, что история жизни героя не замкнута в цикл: по ходу изложения он стареет.
- ¹² Обсуждение этого утверждения вы найдете в работе *Friedman, J. et al. Cauchy Problem in Space-times with Closed Timelike Curves // Physical Review*, 1990, D 42, p. 1915–1930.
- ¹³ На самом деле, мы и есть убежденные детерминисты. Человеческие существа состоят из частиц и полей, беспрекословно подчиняющихся законам физики, и в теории (но точно не на практике) мы могли бы забыть о своих человеческих качествах и рассматривать себя как сложные наборы элементарных частиц. Однако это не означает, что нам остается лишь сложить оружие перед лицом причудливой проблемы свободной воли в присутствии замкнутых времениподобных кривых.
- ¹⁴ Это несколько более самоуверенное заявление, чем то, что физики способны доказать в действительности. В некоторых сильно упрощенных ситуациях можно продемонстрировать, что будущее полностью определяется предшествующими событиями, — даже в присутствии замкнутых времениподобных кривых (см. *Friedman, J., Higuchi, A. Topological*

Censorship and Chronology Protection // *Annalen der Physik*, 2006, 15, p. 109–128). Кажется (по крайней мере, мне) весьма вероятным, что в более реалистичных и сложных моделях такого счастья нам не будет; но все же окончательного ответа у нас пока нет.

- ¹⁵ Иногда можно нарезать пространство—время на моменты постоянного времени даже в присутствии замкнутых времениподобных кривых: например, это возможно в простой Вселенной с циклическим временем. Однако это совершенно уникальный случай, а в произвольном пространстве—времени с замкнутыми времениподобными кривыми было бы невозможно найти такой вариант «нарезки», который бы обеспечил последовательное деление всей Вселенной.
- ¹⁶ Исключение, очевидно, составляет вращающаяся черная дыра. Не составляет труда вообразить создание подобной дыры в результате коллапса вращающейся звезды, однако встает другая проблема: замкнутые времениподобные кривые скрыты за горизонтом событий. Получается, что невозможно попасть на такую кривую, не покинув раз и навсегда внешний мир. Далее мы обсудим, можно ли считать это вариантом эвакуации при чрезвычайных обстоятельствах. Пожалуй, еще важнее то, что найденное Керром решение, описывающее вращающуюся черную дыру, применимо только в идеализированной ситуации, когда пространство—время не содержит вообще никакого вещества. Черной дырой должно быть все пространство—время — это не одна из тех черных дыр, которые получают в результате коллапса звезды. Большинство экспертов по общей теории относительности полагают, что в реальном мире ни одна схлопнувшаяся звезда не способна породить замкнутые времениподобные кривые, даже за горизонтом событий.
- ¹⁷ *Abbot, E. A. Flatland: A Romance of Many Dimensions. Cambridge: Perseus, 1899; также см. Randall, L. Warped Passages: Unraveling the Mysteries of the Universe's Hidden Dimensions. New York: HarperCollins, 2005.*
- ¹⁸ Название «Флатландия» образовано от английского *flat* — плоский. — *Примеч. пер.*
- ¹⁹ Первоначальное описание решения приведено в работе *Gott, J. R. Closed Timelike Curves Produced by Pairs of Moving Cosmic Strings: Exact Solutions // Physical Review Letters, 1991, 66, p. 1126–1129.* Также перу автора принадлежит научно-популярная книга на ту же тему: *Gott, J. R. Time Travel in Einstein's Universe: The Physical Possibilities of Travel Through Time. Boston: Houghton Mifflin, 2001.* Почти во всех расчетах, с которыми вы познакомитесь в этих работах, говорится не о «массивных телах, перемещающихся во Флатландии», а об «идеально прямых параллельных космических струнах, движущихся в четырехмерном пространстве—времени». Однако суть в том, что эти ситуации абсолютно равнозначны. Космическая струна — это гипотетический реликтовый объект, зародившийся еще в ранней Вселенной, который может быть микроскопически тонким, но растянутым на космологические расстояния. Идеализированная струна может быть абсолютно прямой и бесконечной, однако в реальном мире космические струны должны извиваться и изгибаться разными сложными способами. Но если бы струна была идеально прямой, то в пространстве-времени существовало бы направление, совпадающее с направлением этой струны, вдоль которого вообще ничего бы не менялось. Говоря языком физиков, пространство—время было бы инвариантным относительно переноса и буста вдоль струны. По сути, это означает, что направление вдоль струны не играет абсолютно никакой роли, и мы можем с чистым сердцем его игнорировать. Если отбросить одно измерение, то бесконечно длинная струна в трехмерном пространстве превратится в двумерную точечную частицу. То же самое относится к набору из нескольких струн — при условии,

что все они идеально прямые и на всем своем протяжении остаются параллельными друг другу. Разумеется, мысль поиграть с бесконечно длинными, и идеально прямыми струнами почти так же экстравагантна, как предложение вообразить, что мы живем в трехмерном пространстве—времени. Но это нормально. Мы всего лишь делаем нереалистичные предположения, чтобы приблизить наши теории к краю постижимого и чтобы отделить то, что невозможно в принципе, от того, что пока что недостижимо вследствие технических сложностей.

²⁰ Вскоре после публикации статьи Готта известный физик Курт Катлер (*Cutler, C. Global Structure of Gott's Two-String Spacetime // Physical Review D* 45 (1992): 487–94) доказал, что замкнутые времениподобные кривые должны простираяться до бесконечности, — еще одно свидетельство того факта, что данное решение в действительности нельзя считать построением машины времени (поскольку «построение» для нас — это действие, совершаемое в некоей локальной области). Дезер, Джакив и 'т Хоофт (*Deser, S., Jackiw, R., and 't Hooft, G. Physical Cosmic Strings Do Not Generate Closed Timelike Curves // Physical Review Letters* 68 (1992): 267–69.) исследовали решение Готта и обнаружили, что соответствующий суммарный импульс должен быть равен импульсу тахиона. Мы вместе с Фари, Гумом и Олумом (*Carroll, S. M., Farhi, E., and Guth, A. H. An Obstacle to Building a Time Machine // Physical Review Letters* 68 (1992): 263–66; *Erratum-Ibid.*, 68 (1992): 3368; *Energy Momentum Restrictions on the Creation of Gott Time Machines // Physical Review D* 50 (1994): 6190–6206) показали, что в открытой Вселенной Флатландии никогда бы не нашлось достаточно энергии, чтобы с нуля создать машину времени Готта. 'т Хоофт (*'t Hooft, G. Causality in (2+1)-Dimensional Gravity // Classical and Quantum Gravity* 9 (1992): 1335–48) доказал, что закрытая Вселенная Флатландии схлопнется в сингулярность еще до того, как у замкнутой времениподобной кривой появится шанс на зарождение.

²¹ *Farhi, E., Guth, A. H., Guven, J. Is It Possible to Create a Universe in the Laboratory by Quantum Tunneling? // Nuclear Physics*, 1990, В 339, p. 417–490.

²² Представьте себе плоскость: при взгляде из любой конкретной точки она простирается вокруг на 360 градусов. Во Флатландии каждая дополнительная порция энергии уменьшает общий угол этой «развертки». Будем говорить, что любое материальное тело связано с «дефицитом угла»; наличие такого материального тела «вычитает» из развертки соответствующий угол. Чем больше тело, тем больший угол вычитается. Получившаяся геометрическая фигура на большом удалении выглядит как конус, а не как плоский лист бумаги. Однако больше 360 градусов мы вычтеть не сможем, поэтому общая энергия, которая может существовать в открытой Вселенной, ограничена снизу.

²³ Мы говорим «выглядит как», потому что речь идет о топологии пространства, а не его геометрии. Не следует понимать, что кривизна пространства—времени всегда соответствует идеальной сфере, — мы лишь утверждаем, что его можно плавно преобразовать в сферу. Сферическая топология подразумевает, что «дефицит угла» равен в точности 720 градусам — вдвое больше верхнего предела открытой Вселенной. Представьте себе куб (являющийся топологическим эквивалентом сферы). У него восемь вершин, каждой из которых соответствует дефицит угла 90 градусов, — итого 720.

²⁴ *Sagan, C. Contact*. New York: Simon and Schuster, 1985. Историю о том, как вопросы Сагана вдохновили Кипа Торна на исследование кротовин и путешествий во времени, вы найдете в работе *Thorne, K. S. Black Holes and Time Warps: Einstein's Outrageous Legacy*. New York: W. W. Norton, 1994.

- ²⁵ Если свериться с датами, станет очевидно, что исследование машины времени на основе кротовой норы предшествовало работам, связанным с изучением Флатландии. Однако оно описывает немного более непривычную физику, чем использовалась для описания идеи Готта, поэтому логично обсуждать эти гипотезы именно в таком порядке. Первоначальные сведения о кротовых норах, служащих машинами времени, вы найдете в статье *Morris, M. S., Thorne, K. S., Yurtsever, U. Wormholes, Time Machines, and the Weak Energy Condition // Physical Review Letters* 61 (1988): 1446–49. Подробное исследование, насколько непротиворечивыми были бы путешествия во времени, использующие кротовые норы, приводится в работе *Friedman, J. et al. Cauchy Problem in Space-times with Closed Timelike Curves // Physical Review*, 1990, D 42, p. 1915–1930, а на популярном уровне история изложена в книге *Thorne, K. S. Black Holes and Time Warps: Einstein's Outrageous Legacy*. New York: W. W. Norton, 1994.
- ²⁶ Однажды мне выпала честь представлять Боба Героша аудитории перед одним из его выступлений. В такой ситуации полезно рассказать о человеке какую-нибудь забавную историю, поэтому я заранее воспользовался помощью Google. Мне повезло: я наткнулся на замечательную вещь — сайт фанатов сериала «Звездный путь», на котором была размещена карта галактики. В глаза сразу же бросался объект под ярким названием «Кротовая нора Героша». (Судя по всему, этот объект соединял квадрант «Бета» с квадрантом «Дельта» и стал причиной неприятной стычки с ромуланцами.) Я распечатал копию карты на прозрачке и продемонстрировал ее во время вступления, немало развеселив аудиторию. Позднее Боб признался, что решил сначала, будто бы я сам все это выдумал и нарисовал, и что ему было приятно увидеть подтверждение того, что его исследование кротовых нор принесло практическую пользу внешнему миру. Прочитать о том, почему для создания кротовой норы сперва необходимо сконструировать замкнутую времениподобную кривую, можно в работе *Gerch, R. P. Topology Change in General Relativity // Journal of Mathematical Physics*, 1967, 8, p. 782.
- ²⁷ *Hawking, S. W. The Chronology Protection Conjecture // Physical Review*, 1991, D 46, p. 603. В заключение Хокинг также заявляет о наличии эмпирических данных, доказывающих невозможность путешествия назад во времени, приводя в качестве одного из доказательств тот факт, что наше время не наводнено учеными-историками из будущего. Он пошутил (во всяком случае, я так думаю). Даже если бы построение замкнутых времениподобных кривых с нуля было возможно, мы не смогли бы с помощью них попасть в прошлое — в то время, когда замкнутых времениподобных кривых еще не существовало. Таким образом, нельзя говорить об эмпирических доказательствах невозможности построения машины времени — а всего лишь об отсутствии доказательств того, что кому-то это уже удалось.

Часть III

Энтропия и ось времени

Глава 7

Время, назад!

Это-то я и имею в виду, когда говорю, что хотел бы повернуть назад течение времени: я бы хотел уничтожить последствия некоторых событий и восстановить первоначальные обстоятельства.

Итало Кальвино. Если однажды зимней ночью путник

Пьер-Симон Лаплас слыл карьеристом в те времена, когда карьеризм считался делом рискованным.¹ В разгар Великой французской революции Лаплас занял место одного из величайших математиков Европы, о чем он любил частенько напоминать своим коллегам в Академии наук. В 1793 году — в эпоху террора — Академия была распущена; Лаплас объявил о своих республиканских взглядах, но все же покинул Париж, для того чтобы не подвергать себя опасности (он не без оснований беспокоился за свою жизнь; его коллегу Антуана Лавуазье, отца современной химии, в 1794 году отправили на гильотину). Когда к власти пришел Наполеон, Лаплас присоединился к бонапартистам и посвятил императору свою работу «Аналитическая теория вероятностей». Наполеон назначил Лапласа министром внутренних дел, однако его карьера на этом посту продолжилась совсем недолго — слишком абстрактными для политика понятиями он мыслил. После реставрации Бурбонов Лаплас стал роялистом и убрал посвящение Наполеону из последующих редакций своей книги. Титул маркиза ему был дарован в 1817 году.



Рис. 7.1. Пьер-Симон Лаплас, математик, физик, гибкий политик и непоколебимый детерминист

Несмотря на большое социальное честолюбие, когда дело доходило до его научных исследований, Лаплас моментально забывал о такте. Бытует забавный анекдот о его встрече с Наполеоном после того, как ученый попросил императора принять в подарок копию «Небесной механики» — пятитомного трактата о движении планет. Маловероятно, что Наполеон ознакомился с этим трудом (или хотя бы с его частью), но кто-то из присутствующих при дворе доложил ему, что автор ни в одном из пяти томов ни разу не ссылается на Бога. Наполеон воспользовался возможностью подшутить над ученым: «Месье Лаплас, говорят, вы написали эту толстую книгу о системе мира, не упомянув Создателя ни единым словом». На что Лаплас невозмутимо ответил: «Мне не понадобилась эта гипотеза».²

Одним из центральных догматов философии Лапласа был детерминизм. Именно Лапласу удалось разглядеть суть взаимосвязи между настоящим и будущим в ньютоновской механике: если вы знаете о настоящем каждую мелочь, то будущее для вас абсолютно предопределено. Как он писал во введении к рассуждениям о теории вероятностей:

Мы должны рассматривать настоящее состояние Вселенной как следствие ее предыдущего состояния и как причину последующего. Ум, которому были бы известны для какого-либо данного момента все силы, одушевляющие природу, и относительное положение всех ее составных частей, если бы вдобавок он оказался достаточно обширным, чтобы подчинить эти данные анализу, обнял бы в одной формуле движения величайших тел Вселенной наравне с движениями мельчайших атомов; не осталось бы ничего, что было бы для него недостоверно, и будущее, так же как и прошедшее, предстало бы перед его взором.³

Сегодня мы наверняка предположили бы, что достаточно мощный компьютер, если загрузить в него всю информацию о текущем состоянии Вселенной, смог бы с идеальной точностью предсказывать будущее (и восстанавливать прошлое). Лаплас о компьютерах ничего не знал, поэтому в качестве мысленного эксперимента предложил считать, будто во Вселенной существует некий

бескрайний разум. Его биографам это предложение показалось суховатым, поэтому они придумали звучное название: демон Лапласа.

Разумеется, сам Лаплас никогда не называл предмет своего эксперимента демоном; скорее всего, у него просто не было необходимости в такой гипотезе — как и в гипотезе о существовании Бога. Однако идея отражает определенную угрозу, кроющуюся в изначальных уравнениях ньютоновской физики. Будущее не создается нашими руками; все судьбы предопределены и зашифрованы в деталях нынешнего состояния Вселенной. Каждый момент прошлого и будущего зафиксирован в настоящем. У нас всего лишь нет достаточного количества ресурсов, чтобы выполнить необходимые вычисления.⁴

Каждый из нас на подсознательном уровне противится такому положению вещей. Мы не хотим, чтобы демон Лапласа существовал, чтобы будущее было предопределено, даже если бы у кого-то был доступ к полному описанию состояния Вселенной. Том Стоппард в «Аркадии» красочно описывает беспокойства подобного рода.

ВАЛЕНТАЙН: Верно. Еще в двадцатых годах прошлого века один ученый — не помню имени — утверждал, что, опираясь на законы Ньютона, можно предсказывать будущее. Естественно, для этого нужен компьютер — огромный, как сама Вселенная. Но формула, так или иначе, существует.

ХЛОЯ: Но она не срабатывает! Ведь правда же? Согласись! Не срабатывает!!!

ВАЛЕНТАЙН: Согласен. Расчеты неверны.

ХЛОЯ: Расчеты ни при чем. Все из-за секса.

ВАЛЕНТАЙН: Да ну?

ХЛОЯ: Я уверена. Хотя, спору нет, Вселенная детерминирована, Ньютон был прав. Вернее, она пытается соответствовать его законам, но все время сбивает. Буксует. А причина одна-единственная: люди любят не тех, кого надо. Поэтому сбиваются все планы и искажается картинка будущего.

ВАЛЕНТАЙН: Хм... Притяжение, которое Ньютон сбросил со счетов?.. Одно яблоко трахнуло его по башке, а другое подкинул змей-искуситель?.. Да. (Пауза.) Пожалуй, ты додумалась до этого первая.⁵

Мы не будем углубляться в обсуждение вопроса, помогает ли сексуальная привлекательность выбраться из-под тяжелого пресса детерминизма. Нас интересует лишь то, почему прошлое так разительно отличается от будущего. Это не представляло бы никакой загадки, если бы не тот факт, что основополагающие законы физики вообще-то абсолютно обратимы. Взять того же демона Лапласа: для него реконструкция прошлого и предсказание будущего совершенно идентичны.

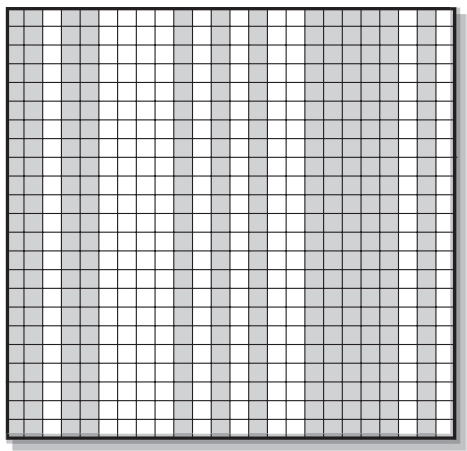
Отражение во времени (изменение направления времени на обратное) оказывается удивительно коварным понятием, хотя на первый взгляд кажется, что все просто и очевидно (помните про кинолентку, прокручиваемую в обратном направлении?). Нельзя просто так взять и бездумно развернуть время в обратную сторону — это *не будет* отражением симметрии законов природы. Для того чтобы правильно описать основополагающую симметрию, необходимо подойти к значению того, что мы понимаем под «задней передачей времени», с другой стороны. Итак, сейчас мы с вами пойдем к нашей цели круглым путем, используя упрощенные модели. В конечном счете я хочу продемонстрировать, что главным понятием в наших рассуждениях является не «изменение хода времени на обратный», а похожее понятие «обратимости» — умение восстанавливать прошлое исходя из состояния настоящего — в точности, как это делает Демон Лапласа. Не исключено, что это окажется куда сложнее, чем пустить время в обратную сторону. Ключевое понятие, обеспечивающее явление обратимости, — это сохранение информации. Если информация, описывающая состояние мира, с течением времени не пропадает, то мы всегда можем прокрутить часы назад и восстановить любое из предыдущих состояний. И вот тогда на поверхность всплывает настоящая загадка стрелы времени.

Шахматный мир

Давайте сыграем в игру. Она называется «шахматный мир», и правила очень просты. Вам показывают массив квадратиков — шахматную доску, на которой часть квадратиков белые, а часть — серые. Если говорить на компьютерном языке, то каждый квадратик — это «бит», и мы можем пометить белые квадратики нулем, а серые единицей. Шахматная доска бескрайняя и простирается во все стороны до бесконечности, но в каждый момент времени мы можем видеть лишь ее часть.

Смысл игры в том, чтобы *разгадать шаблон*. Видя перед собой некий массив квадратиков, вы должны выделить закономерности и описать шаблон, или правила расстановки белых и серых квадратиков. После этого для проверки вам покажут другие части доски, и вы сможете сравнить свои предположения с фактическим расположением клеток. Последний шаг на языке игры называется «проверкой гипотезы».

Разумеется, у этой игры есть и другое название: «наука». Мы всего лишь описали, что делают настоящие ученые для понимания природы, — только в сильно идеализированном контексте. В случае физики хорошая теория включает три ингредиента: характеристики объектов, из которых сделана Вселенная,



А

Рис. 7.2. Пример мира «шахматной доски» с простым шаблоном заливки вертикальных столбцов

место действия, по которому распределены эти объекты, и *правила*, которым подчиняется поведение объектов. К примеру, в качестве объектов могут выступать элементарные частицы или поля, местом действия можно считать четырехмерное пространство—время, а правилами — законы физики. Мир шахматной доски именно такой: в качестве объектов выступают биты (нули и единицы, белые и серые квадратики), местом действия является сама шахматная доска, а правила — законы природы в этом игрушечном мире — это шаблоны, которые мы распознаем исходя из поведения квадратиков. Играя в эту игру, мы ставим себя на место воображаемых физиков, живущих в одном из подобных шахматных миров. Они проводят время, пытаются разгадать закономерности в композициях квадратиков и сформулировать глобальные законы природы.⁶

На рис. 7.2 изображен простейший пример игры, который мы будем называть «шахматная доска А». Очевидно, что какой-то шаблон здесь присутствует: квадратики раскрашены по определенной схеме. Можно сказать, что «если взять любой произвольный столбец, то все квадратики в нем будут находиться в одном и том же состоянии». Однако мы должны быть осторожны и убедиться в том, что здесь случайно не затесались никакие *другие* шаблоны, ведь если кто-то найдет больше шаблонов, чем мы, то мы проиграем, а нашим соперникам достанется Нобелевская премия шахматного мира. Создается



Рис. 7.3. Физические законы можно представлять себе как машину, которая исходя из текущего состояния мира дает предсказание, каким мир станет мгновением позже

впечатление, что на шахматной доске *A* нет никаких других очевидных шаблонов; мы пробежались глазами вдоль всей строки, но никаких идей, позволяющих дополнительно упростить описание этого шахматного мира, не возникло. Значит, мы закончили.

Каким бы простым этот пример ни казался, у шахматной доски *A* много общего с реальным миром. Например, обратите внимание на то, что в найденном нами шаблоне различаются «время» (направление вверх по столбцам) и «пространство» (горизонтальное направление вдоль строк). Различие между ними состоит в том, что в строке может произойти все что угодно; насколько мы можем судить, наличие информации о состоянии одного конкретного квадрата не позволяет сделать никаких выводов о состоянии соседних. Аналогичным образом, в реальном мире мы также можем стартовать с любой произвольной конфигурации вещества в пространстве и предсказать, что с этой конфигурацией будет происходить с течением времени, руководствуясь «законами физики». Если у нас на коленях сидит кошка, то мы можем быть уверены, что и мгновение спустя она будет где-то неподалеку. Тем не менее наличие информации о присутствии рядом кошки не позволяет получить никакого представления о том, что еще есть в той комнате, где мы находимся.

Предположим, мы решили с нуля построить новую Вселенную. Кто сказал, что в нашем творении между временем и пространством *обязательно* должно существовать различие такого рода? Вполне возможно вообразить такой мир, в котором вещи от момента к моменту будут меняться настолько же резко и непредсказуемо, как от места к месту. Однако в той Вселенной, где живем мы с вами, данное различие действительно существует. Понятие времени, с ходом которого вещи во Вселенной эволюционируют, не является логически неотъемлемой частью мира; это всего лишь идея, которая внезапно оказывается весьма удобной для размышлений о реальности, в которой мы живем.

Мы описали правило, действующее на шахматной доске *A*, так: «если взять любой произвольный столбец, то все квадратики в нем будут находиться в одном и том же состоянии». Это глобальное описание, распространяющееся

сразу же на весь столбец. Мы могли бы перефразировать его, сделав более локальным, чтобы можно было взять любую строку («момент во времени») и с помощью правила восстановить все остальные строки сверху или снизу. Например, таким способом: «если мы знаем состояние любого конкретного квадратика, то мы также знаем, что квадратик прямо над ним находится точно в таком же состоянии». Другими словами, мы описали шаблон в терминах *развития с течением времени* и теперь можем, начиная с какого-то конкретного состояния в какой-то конкретный момент времени, продвигаться вперед (или назад), восстанавливая состояние одной строки за раз. Это традиционный способ применения законов физики к реальному миру, как показано на рис. 7.3. Расскажите о состоянии всего мира (скажем, о положении и скорости каждой частицы во Вселенной) в определенный момент времени, и законы физики услужливо сообщат, каким мир станет мгновение спустя.⁷ Повторяя процесс, можно построить полную картину будущего. А как насчет прошлого?

Ставя время с ног на голову

Для мира, существующего только в нашем воображении, шахматная доска уж слишком однообразна и ограничена. Невозможно представить, чтобы эти маленькие квадратики могли закатить вечеринку или написать эпическую поэму. Тем не менее если бы на шахматных досках жили физики, то они нашли бы, что обсудить после формулировки законов временной эволюции.

Физика шахматной доски *A* обладает определенной степенью симметрии, например *инвариантностью относительно сдвига по времени*. Это означает, что законы физики не меняются во времени от момента к моменту. Мы можем сместить точку наблюдения вперед или назад во времени (вверх или вниз по столбцам), но правило «квадратик прямо над текущим находится точно в таком же состоянии» продолжит выполняться.⁸ Симметрии так и работают: вы что-то делаете, но это ничего не меняет — правила продолжают действовать, как и раньше. Мы уже говорили о том, что реальный мир также инвариантен относительно сдвига по времени: с течением времени законы физики не меняются.

Кроме того, на шахматной доске *A* можно заметить еще один вид симметрии — *инвариантность относительно обращения времени*. Смысл такого вида симметрии очевиден: мы заставляем время идти в обратную сторону и наблюдаем за происходящим. Если результат «выглядит точно так же» — то есть создается впечатление, что «перевернутая» система подчиняется тем же законам физики, что и первоначальная расстановка, — то мы говорим, что дей-

ствующие в системе правила инвариантны относительно обращения времени. Для того чтобы проверить это на шахматной доске, нужно зеркально отразить ее, выбрав осью симметрии какую-нибудь строку. При условии, что действующие на шахматной доске правила также инвариантны относительно сдвига по времени, совершенно неважно, какую строку мы выберем, так как они все равны. Если правила, с помощью которых мы описывали исходную расстановку, так же действуют в новом шаблоне, то можно утверждать, что шахматная доска инвариантна относительно обращения времени. Очевидно, что образец *A*, в котором каждый столбец содержит квадратики только одного цвета, обладает данным типом инвариантности: отраженный шаблон не только подчиняется тем же правилам, он еще и стопроцентно совпадает с исходным.

Для того чтобы лучше прочувствовать идею, давайте рассмотрим более интересный пример. На рис. 7.4 показан еще один мир шахматной доски, обозначенный *B*. Теперь мы видим два разных шаблона размещения серых квадратиков: диагональные линии, идущие в обоих направлениях (получившийся рисунок немного напоминает световые конусы, не правда ли?). И снова мы можем описать получившуюся схему размещения серых и белых квадратиков в терминах развития от одного момента времени к следующему. Нужно только не забывать о том, что в каждой конкретной строке нам недостаточно отслеживать цвет одного-единственного квадратика. Мы обязаны следить за тем, какие типы диагональных линий из серых квадратиков проходят через эту точку (и проходят ли вообще). Каждую клетку можно пометить одним из четырех состояний: «белая», «диагональная линия серых квадратиков проходит вверх и вправо», «диагональная линия серых квадратиков проходит вверх и влево», «диагональная линия серых квадратиков проходит в обе стороны». Если мы опишем любую произвольную строку всего лишь как последовательность нулей и единиц, этого будет недостаточно, чтобы понять, как будет выглядеть следующая строка.⁹ Все выглядит так, будто мы обнаружили в рассматриваемой Вселенной два типа «частиц»: одни движутся всегда только налево, а другие — только направо, причем частицы разных типов никак не взаимодействуют между собой и не влияют друг на друга.

Что произойдет с шахматной доской *B*, если мы поменяем направление времени на обратное? Суть этого шахматного мира останется прежней, однако фактическое расположение белых и серых квадратиков, разумеется, изменится (в отличие от шахматной доски *A*, где вне зависимости от направления времени мы получали один и тот же набор белых и серых клеток). На второй панели рис. 7.4, обозначенной *B'*, показан результат зеркального отражения относительно одной из строк шахматной доски *B*. В частности, диагональные

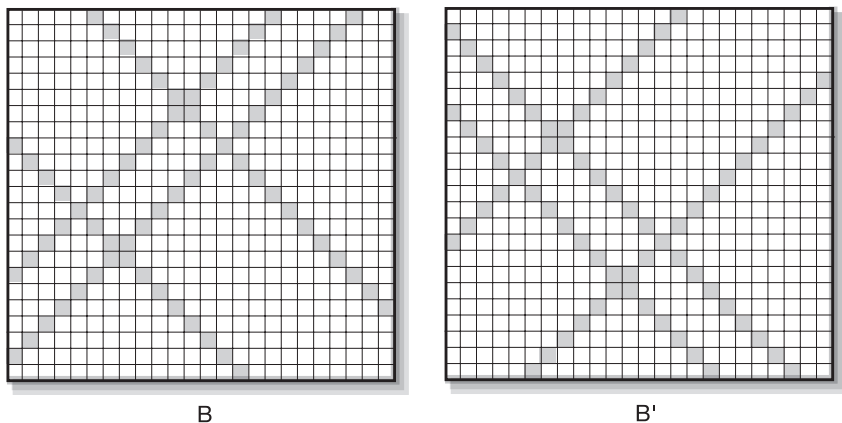


Рис. 7.4. Шахматная доска B (слева) характеризуется чуть более сложной динамикой, чем шахматная доска A : в этом примере диагональные линии, состоящие из серых квадратиков, следуют в обоих направлениях. Шахматная доска B' (справа) иллюстрирует результат обращения времени на доске B относительно центральной строки

линии, проходившие из левого нижнего угла в правый верхний, теперь протянулись из левого верхнего в правый нижний, и наоборот.

Инвариантен ли мир шахматной доски из примера B относительно обращения времени? Определенно, это так. Пусть изменение направления времени относительно произвольно выбранной строки и меняет индивидуальное распределение белых и серых клеток — это не важно. Важно то, что неизменными остаются «законы физики», то есть правила, которым подчиняются схемы закрашивания квадратиков. В исходном примере B , до изменения направления времени, правила гласили, что существуют два типа диагональных линий, содержащих серые клетки. То же самое верно и для B' . И пусть два типа линий обмениваются личинами; это не отменяет того факта, что как в состоянии «до», так и в состоянии «после» мы наблюдаем одни и те же два типа линий. Таким образом, воображаемые физики из мира шахматной доски B объявили бы, что законы природы инвариантны относительно изменения направления времени.

В Зазеркалье

Ну что, рассмотрим еще один мир шахматной доски? Теперь это будет шахматная доска C , показанная на рис. 7.5. И снова действующие в этом мире правила кажутся довольно простыми: мы видим только диагональные линии,

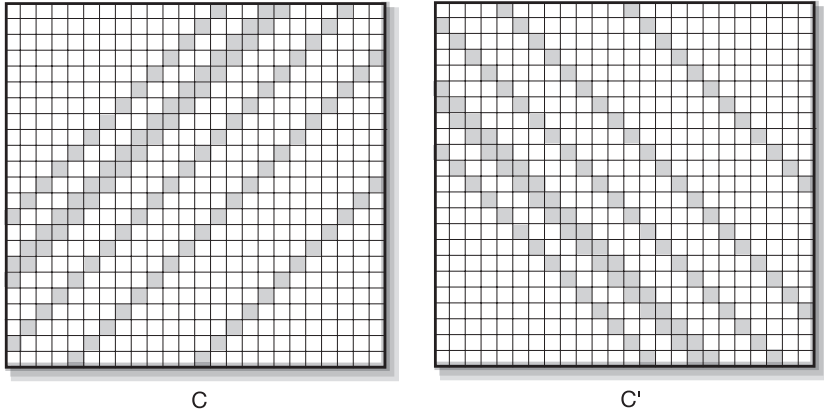


Рис. 7.5. В шахматном мире C присутствуют только диагональные линии серых квадратиков, идущие из левого нижнего угла в правый верхний. Если изменить направление времени на противоположное, то мы получим картинку C' , на которой нет ничего, кроме диагональных линий из правого нижнего угла в левый верхний. Строго говоря, шахматная доска C не инвариантна относительно изменения направления времени — она инвариантна относительно одновременного отражения в пространстве и во времени

протянувшиеся из левого нижнего угла в правый верхний. Попробуем сформулировать правило «предсказания будущего» в терминах пошагового развития: «если мы знаем состояние любого конкретного квадратика, то мы также знаем, что квадратик на один шаг выше и правее него находится в том же самом состоянии». Определенно, данное правило инвариантно относительно переноса во времени, так как результат его применения абсолютно не зависит от того, с какой строки мы начнем.

Если изменить направление времени на шахматной доске C на противоположное, то мы получим конфигурацию, показанную на рис. 7.5 на доске C' . Очевидно, что эта ситуация отличается от ситуации с B и B' . Правила, которым подчиняются клетки на доске C' , отличаются от правил на доске C : вместо диагональных линий, идущих из левого нижнего угла в правый верхний, мы теперь видим линии, идущие в другую сторону. Физики, живущие в мирах C и C' , сказали бы, что наблюдаемые ими законы природы не обладают симметрией относительно обращения времени. Мы безошибочно различаем направления «вперед во времени» и «назад во времени»: «вперед» — это то направление, в котором диагональные линии движутся вправо. Какое направление назначить «будущим» — решать нам, но как только выбор сделан, «прошое» и «будущее» идентифицируются однозначно.

Однако это еще не конец истории. Хотя шахматная доска C , строго говоря, не инвариантна относительно изменения направления времени (в том смысле, как мы его определили), что-то «обратимое» в этом мире все же должно быть. Давайте попробуем понять — что.

Помимо обращения времени, мы также могли бы рассмотреть вариант «обращения» пространства. Для этого нам нужно отразить шахматную доску *по горизонтали* относительно какого-то столбца. В реальном мире мы получаем аналогичный результат, когда смотримся в зеркало, так что обращением пространства в данном случае можно считать обычное зеркальное отражение. В физике это обычно называют преобразованием четности, которое получается при одновременном обращении всех трех пространственных осей, а не одной (как на шахматной доске). Давайте тоже будем использовать этот термин, чтобы у нас была возможность при необходимости сойти за настоящих физиков.

Очевидно, что наша исходная шахматная доска A инвариантна относительно преобразования четности: те правила поведения, которые мы на ней обнаружили, выполняются даже после горизонтального зеркального отражения. В то же время на шахматной доске C мы сталкиваемся с ситуацией, аналогичной той, которую мы получали, когда меняли направление времени на противоположное: четность — это не симметрия. Меняя «лево» на «право», мы превращаем мир с диагоналями «только вверх и вправо» в мир с диагоналями «только вверх и влево».

Тем не менее почему бы нам не взять шахматную доску C и не обратить сразу и время и пространство? В получившемся мире будут действовать те же правила, с которых все началось. При обращении времени первый тип диагоналей превращается во второй, а отражение в пространстве восстанавливает исходную картинку. Все встает на свои места, а этот эксперимент иллюстрирует одну важную особенность изменения направления времени в фундаментальной физике: очень часто бывает так, что определенная физическая теория не инвариантна относительно «наивного инвертирования времени», при котором меняется лишь направление времени и больше ничего. Однако та же самая теория может быть инвариантной относительно некоторого правильно обобщенного преобразования симметрии, которое не ограничивается лишь обращением времени, а включает какие-то дополнительные преобразования. В реальном мире это происходит по весьма изощренному сценарию, который в изложении некоторых авторов учебников по физике становится еще сложнее и запутаннее. Итак, давайте оставим наш дискретный мир шахматных досок и бросим взгляд на настоящую Вселенную.

Адрес состояния системы

В теориях, которые используются физиками для описания реального мира, присутствует общее базовое понятие состояния, которое «развивается с течением времени». Это касается как классической механики, сформулированной Ньютоном, так и общей теории относительности и квантовой механики, и даже квантовой теории поля и стандартной модели в физике элементарных частиц. На любой из наших шахматных досок состоянием является горизонтальная строка квадратиков, каждый из которых окрашен в белый или серый цвет (и, возможно, несет какую-то дополнительную информацию). В зависимости от подхода к физике реального мира определение состояния может меняться. Однако каким бы оно ни было, мы можем задавать одни и те же вопросы об изменении направления времени и других возможных симметриях нашего мира.

«Состояние» физической системы — это «полный набор информации о системе в определенный момент времени, которая достаточна для описания ее дальнейшего развития¹⁰ с учетом законов физики». Если точнее, то данное определение распространяется только на изолированные системы, то есть системы, не подверженные влиянию непредсказуемых внешних сил (в ситуации с предсказуемыми внешними силами мы можем просто-напросто объявить их частью «законов физики», действующих на данную систему). Таким образом, мы можем рассуждать как обо всей Вселенной, которая предполагается изолированной, так и о каком-то космическом корабле, находящемся на достаточном удалении от любых планет или звезд.

Рассмотрим для начала классическую механику — мир сэра Исаака Ньютона.¹¹ Что нам нужно знать, чтобы предсказать будущее системы в ньютоновской механике? Выше я уже упоминал об этом: нам потребуются положения и скорости всех элементов системы. Однако не будем торопиться, а попробуем прийти к этому ответу постепенно, шаг за шагом.

Когда кто-то упоминает ньютоновскую механику, можно не сомневаться — дело закончится игрой в бильярд.¹² Но давайте представим себе новый вариант игры — не тот традиционный бильярд с восемью шарами, а нечто уникальное. Свое гипотетическое развлечение с бильярдными шарами мы назовем бильярдом физиков. В попытке избавиться от излишних усложнений и добраться до сути вещей физики выдумывают игры, в которых нет ни шума, ни трения: идеально круглые сферы катаются по столу и отталкиваются друг от друга, не теряя ни капли энергии. Настоящие бильярдные шары ведут себя совершенно по-другому — каждому столкновению сопутствуют звук удара и рассеяние

определенного количества энергии. Это наглядное проявление работы стрелы времени: шум и трение создают энтропию. Мы же на мгновение отбросим подобные сложности.

Для начала вообразим *один-единственный* бильярдный шар, катающийся по столу (распространить правила игры сразу на несколько шаров будет совсем нетрудно). Мы считаем, что он никогда не теряет энергию и, наталкиваясь на бортик, просто отскакивает. В целях нашей задачи «идеальный отскок» будет частью «физических законов» данной замкнутой системы — бильярдного шара. Так что же можно считать состоянием этого единственного шара?

На первый взгляд кажется, что логично считать состоянием шара в любой момент времени его положение на столе. В конце концов, если сделать фотографию стола, то что мы увидим? Место, где в тот момент находился шар. Однако выше мы определили состояние как полную информацию, требуемую для предсказания движения системы; очевидно, что одного лишь положения нам недостаточно. Если я скажу, что шар находится точно в центре стола (и больше ничего), и попрошу вас предсказать, где он окажется секундой позже, то вы не сможете дать мне точный ответ, ведь вам неизвестно, в какую сторону шар катился.

Разумеется, для предсказания движения шара на основании информации, имеющейся в наличии в конкретный момент времени, нам нужно знать *как положение, так и скорость* объекта. Говоря «состояние шара», мы имеем в виду его положение и скорость и — обратите внимание! — ничего более. Нам неважно, например, с каким ускорением шар катится, какое сейчас время суток, чем шар позавтракал в этот день и что еще происходит в его внутреннем мире.

Для описания движения частиц в классической механике вместо скорости часто используют такое понятие, как импульс. История данного понятия восходит к тысячному году и связана с величайшим персидским философом Ибн Синой (в латинизированном написании Авиценна). Он предложил теорию движения, в которой «влечение» — произведение массы и скорости — остается в отсутствие внешних воздействий постоянным. Импульс сообщает нам, какой энергией обладает объект и в каком направлении он движется.¹³ В ньютоновской механике импульс равен произведению массы на скорость, а в теории относительности формула слегка модифицируется с учетом того, что с приближением скорости объекта к скорости света его импульс возрастает до бесконечности. Если вам известен импульс объекта с фиксированной массой, то вы знаете его скорость, и наоборот. Следовательно, определить состояние любой частицы можно, указав ее положение и импульс.

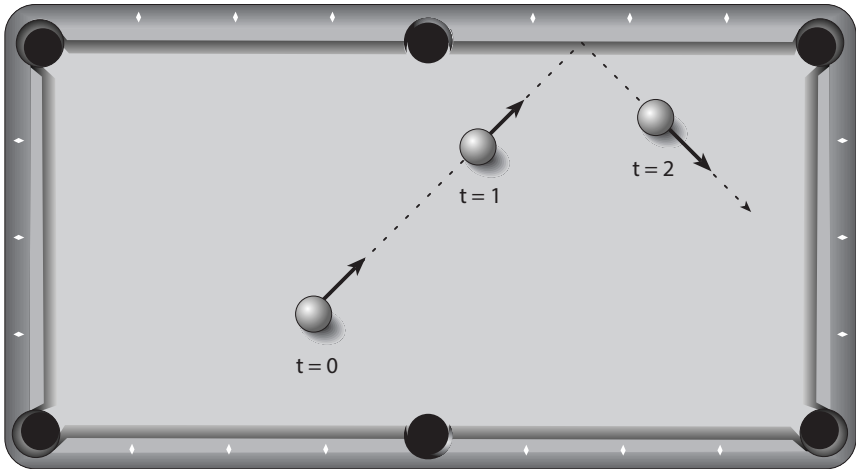


Рис. 7.6. Одинокий бильярдный шар, катающийся по столу без трения. Показаны состояния в три разных момента времени. Стрелочки обозначают импульс шара; он остается постоянным до тех пор, пока шар не отскочит от бортика

Зная положение и импульс бильярдного шара, вы можете полностью предсказать всю траекторию, по которой он будет следовать, катаясь по столу. Пока шар свободно катится, не касаясь стенок, импульс остается постоянным; меняется лишь положение шара вдоль прямой линии, и происходит это с постоянной скоростью. Когда шар врывается в бортик, импульс мгновенно отражается относительно линии бортика, после чего шар продолжает движение с постоянной скоростью, то есть он отскакивает. Я описываю простые вещи сложными словами, но это необходимо.

Вся суть ньютоновской механики в этом и заключается. Если по одному и тому же столу катается много шаров, то полное состояние системы представляет собой всего лишь набор положений и импульсов каждого из них. Скажем, состояние Солнечной системы — это положения и импульсы всех планет, а также Солнца. Или же, если вам хочется большей детальности и реалистичности, — то это положения и импульсы всех частиц, из которых состоят эти объекты. А состояние вашего парня или девушки включает описание положения и импульса каждого атома его или ее тела. Правила классической механики позволяют однозначно предсказать, по какому пути пойдет развитие системы, опираясь лишь на информацию о ее текущем состоянии. После того как вы составили нужный список, дело берет в свои руки демон Лапласа, и исход предопределен. Однако вы не столь умны, как демон Лапласа, и у вас нет

доступа к такому объему информации, поэтому парни и девушки навсегда останутся загадками. Кроме того, они представляют собой открытые системы, так что в любом случае вам потребовалась бы также информация и обо всем остальном мире.

Во многих ситуациях удобно рассуждать обо «всех потенциально возможных состояниях системы», называемых *пространством состояний* системы. Обратите внимание на то, что слово «пространство» употребляется в двух, казалось бы, совершенно разных смыслах. У нас есть пространство — физическая арена, на которой происходит движение реальных объектов во Вселенной, а также абстрактное понятие пространства как математического набора объектов (это почти то же самое, что и «множество», но с возможностью существования некоей дополнительной структуры). Пространство состояний — это пространство, способное принимать разные формы в зависимости от рассматриваемых физических законов.

В ньютоновской механике пространство состояний называется фазовым пространством, хотя причины такого именованя не до конца ясны. Это всего лишь набор всех возможных положений и импульсов всех присутствующих в системе объектов. В мире шахматных досок пространство состояний состоит из всевозможных последовательностей белых и серых квадратиков в одной строке, а также может включать некоторую дополнительную информацию в точках, где пересекаются диагональные линии. Когда мы окунемся в квантовую механику, то столкнемся с пространством состояний, состоящим из всех возможных волновых функций, описывающих квантовую систему; на техническом языке это называется гильбертовым пространством. В любой уважающей себя физической теории присутствует пространство состояний и правила, описывающие эволюцию конкретных состояний с течением времени.

У пространства состояний может быть громадное количество измерений, даже если обычное пространство всего лишь трехмерное. В этом контексте под измерением понимается «число, необходимое для фиксации точки в пространстве». В пространстве состояний есть по одному измерению для каждой компоненты положения и по одному измерению для каждой компоненты импульса для *каждой частицы* в системе. Если мы говорим о бильярдном шаре, катающемся по плоскому двумерному столу, то нам требуется два числа для описания его положения (так как сам стол двумерный) и два числа для описания его импульса (величины и направления). Таким образом, пространство состояний одного бильярдного шара, привязанного к двумерному столу, четырехмерное: два числа для положения, два для импульса.

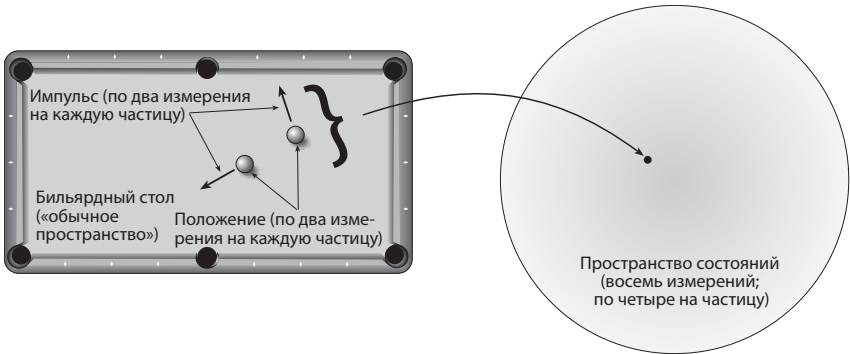


Рис. 7.7. Два шара на бильярдном столе и соответствующее пространство состояний. Для обозначения положения каждого шара на столе требуется два числа, и еще два числа описывают его импульс. Полное состояние двух частиц представляет собой точку в восьмерном пространстве (справа). Мы не можем нарисовать восемь измерений, так что постарайтесь вообразить, что они там действительно присутствуют. Каждый дополнительный шар добавляет к пространству состояний четыре измерения

Если бы на столе было девять шаров, то нам потребовалось бы по два числа на положение каждого шара и по два на их импульсы — итого тридцать шесть измерений фазового пространства. Число измерений, требующихся для описания импульса и положения, всегда совпадает, так как в реальном пространстве вдоль каждой из осей пространства направлено по одной компоненте импульса. Если рассмотреть случай бейсбольного мяча, летящего в воздухе, что эквивалентно задаче об одной частице, свободно движущейся в трехмерном пространстве, то пространство состояний для него будет шестимерным. Для 1000 частиц оно будет 6000-мерным.

В реалистичных задачах пространство состояний чрезвычайно велико. Настоящий бильярдный шар состоит примерно из 1025 атомов, а пространство состояний представляет собой список положений и импульсов каждого из них. Вместо того чтобы рассматривать эволюцию всех этих атомов, движущихся сквозь трехмерное пространство со своими импульсами, мы можем с равным успехом говорить о движении всей системы целиком как об одной точке (состоянии), движущейся сквозь пространство состояний с громадным количеством измерений. Это кардинальный способ перепаковки огромного объема информации в другую форму; несколько не упрощая описание (мы всего лишь подменили огромное количество частиц огромным количеством измерений), он позволяет взглянуть на вещи с новой точки зрения.

Ньютоновская механика инвариантна относительно выбора направления времени. Если вы снимете фильм о том, как наш одинокий бильярдный шар катается по зеленому фетру и отскакивает от бортиков стола, то ни один зритель не сможет сказать, смотрит он эту пленку в прямом или в обратном воспроизведении. В обоих случаях на экране происходит одно и то же: шар катится по прямой линии с постоянной скоростью до тех пор, пока не врежется в бортик и не отскочит от него.

Однако это далеко не конец истории. В нашем шахматном мире мы определили инвариантность относительно обращения времени как идею о том, что последовательность состояний системы можно отразить во времени, и результат все так же будет подчиняться сформулированным для этого мира законам физики. На шахматной доске состоянием является строка белых и серых квадратов; для бильярдного шара это точка в пространстве состояний, задающая положение и импульс шара.

Взгляните на первую часть траектории шара на рис. 7.6. Шар равномерно и прямолинейно катится вверх и вправо, величина его импульса остается постоянной, и направлен импульс также вверх и вправо. Если зеркально отразить происходящее во времени, то мы получим последовательность положений шара, движущегося из верхней правой области стола в нижнюю левую, а также набор одинаковых импульсов, указывающих *вверх и вправо*. Но это какое-то безумие. Если шар катится вдоль траектории с обратным направлением времени — сверху и справа вниз и влево, то и направление его импульса должно совпадать с направлением скорости. Очевидно, что самый простой рецепт — взять исходный набор состояний, упорядоченный во времени, и воспроизвести его в неизменном виде в обратную сторону — не работает. Получившаяся траектория *не отвечает* законам физики. (Совершенно очевидно, что импульс никак не может быть направлен в сторону, противоположную направлению скорости, ведь он равен произведению скорости и массы!¹⁴)

Эта дилемма хоть и кажется неразрешимой, в действительности довольно проста. В классической механике мы можем *определить* операцию обращения времени не просто как воспроизведение исходного набора состояний в обратную сторону, но как составную операцию, включающую *изменение направления импульсов на противоположное*. И тогда действительно классическая механика окажется идеально инвариантной относительно обращения времени. Если вы предоставите мне описание эволюции системы с течением времени, включающее положения и импульсы каждой ее части в каждый момент времени, то я смогу развернуть эти импульсы в обратную сторону, воспроизвести

последовательность в обратном порядке и получить новую траекторию, которая также будет представлять собой правильное решение ньютоновских уравнений движения.

Это более или менее отвечает здравому смыслу. Возьмем планету, вращающуюся вокруг Солнца. Предположим, что вам стало интересно, как этот процесс будет выглядеть в «обратной перемотке», — вы мысленно меняете направление течения времени, и теперь планета движется по той же орбите, но в обратную сторону. Наблюдая эту картину в течение какого-то времени, вы приходите к выводу, что все выглядит вполне достоверно. Это происходит потому, что ваш мозг автоматически меняет направление импульса на противоположное, — вам даже не приходится задумываться об этом, в вашем воображении планета совершенно естественным образом движется в обратную сторону. Мы не придаем этому большого значения, потому что не можем *увидеть* импульс так же, как видим положение. Тем не менее это такая же важная часть состояния любой системы, как и положение входящих в нее частиц.

Следовательно, нельзя говорить, что ньютоновская механика инвариантна относительно самого тривиального определения обращения времени: взять упорядоченную по времени допустимую последовательность состояний, поменять порядок их следования на обратный и посмотреть, будет ли новая последовательность отвечать действующим законам физики. При этом никого это особо не волнует. Мы просто даем более усовершенствованное определение: в этой упорядоченной во времени допустимой последовательности состояний нужно преобразовать каждое индивидуальное состояние некоторым простым, но конкретным способом и только после этого менять порядок следования состояний на обратный. Под «преобразованием» мы понимаем всего лишь изменение каждого состояния согласно заранее согласованному правилу; в случае ньютоновской механики требуемой трансформацией будет «изменение направления импульса на обратное». Если мы найдем достаточно простой способ преобразования отдельных состояний, обеспечивающий соблюдение законов физики даже после обращения времени, то сможем с гордостью объявить, что эти законы инварианты относительно изменения направления времени.

Это заставляет вспомнить (по крайней мере должно заставлять, если мой план удался) диагональные линии с шахматной доски S . Там мы обнаружили, что показанный на панели S' результат простого зеркального отражения упорядоченной по времени последовательности состояний не отвечает правилам исходного шаблона. Следовательно, шахматная доска S не допускает тривиального обращения времени. При этом если сначала отразить шахматную доску

по горизонтали и только после этого поменять направление времени, то результат будет удовлетворять первоначальным правилам. Таким образом, в этом мире существует хорошо определенная процедура преобразования индивидуальных состояний (строк, состоящих из квадратиков), показывающая, что шахматная доска С инвариантна относительно обращения времени, но в более изощренном смысле.

Понятие об обращении времени, включающее преобразование состояний в дополнение к непосредственному изменению направления времени, может вызывать сомнения, но физики постоянно занимаются чем-то подобным. Например, в теории электричества и магнетизма при обращении времени электрическое поле остается неизменным, а направление магнитного поля меняется. Это всего лишь часть требуемого преобразования; прежде чем пускать время в обратную сторону, изменениям должны быть подвергнуты как магнитное поле, так и импульс.¹⁵

Урок, который мы должны извлечь из всего этого, заключается в следующем. Фраза «данная теория инвариантна относительно обращения времени» не означает «можно только лишь поменять направление времени, и теория как работала, так и продолжит работать». На самом деле все немного сложнее: нужно каким-то простым способом преобразовать состояние в каждый момент времени, а потом уже менять направление времени, и тогда теория продолжит работать, как раньше. Очевидно, что выражения типа «каким-то простым способом» в определениях фундаментальных физических понятий несколько подрывают их авторитет. Кто вправе судить, что можно считать достаточно «простым», а что нет?

В действительности это не так уж важно. Если существует какое-то преобразование, которое можно применить к состоянию некоей системы в каждый момент времени так, чтобы движение «назад во времени» подчинялось исходным физическим законам, вы можете смело объявлять это инвариантностью относительно изменения направления времени. Или другим видом симметрии, связанным с обращением времени, но не в точности равным ему. Название не играет роли; важно лишь понимание всевозможных симметрий и того, соблюдаются они рассматриваемыми законами или нет. В стандартной модели физики элементарных частиц действительно существует преобразование состояний, после которого они могут быть «прокручены назад во времени» так, чтобы исходные уравнения движения по-прежнему соблюдались. Но физики предпочитают не называть это «инвариантностью относительно изменения направления времени». Давайте посмотрим, как это работает.

Запуск частиц в обратном направлении

Элементарные частицы не слишком-то хорошо соблюдают постулаты классической механики: они живут по правилам квантовой механики. Тем не менее основополагающий принцип остается неизменным: существуют такие преобразования, что после изменения направления времени на обратное и применения этих трансформаций мы все так же получаем верное решение в исходной теории. Часто можно услышать, что элементарные частицы не инвариантны относительно отражения времени, и периодически высказываются даже не слишком тонкие намеки на то, что это связано со стрелой времени. Но это ложный след. Поведение элементарных частиц в условиях «обратного» времени никакого отношения к стреле времени не имеет, что, однако, вовсе не делает ее менее интересным объектом для исследований.

Давайте попробуем вообразить эксперимент, позволяющий понять, действительно ли физика элементарных частиц инвариантна относительно обращения времени. Для этого нам нужно взять какой-либо процесс, включающий элементарные частицы, и прокрутить его в обратном направлении. Например, две частицы могут взаимодействовать друг с другом с образованием других частиц (как в ускорителе), или же одна частица может распасться на несколько других. Если продолжительность «прямого» процесса будет отличаться от продолжительности «обратного», это станет доказательством отсутствия инвариантности.

Атомные ядра состоят из нейтронов и протонов, которые в свою очередь состоят из кварков. Нейтроны остаются стабильными только в окружении протонов и других нейтронов, образующих ядро, а оказавшись в одиночестве, они распадаются в течение нескольких минут (будучи частицами с тонкой душевной организацией, они не могут жить без внимания окружающих). Нейтрон распадается на комбинацию из протона, электрона и нейтрино (очень легкая нейтральная частица).¹⁶ С теоретической точки зрения нет ничего сложного в том, чтобы сконструировать обратный процесс: нужно всего лишь выстрелить протоном, электроном и нейтрино в одну точку на правильной скорости и дожидаться результата. Проблема, однако, состоит в том, что даже если подобное взаимодействие и позволило бы получить какие-нибудь новые интересные знания об обращении времени, реализовать это на практике невозможно. Никому не под силу поместить протон, электрон и нейтрино в такие положения и заставить вести себя так, чтобы полностью воспроизвести картину распада нейтрона в обратном направлении.



Рис. 7.8. Нейтральный каон и нейтральный антикаон. Поскольку оба обладают нулевым электрическим зарядом и суммарное кварковое число в них также равно нулю, каон и антикаон могут осциллировать друг в друга, оставаясь при этом разными частицами

Однако не всегда все так печально. В физике элементарных частиц встречаются специфические случаи, когда одиночная частица «распадается» в другую одиночную частицу, которая затем также может «распасться» обратно в исходную. В действительности это, конечно, нельзя называть распадом, поскольку в процесс вовлечена только одна частица. Такие процессы называются *осцилляциями*. Очевидно, что осцилляции могут происходить только в весьма специфических обстоятельствах. Например, протон не может осциллировать в нейтрон: их электрические заряды отличаются. Две частицы могут осциллировать друг в друга только в том случае, если они обладают одинаковым электрическим зарядом, одинаковым числом кварков и одинаковой массой, так как при осцилляции не может исчезать или увеличиваться энергия. Обратите внимание на то, что кварк и антикварк — это не одно и то же, и, следовательно, нейтроны не будут осциллировать в антинейтроны. В сущности, нас интересуют две практически одинаковые частицы, различия между которыми минимальны.

Природа предоставляет нам идеального кандидата для таких осцилляций: *нейтральный каон*. Каон относится к типу мезонов, и это означает, что он состоит из одного кварка и одного антикварка. Если мы хотим, чтобы частица состояла из кварков разных типов с нулевым суммарным зарядом, то проще всего сделать ее из одного нижнего (d)-кварка и одного странного (s) антикварка, или наоборот.¹⁷ Систему из нижнего кварка и странного антикварка принято называть «нейтральным каоном», а систему из странного кварка

и нижнего антикварка — «нейтральным антикаоном». Массы этих частиц абсолютно одинаковы и составляют около половины массы протона или нейтрона. Вполне естественно ожидать, что между каонами и антикаонами возникают осцилляции, и действительно: изучение осцилляций именно этих частиц стало уже чем-то вроде промышленной отрасли в экспериментальной физике элементарных частиц. (Существуют также каоны, обладающие электрическим зарядом. Такой каон состоит из верхнего (u) кварка и странного кварка и для наших целей совершенно бесполезен. Даже если в дальнейшем обсуждении для простоты формулировок мы будем опускать слово «нейтральный», говорить мы все же будем именно о нейтральных каонах.)

Итак, нам нужно сделать несколько каонов и антикаонов, чтобы понаблюдать, как они будут осциллировать друг в друга. Если инвариантность относительно отражения времени отсутствует, то в одну сторону процесс будет идти дольше, чем в другую; в результате в нашем наборе частиц будет в среднем немного больше каонов, чем антикаонов (или наоборот). К сожалению, на самих частицах мы не найдем маленьких меточек, сообщающих, с каким типом каонов мы имеем дело. Зато в конечном счете они полностью распадутся и образуют совершенно новые частицы: каон распадается на пион с отрицательным зарядом, антиэлектрон и нейтрино, а антикаон — на пион с положительным зарядом, электрон и антинейтрино. Если оценить, насколько часто один тип распада происходит по сравнению с другим, то можно понять, в какой форме первоначальные частицы пребывали дольше — в форме каона или антикаона.

Несмотря на то что теоретические предсказания были получены уже достаточно давно, соответствующий эксперимент CPLEAR провели в лаборатории CERN в Женеве (Швейцария) лишь в 1998 году.¹⁸ Ученые обнаружили, что создаваемый ими пучок частиц, совершающий осцилляции между каонами и антикаонами, немного чаще (примерно на две трети процента) распался как каон, чем как антикаон, то есть частицы в осциллирующем пучке чуть дольше пребывали в состоянии каонов, чем антикаонов. Другими словами, процесс превращения каона в антикаон занимал немного больше времени, чем обратный процесс перехода антикаона в каон. Таким образом, в реальном мире направление времени в физике элементарных частиц не симметрично.

По крайней мере, это справедливо для «бесхитростного» обращения времени, как мы определили его выше. Можно ли в мире элементарных частиц использовать какие-либо дополнительные преобразования, чтобы в результате добиться инвариантности относительно обращения времени? Ответ положительный, и сейчас мы обсудим это подробнее.

Три отражения природы

Если пристальнее всмотреться в принципы работы физики элементарных частиц, то выяснится, что существует три типа возможных симметрий, включающих «обращение» физического свойства, и каждое из них обозначено своей заглавной буквой. Инверсия времени T меняет местами прошлое и будущее. Четность P обозначает замену «право» на «лево», и наоборот. Мы уже обсуждали четность в контексте миров шахматных досок, но это понятие точно так же распространяется и на реальный трехмерный мир. Наконец, существует «зарядовое сопряжение» C — на самом деле это просто модное название для процесса замены частиц на античастицы. Преобразования C , P и T обладают одним общим свойством: если повторить любое из них два раза подряд, то вы вернетесь к исходному состоянию.

В принципе, можно представить себе набор физических законов, инвариантный относительно каждого из перечисленных преобразований в отдельности, и на первый взгляд кажется, что так и обстоит дело в нашем мире (главное, не копать слишком глубоко, например, изучая распад нейтральных каонов). Если создать атом антиводорода из антипротона и антиэлектрона, то он будет обладать почти такими же свойствами, как и обычный атом водорода, за исключением того, что при соприкосновении с атомом обычного водорода эти элементы проаннигилируют, оставив после себя лишь излучение. Таким образом, преобразование C создает впечатление симметрии нашего мира, так же как P и T .

В результате, когда в 1950-х годах американские физики китайского происхождения Чжэндао Ли, Чжэньнин Янг и Цзяньсюн Ву показали, что одно из преобразований — четность — не является симметрией природы, для многих это стало огромным сюрпризом. Мысль о возможном нарушении инвариантности относительно четности витала в воздухе уже довольно давно. Об этом говорили разные люди, но всерьез такую возможность никто не рассматривал. В физике авторство открытия приписывается не тому, кто случайно высказывает предположение, а тому, кто подходит к этому предположению с достаточно основательных позиций, чтобы взять его в работу и превратить в солидную теорию или убедительный эксперимент. В случае нарушения принципа четности именно Ли и Янг сели и выполнили тщательный анализ проблемы. Они поняли, что существует множество экспериментальных доказательств того, что электромагнетизм и сильное взаимодействие инвариантны относительно P , однако что касается слабого взаимодействия, вопрос оставался открытым.

Ли и Янг предложили несколько путей поиска доказательств нарушения четности при слабом взаимодействии. В конце концов они убедили Ву — физика-экспериментатора, специализирующуюся на слабых взаимодействиях, и коллегу Ли по Колумбийскому университету, что на этот проект стоит потратить время и силы. Ву пригласила физиков из Национального бюро стандартов США присоединиться к ней для проведения эксперимента над атомами кобальта-60 в магнитных полях при очень низких температурах.

В ходе подготовки к эксперименту Ву убедилась в том, что этот проект имеет фундаментальную значимость. Позднее в своих воспоминаниях она живо описывала свои ощущения от участия в важнейшем событии научного мира:

После визита профессора Ли я глубоко задумалась. Для физика, изучающего бета-распад, это было великолепной возможностью провести решающий эксперимент, и, конечно же, я не могла ее упустить. Той весной мы с моим мужем Чиа-Лью Юань планировали посетить конференцию в Женеве, а затем отправиться на Дальний Восток. Мы оба покинули Китай в 1936 году, ровно двадцать лет назад. Билеты на рейс Королевы Елизаветы были уже забронированы, но внезапно я осознала, что обязана провести эксперимент немедленно, до того как его значимость станет очевидной физическому сообществу и кто-нибудь меня опередит. Поэтому я попросила Чиа-Лью позволить мне остаться и отправиться в поездку без меня.

Сразу же по завершении весеннего семестра, в конце мая, я начала с энтузиазмом готовиться к эксперименту. В середине сентября я наконец-то поехала в Вашингтон на первую встречу с доктором Аблером... В перерывах между экспериментами в Вашингтоне мне приходилось то и дело возвращаться в Колумбийский университет — я продолжала преподавать, а также должна была заниматься исследованиями. В канун Рождества я добралась до Нью-Йорка на последнем поезде; аэропорт был закрыт из-за сильных снегопадов. Там я рассказала профессору Ли о замеченной асимметрии — она не только была огромной, но и оказалась воспроизводимой. Параметр асимметрии составлял почти -1 . Профессор Ли отметил, что это замечательный результат. Именно тот результат, которого следовало ожидать для двухкомпонентной теории нейтрино.¹⁹

Супруг и возвращение в дом детства подождут — наука зовет! В 1957 году Ли и Янгу была присуждена Нобелевская премия; в число награждаемых надо было включить и Ву, однако этого не произошло.

Вскоре после того, как выяснилось, что слабое взаимодействие нарушает четность, ученые заметили, что эксперименты вроде бы подтверждают инвариантность относительно комбинации преобразований — когда к четности добавляется зарядовое сопряжение C , заменяющее частицы античастицами.

Более того, что-то подобное предсказывали теоретические модели, популярные в то время. Таким образом, люди, которых неприятно поразило открытие асимметрии четности в реальном мире, нашли некоторое утешение в мысли о том, что комбинация C и P является хорошей симметрией.

Тем не менее это было ошибкой. В 1964 году Джеймс Кронин и Вал Фитч совместно провели исследование, объектом которого выступил наш старый друг нейтральный каон. Они обнаружили, что четность нарушается не только при распаде каона, но и при распаде антикаона, только во втором случае это происходит несколько иным образом. Другими словами, комбинация преобразований C и P не является симметрией природы.²⁰ Нобелевскую премию Кронину и Фитчу присудили в 1980 году.

Долго ли, коротко ли, но обнаружилось, что природа нарушает не только все потенциальные симметрии — C , P и T , но и комбинацию любых двух преобразований. Очевидным следующим шагом стала проверка комбинации всех трех: CPT . Если взять какой-либо процесс природы, заменить все частицы античастицами, поменять местами лево и право и изменить направление времени на обратное, то будет ли получившийся процесс подчиняться законам физики? С учетом того, что нам уже известно про комбинации двух преобразований, логично ожидать, что и комбинация CPT также не будет инвариантной.

Однако и здесь мы ошибаемся! (Хорошо, что и задаем вопросы, и отвечаем на них мы сами.) Пока что все проведенные эксперименты подтверждают, что преобразование CPT является симметрией реального мира. Более того, сделав некоторые обоснованные предположения про законы физики, можно доказать, что преобразование CPT *обязано* быть симметрией, — это утверждение неудивительным образом называется « CPT -теоремой». Разумеется, даже обоснованные предположения могут оказываться ошибочными, так что ни физики-экспериментаторы, ни теоретики не чураются исследовать возможное нарушение CPT -инвариантности. Но насколько можно судить, эта симметрия пока что не собирается сдавать позиции.

Ранее я говорил, что для того, чтобы получить преобразование, применение которого не нарушает законов природы, может оказаться необходимым «починить» операцию обращения времени. В случае стандартной модели физики элементарных частиц в список преобразований также добавляются зарядовое сопряжение и четность. Большинство физиков полагают, что следует разделять гипотетический мир, в котором C , P и T инвариантны по отдельности, и реальный мир, в котором инвариантностью обладает лишь комбинация CPT . Это позволяет заявлять, что реальный мир не инвариантен относительно изменения

направления времени. Однако необходимо все время помнить, что существует возможность дополнить инверсию времени другими операциями так, чтобы результат отвечал всем требованиям симметрии реального мира.

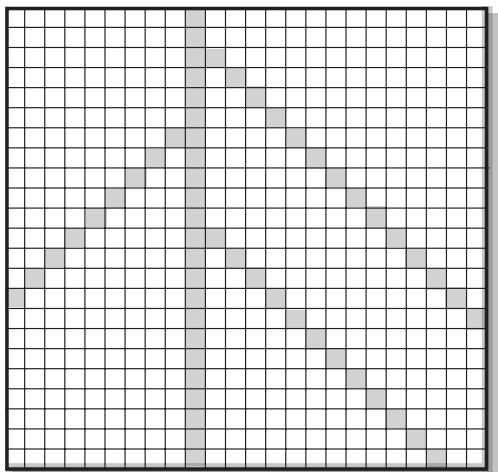
Сохранение информации

Мы убедились, что обращение времени включает в себя не только изменение направления эволюции системы, то есть воспроизведение естественной последовательности состояний в обратную сторону, но также требует применения определенных преобразований к самим состояниям. Это может быть изменение импульса на противоположный, зеркальное отражение строки на шахматной доске или что-то более изысканное, например замена частиц античастицами.

Однако если это так, то можно ли утверждать, что каждый осмысленный набор физических законов инвариантен относительно той или иной формы «усложненного обращения времени»? Всегда ли возможно найти такие преобразования состояний, после применения которых движение «в обратную сторону по времени» все так же будет подчиняться законам физики?

Нет. Возможность определить обращение времени таким образом, чтобы законы физики относительно данной операции оставались инвариантными, зависит от одного критически важного предположения: *предположения о сохранении информации*. Это всего лишь означает, что два разных состояния в прошлом всегда переходят в два разных состояния в будущем — пути их эволюции не могут пересечься в одном и том же состоянии. Если это выполняется, то мы говорим, что «информация сохраняется», так как зная состояние в будущем, можно понять, каким было соответствующее состояние в прошлом. Физические законы, в которых заложена такая особенность, считаются *обратимыми*, и в таком случае можно утверждать, что существуют какие-то (возможно, очень сложные) преобразования, которые можно применять к состояниям таким образом, что инвариантность относительно обращения времени сохранится.²¹

Для того чтобы посмотреть, как это работает на деле, давайте снова вернемся в шахматный мир. Шахматная доска *D*, показанная на рис. 7.9, выглядит довольно просто. Серые квадратик на ней образуют несколько диагональных линий и один вертикальный столбец. Но здесь происходит нечто интересное, что нам еще не доводилось наблюдать в предыдущих примерах: разные линии серых квадратиков «взаимодействуют» друг с другом, а именно создается впечатление, что диагональные линии могут подходить к вертикальному столбцу справа или слева, но в месте соприкосновения с вертикальным столбцом диагональные линии неизменно обрываются.



D

Рис. 7.9. Шахматная доска с необратимой динамикой.
Информация о прошлом не сохраняется в будущем

Казалось бы, правило довольно простое, и его можно считать отличным «набором законов физики». Но между шахматной доской D и предыдущими шахматными мирами существует кардинальное отличие: на этой доске происходящее необратимо. Пространство состояний, как и раньше, представляет собой простое перечисление белых и серых квадратиков вдоль каждой строки (с дополнительной информацией о том, является квадратик частью диагонали, движущейся направо, диагонали, движущейся налево, или вертикального столбца). Имея на руках такую информацию, мы без труда можем предсказать развитие «вперед во времени» — мы точно знаем, как будет выглядеть следующая строка и строка сразу за ней, и так далее.

Однако, зная состояние одной строки, мы не можем прокрутить развитие системы в обратную сторону. Мы сможем продолжить существующие диагональные линии, но с точки зрения прокрутки времени в обратную сторону новые диагонали могут отпочковываться от вертикального столбца в абсолютно случайных точках (соответствующих точкам «столкновения» диагоналей с вертикальным столбцом при развитии вперед во времени). Когда мы говорим, что физический процесс необратим, мы имеем в виду, что невозможно восстановить прошлое состояние, отталкиваясь от знания о текущем состоянии, и эта шахматная доска служит прекрасным примером.

В подобных ситуациях информация теряется. Даже зная о состоянии мира в какой-то момент времени, мы не можем сказать с уверенностью, в каких состояниях он пребывал в прошлом. У нас есть пространство состояний — описания строчек из белых и серых квадратов с дополнительными метками на серых, сообщающими направление движения: вверх и вправо, вверх и влево или строго вверх. Это пространство состояний со временем не меняется: каждая строка остается членом одного и того же пространства состояний и в каждой конкретной строке может наблюдаться любое из допустимых состояний. Необычно в шахматной доске D то, что двум разным строкам может соответствовать одно и то же состояние в будущем. Когда мы оказываемся в этом будущем состоянии, мы уже не можем восстановить информацию о том, какая прошлая конфигурация стала предшественницей этого состояния; воспроизвести последовательность смены состояний в обратную сторону не представляется возможным.



Рис. 7.10. Очевидная потеря информации в стакане воды. Состояние в будущем — «стакан прохладной воды» — может быть следствием любого из двух состояний в прошлом — «стакан прохладной воды» или «стакан теплой воды с кубиком льда»

В реальном мире постоянно происходит *очевидная* потеря информации. Рассмотрим два разных состояния стакана воды. В одном состоянии в стакане находится только прохладная вода; в другом состоянии в стакан налита теплая вода и брошен кубик льда. В будущем эти два состояния могут развиваться в то,

что с нашей точки зрения будет одним и тем же состоянием: стакан прохладной воды.

Мы уже встречались с этим явлением раньше: это стрела времени. По мере того как кубик льда тает в теплой воде, энтропия увеличивается; этот процесс может происходить, но никогда не может быть обращен. Загадка в том, что движение отдельных молекул, составляющих воду, инвариантно относительно обращения времени — в этом нет сомнений. И в то же время макроскопическое описание в терминах льда и жидкости не инвариантно. Для того чтобы понять, как так получается, что обратимые базовые законы порождают макроскопическую необратимость, нам необходимо снова вспомнить Больцмана и его идеи относительно энтропии.

Примечания

- ¹ См. *O'Connor, J. J., Robertson, E. F. Pierre-Simon Laplace*. MacTutor History of Mathematics Archive, 1999. (<http://www-groups.dcs.st-and.ac.uk/~history/Biographies/Laplace.html>); *Rouse Ball, W. W. A Short Account of the History of Mathematics*. Mineola, NY: Dover, 1908; 4-е изд., 2003. Вы должны помнить Лапласа как одного из тех людей, кто начал говорить о черных дырах задолго до появления общей теории относительности.
- ² Очевидно, Наполеон нашел это чрезвычайно забавным. Он передал остроумные слова Лапласа Жозефу Лагранжу, другому выдающемуся физики и математику того времени. Лагранж ответил: «О, но это же превосходная гипотеза; она объясняет так много всего» (*Rouse Ball, W. W. A Short Account of the History of Mathematics*. Mineola, NY: Dover, 1908; издание 4-е, 2003).
- ³ *Лаплас П. С. Опыт философии теории вероятностей*. М., 1908, с.9 (*Laplace, P.-S. A Philosophical Essay on Probabilities* / Trans. by F. W. Tuscott, F. L. Emory; переиздание. New York: Cosimo Classics, 2007).
- ⁴ Не стоит беспокоиться, будто демон Лапласа может жить где-то во Вселенной, самодеvolmente предсказывая каждое наше движение. Как минимум, он должен быть размером со всю Вселенную и обладать такими же вычислительными возможностями, как Вселенная в целом.
- ⁵ *Стоппард Т. Аркадия* / Пер. с англ. // ИЛ. 1996. № 2 (*Stoppard, T. Arcadia*, in *Plays: Five*. London: Faber and Faber, 1999). Валентайн, по всей видимости, имеет в виду, что идея детерминизма подрывается таким явлением, как хаос. Хаотическое движение, которое реально и существует в нашем мире, происходит, когда небольшие возмущения в начальных условиях приводят к огромным изменениям в дальнейшей эволюции. На практике это означает, что предсказание будущего для хаотичных систем (не все системы являются таковыми) превращается в невероятно трудную задачу, так как в понимании текущего состояния системы непременно будут закрадываться ошибки — хотя бы самые ничтожные. Не уверен, что этот довод имеет смысл использовать в спорах относительно демона Лапласа. С практической точки зрения невозможно даже предполагать, что мы когда-либо сможем получить полную информацию о состоянии всей Вселенной, не говоря уже о том,

чтобы научиться предсказывать будущее. Эта концепция всегда была и останется лишь мысленным экспериментом. И перспектива хаотического развития совершенно не меняет картину.

- ⁶ Согласно, мы никогда не встретили бы настоящих физиков на подобной шахматной доске — их появление там невозможно по вполне понятной антропологической причине: условия в постановке задачи слишком просты для зарождения и развития сложных структур, которые мы могли бы назвать разумными наблюдателями. Эта удушающая простота выражается в том числе в отсутствии интересных «взаимодействий» между разными элементами. В тех шахматных мирах, которые мы будем рассматривать, основную роль будут играть простые предметы одного вида (например, вертикальные или диагональные линии), которые не меняются на своем протяжении. Интересный мир — это такой, в котором предметы могут существовать в течение более или менее длительного периода, постепенно меняясь под воздействием других предметов из этого же мира или вследствие взаимодействия с ними.
- ⁷ Сценарий, в котором мы продвигаемся «по одному моменту времени за раз», далек от идеала. Реальный мир (насколько нам известно) не делится на дискретные моменты времени. Время непрерывно, оно плавно течет из одного момента в другой, проходя через все моменты, заключенные между ними. Однако это нам не мешает; у нас есть подходящие математические инструменты, позволяющие продвигаться вперед во времени «шаг за шагом», несмотря на то что само время не дискретно.
- ⁸ Обратите внимание на то, что перенос в пространстве и пространственная инверсия (зеркальное отражение) также являются идеальными симметриями. При взгляде на картинку это кажется неочевидным, но лишь потому, что сами состояния (шаблоны из нулей и единицы) не инвариантны относительно смещений и отражений в пространстве. Чтобы вы не думали, что эти симметрии взяты с потолка, замечу, что некоторые виды симметрии, которые вроде бы и могли существовать в рассматриваемом мире, в действительности отсутствуют. Невозможно, например, поменять ролями время и пространство. В целом чем больше симметрий существует в системе, тем она проще.
- ⁹ Глобальная идея, одной из частных реализаций которой являются миры шахматной доски, носит название *клеточных автоматов*. Клеточный автомат — это дискретная решетка, на которой состояние следующей строки можно определить в соответствии с определенными правилами исходя из состояния предыдущей строки. Клеточные автоматы начал изучать еще в 1940-х годах Джон фон Нейман, математик, одним из достижений которого стала догадка о том, как энтропия должна вести себя в квантовой механике. Множество причин делает клеточные автоматы захватывающей темой для исследований, и большая их часть никак не связана со стрелой времени. Клеточные автоматы — чрезвычайно сложные системы, способные функционировать как универсальные компьютеры. См.: *Poundstone, W. The Recursive Universe: Cosmic Complexity and the Limits of Scientific Knowledge*. New York: W. W. Norton, 1984; *Shalizi, C. R. Notebooks*, 2009. <http://www.cscs.umich.edu/~crshalizi/notebooks/>.

Мы не только проявляем крайнее неуважение к клеточным автоматам, всего лишь используя их для иллюстрации парочки несложных свойств течения времени и сохранения информации, но также отказываемся говорить на традиционном языке знатоков клеточной автоматизации. Как минимум, в этой области направлением течения времени при-

нито считать направление сверху вниз. Но ведь это безумие! Каждый знает, что на диаграммах время увеличивается снизу вверх. Более того, хотя мы и утверждаем, что каждый квадратик может находиться лишь в одном состоянии — «белый» или «серый», мы только что сами признали, что для надежного прогнозирования будущего в примере В необходимо хранить намного больше информации. Однако это не проблема; это означает лишь то, что мы имеем дело с автоматом, где «клетки» могут находиться более чем в двух состояниях. Можно было бы даже выйти за пределы набора из двух цветов и допустить существование клеток четырех разных цветов. Но для наших текущих целей это слишком высокий уровень сложности, и мы не будем его явно вводить.

¹⁰ В случае недетерминистических физических законов — законов, включающих какой-то случайный элемент, — мы называем «предсказанием» будущего развития не набор неизбежных событий, а набор вероятностей. Суть в том, что состояние включает всю информацию, необходимую для того, чтобы описать эволюцию максимально точно, — с учетом действующих законов физики.

¹¹ Некоторые люди выделяют модели теории относительности в отдельный класс, разделяя «классическую механику» и «релятивистскую механику», но так бывает редко. Для многих задач удобно говорить, что теория относительности — это новый вид классической механики, не новый тип мышления. В релятивистской механике мы описываем состояние системы практически так же, как в ньютоновской. В то же время квантовая механика действительно ни на что не похожа. Таким образом, употребляя прилагательное «классическая», мы противопоставляем некоторое понятие чему-то квантовому (если не указано иное).

¹² Неизвестно — по крайней мере я не в курсе, — играл ли в бильярд Ньютон, хотя сама игра, определенно, в то время уже была распространена в Англии. А вот Иммануилу Канту в студенческие годы бильярд (а также карты) даже служил источником карманных денег.

¹³ Таким образом, импульс — это не просто число. Это вектор, изображаемый чаще всего в виде небольшой стрелки. Вектор может определяться величиной (длиной стрелочки) и направлением, а может задаваться в виде суммы подвекторов (компонентов вектора), указывающих в разных направлениях. Например, можно говорить об «импульсе вдоль оси x ».

¹⁴ Это хороший вопрос, над которым я размышлял в течение многих лет. Когда мы изучали классическую механику, периодически возникали ситуации, когда преподаватели начинали беззаботно описывать импульсы, совершенно несовместимые с фактической траекторией системы. В чем же дело? Проблема в том, что когда нас впервые знакомят с понятием «импульс», звучит определение: импульс — это результат умножения массы на скорость. Но время идет, и вот мы уже проникаем в эзотерические сферы классической механики, а то, что раньше было определением, становится следствием, которое несложно вывести из основополагающей теории. Другими словами, мы начинаем воспринимать суть понятия «импульс» как «некоторый вектор (с величиной и направлением), определенный в каждой точке траектории частицы», а затем выводить уравнения движения, из которых следует, что импульс должен быть равен массе, умноженной на скорость (это называется гамильтоновым подходом к динамике). Именно в таком стиле мы рассуждаем сейчас, говоря об изменении направления времени. Импульс — это независимая величина

на, часть состояния системы; он равен произведению массы на скорость только в том случае, если физические законы соблюдаются.

- ¹⁵ Дэвид Альберт (*Albert, D. Z. Time and Chance*. Cambridge, MA: Harvard University Press, 2000) выдвинул совершенно новую теорию на этот счет. Он заявляет, что определять «состояние» следует с указанием лишь положений частиц, но не положений и импульсов (это он называет «динамическим состоянием»). Альберт оправдывает данное определение тем, что состояния должны быть логически независимыми в каждый момент времени, что и происходит. Переформулировав все подобным образом, он получил возможность пользоваться самым тривиальным определением инвариантности относительно обращения времени: «последовательность состояний, воспроизведенная в обратную сторону, все так же подчиняется исходным физическим законам». Это утверждение не включает в себя никакие непонятные преобразования. Однако ему пришлось заплатить за это высокую цену: несмотря на то что, согласно данному определению, ньютоновская механика инвариантна относительно обращения времени, практически ни о какой другой теории, включая классический электромагнетизм, этого не скажешь. И Альберт это признает; он утверждает, что посеянное еще Максвеллом традиционное убеждение об инвариантности электромагнетизма попросту неверно. Как и можно было ожидать, его точка зрения повлекла за собой целую череду обличительных выступлений; см., например: *Earman, J. What Time Reversal Is and Why It Matters // International Studies in the Philosophy of Science*, 2002, 16, p. 245–264; *Arntzenius, F. Time Reversal Operations, Representations of the Lorentz Group, and the Direction of Time // Studies in History and Philosophy of Science*, 2004, Part B 35, p. 31–43; *Malament, D. B. On the Time Reversal Invariance of Classical Electromagnetic Theory // Studies in History and Philosophy of Science*, 2004, Part B 35, p. 295–315.

Большинство физиков скажут, что это просто не имеет значения. Не существует единственного верного значения термина «инвариантность относительно отражения времени», скромно дожидаящегося того момента, когда мы, наконец-то, задумаемся до него и разберемся в его сути. Есть лишь набор понятий, которые могут пригодиться или не пригодиться в размышлениях на тему того, как устроен мир. Ни у кого не возникает альтернативных мнений относительно движения электронов в присутствии магнитного поля; разногласия касаются лишь терминов, с помощью которых следует описывать данную ситуацию. Физикам часто трудно понять, почему философы так трепетно относятся к выбору слов. Философов, с другой стороны, раздражают физики, которые постоянно жонглируют словами, но не понимают, что же эти слова в действительности означают.

- ¹⁶ Существуют две разновидности элементарных частиц: «частицы материи», называемые фермионами, и «частицы силы», именуемые бозонами. Среди известных нам бозонов — фотон, переносящий электромагнитную силу, глюон, переносящий сильное взаимодействие, и W- и Z-бозоны, переносчики слабого взаимодействия. Известные фермионы подразделяются на два типа: шесть видов кварков, которые под влиянием сильного взаимодействия образуют составные частицы, такие как протоны и нейтроны, и шесть видов лептонов, на которые сильное взаимодействие не распространяется, благодаря чему они свободно перемещаются по произвольным траекториям. Фермионы также можно дополнительно разделить на четыре набора по три частицы в каждом: есть три кварка с электрическим зарядом $+2/3$ (верхний (u), очарованный (c) и истинный (t) кварки),

три кварка с электрическим зарядом $-1/3$ (нижний (d), странный (s) и прелестный (b)), три лептона с электрическим зарядом -1 (электрон, мюон и тау) и три лептона с нулевым зарядом (электронное нейтрино, мюонное нейтрино и тау-нейтрино). Чтобы еще больше запутать ситуацию, каждому типу кварков и лептонов соответствует античастица с противоположным электрическим зарядом: например, существует верхний антикварк с зарядом $-2/3$ и т. п.

Все это позволяет нам чуть более конкретно говорить о процессе распада нейтрона (два нижних кварка и один верхний): в действительности при этом появляется протон (два верхних кварка и один нижний), электрон и электронное антинейтрино. Важно понимать, что это именно антинейтрино, так как суммарное число лептонов не меняется. Электрон считается за один лептон, а антинейтрино — за минус один; таким образом, они компенсируют друг друга. Физикам еще не доводилось наблюдать процесс, в котором менялось бы суммарное число лептонов или суммарное число кварков, хотя есть подозрение, что такие процессы должны существовать. В конце концов, в реальном мире кварков намного больше, чем антикварков (у нас нет возможности точно оценить суммарное количество лептонов, так как находить нейтрино во Вселенной чрезвычайно сложно; вполне возможно, что антинейтрино может быть куда больше).

¹⁷ «Проще всего» означает, что этот способ позволяет сделать самую легкую частицу. Чем тяжелее частица, тем больше энергии требуется для ее создания; к тому же тяжелые частицы распадаются быстрее. Самые легкие типы кварков — это верхний (с зарядом $+2/3$) и нижний (с зарядом, равным $-1/3$). Однако соединив верхний кварк с нижним антикварком, мы не получим нейтральную частицу; следовательно, придется воспользоваться более тяжелыми кварками. Следующий по массе — странный кварк, обладающий зарядом $-1/3$, и мы можем получить каон, если объединим его с нижним антикварком.

¹⁸ *Angelopoulos, A. et al.* (CLEAR Collaboration). First Direct Observation of Time Reversal Noninvariance in the Neutral Kaon System // *Physics Letters*, 1998, В 444, р. 43–51. Группа КTeV из лаборатории Fermilab под Чикаго провела похожий эксперимент. Его целью также была оценка с помощью нейтральных каонов инвариантности относительно обращения времени, но выполнен он был немного другим способом (*Alavi-Harati, A. et al.* (KTeV Collaboration). Observation of CP Violation in $KL \rightarrow \pi^+ \pi^- e^+ e^-$ Decays // *Physical Review Letters*, 2000, 84, р. 408–411).

¹⁹ Цитировано из работы *Maglich, B.* *Adventures in Experimental Physics*, Gamma Volume. — Princeton, NJ: World Science Communications, 1973. Первоначальные публикации: *Lee, T. D., Yang, C. N.* Question of Parity Conservation in Weak Interactions, // *Physical Review*, 1956, 104, р. 254–258; *Wu, C. S., Ambler, E., Hayward, R. W., Hoppes, D. D., Hudson, R. P.* Experimental Test of Parity Nonconservation in Beta Decay // *Physical Review*, 1957, 105, р. 1413–1415. В полном соответствии с опасениями Ву другие физики сумели очень быстро воспроизвести достигнутый ею результат. Действительно, еще одна группа ученых Колумбийского университета поспешно провела эксперимент, подтвердивший правильность первоначальных выводов, и их статья была опубликована немедленно после выхода работы Ву и др. (*Garwin, R. L., Lederman, L. L., Weinrich, M.* Observation of the Failure of Conservation of Parity and Charge Conjugation in Meson Decays: The Magnetic Moment of the Free Muon // *Physical Review*, 1957, 105, р. 1415–1417).

²⁰ Christenson, J. H., Cronin, J. W., Fitch, V. L., Turlay, R. Evidence for the 2π Decay of the K^0 Meson // *Physical Review Letters*, 1964, 13, p. 138–140. В стандартной модели физики элементарных частиц существует общепринятый способ учета нарушения CP-инвариантности, разработанный Макото Кобаяси и Тосихидэ Масукава (*Kobayashi, M., and Maskawa, T. CP-Violation in the Renormalizable Theory of Weak Interaction // Progress of Theoretical Physics* 49 (1973): 652–57), которые обобщили идею Николы Кабиббо. Кобаяси и Масукава удостоились Нобелевской премии в 2008 году.

²¹ Здесь мы также делаем пару предположений: во-первых, мы считаем, что физические законы инвариантны относительно сдвига по времени (то есть не меняются от одного момента к другому), а во-вторых, что они детерминированы (будущее можно предсказать абсолютно точно, а не просто с какой-то вероятностью). Если любое из этих предположений оказывается неверным, то определение, является ли интересующий нас набор законов инвариантным относительно направления времени, становится несколько сложнее.

Глава 8

Энтропия и беспорядок

Никому не дано представить в телесных образах обращение времени. Время необратимо.

*Владимир Набоков.
Смотри на арлекинов!*

Почему обсуждения энтропии и второго начала термодинамики так часто заканчиваются разговорами о еде? Вот несколько популярных (и вкусных) примеров, когда энтропия увеличивается в ходе необратимых процессов:

- ◆ вы разбиваете яйца и готовите яичницу;
- ◆ смешиваете кофе с молоком;
- ◆ проливаете вино на новый ковер;
- ◆ вынимаете пирог из духовки, и его аромат распространяется по квартире;
- ◆ кидаете кубики льда в стакан воды, и они постепенно тают.

Честно говоря, не все эти примеры одинаково аппетитны; тот, что с кубиком льда, пресноват, — хотя это легко исправить, заменив воду джином. Кроме того, пример с приготовлением яичницы требует дополнительного разъяснения. На самом деле приготовление яиц нельзя считать прямолинейной демонстрацией второго начала термодинамики. Готовка — химическая реакция, вызываемая нагреванием, и этот процесс не был бы возможен, если бы яйца не были открытыми системами. Энтропия вступает в игру, когда мы разбиваем яйца и перемешиваем белки с желтками; смысл тепловой обработки получившейся смеси в том, чтобы избежать отравления сальмонеллой, а не продемонстрировать принципы термодинамики.

Взаимоотношения между энтропией и едой основываются по большей части на таком вездесущем процессе, как *смешивание*. На кухне мы очень часто именно этим и занимаемся — смешиваем два вещества, которые до этого существовали сами по себе или хранились раздельно. Это могут быть как две разные формы одной и той же субстанции (лед и жидкая вода), так и два совершенно разных ингредиента (молоко и кофе, белки и желтки яиц). Первопроходцы термодинамики были чрезвычайно заинтересованы в изучении влияния тепла на различные объекты из повседневной жизни, и таяние кубика льда стало бы для них проблемой первоочередной важности. Куда меньшее любопытство у них вызвали бы процессы, в которых принимают участие

ингредиенты, имеющие одинаковую температуру, например пролитое на ковер вино. Однако совершенно очевидно, что независимо от температуры между всеми этими процессами есть нечто сходное: изначально субстанции разъединены, а в конечном состоянии перемешаны между собой. Смешать вещи очень легко, а вот разъединить куда труднее. Стрела времени накладывает свой отпечаток на все, что мы делаем на кухне.

Почему смешивать ингредиенты легко, а отделять их друг от друга сложно? Когда мы смешиваем две жидкости, мы видим, как разноцветные завихрения постепенно сливаются, образуя равномерно окрашенную текстуру. Это зрелище не слишком помогает разобраться, что именно там происходит. Так что давайте вместо этого рассмотрим смешивание песка двух разных цветов. Важно то, что песок состоит из дискретных частей — отдельных песчинок. Это ни у кого не вызывает сомнения. Смешивая, например, синий песок с красным, мы получаем песок фиолетового цвета. Но это не означает, что каждая песчинка из обеих порций окрасилась в фиолетовый цвет. Песчинки сохраняют индивидуальность — синие остаются синими, а красные красными; они просто беспорядочно перемешиваются. Только если мы глядим издалека («макроскопически») смесь кажется однообразно фиолетовой; если приглядеться (посмотреть на нее «микроскопически»), мы увидим те же самые синие и красные песчинки.

Одним из величайших достижений пионеров кинетической теории — Даниила Бернулли из Швейцарии, Рудольфа Клаузиуса из Германии, Джеймса Клерка Максвелла и Уильяма Томсона из Великобритании, Людвига Больцмана из Австрии и Джозайи Уилларда Гиббса из США — было то, что они первыми стали рассматривать все жидкости и газы так, как мы только что описывали песок: как наборы крохотных кусочков, сохраняющих свои отличительные черты. Разумеется, мы не ищем в жидкостях и газах песчинки; мы знаем, что они сделаны из атомов и молекул. Однако принцип остается неизменным. Когда мы наливаем молоко в кофе, не происходит никакого чудесного объединения отдельных молекул молока с отдельными молекулами кофе, и молекулы нового вида не появляются в этой смеси. Два набора молекул просто перемешиваются. Даже тепло — это свойство атомов и молекул, а не какая-то отдельная самостоятельная жидкость. Теплота объекта — характеристика энергии быстро движущихся молекул, из которых он состоит. Когда кубик льда тает в стакане воды, молекулы не меняются. Они всего лишь сталкиваются друг с другом, вследствие чего их энергия равномерно распределяется между всеми молекулами, содержащимися в стакане.

Не давая (пока что) точного математического определения энтропии, на примере смешивания песка двух цветов мы можем показать, что перемешивать вещи значительно проще, чем разделять их обратно. Представьте себе миску, в которую насыпали песок: все синие песчинки находятся у одного бортика, а все красные у противоположного. Очевидно, что эта конфигурация достаточно специальная: если потрясти миску или помешать содержимое ложкой, то красный песок начнет смешиваться с синим. Если же с самого начала насыпать в миску смесь двух типов песка, то конфигурация будет устойчива: сколько ни перемешивай, менее разнородной смесь не станет. Причина проста: для того чтобы разделить два типа песка, нам потребуется применить намного более точное действие, чем простое потряхивание или перемешивание. Нам придется взять увеличительное стекло и аккуратно поработать пинцетом, перенося красные песчинки к одному бортику миски, а синие к другому. Для создания нестабильного специального состояния необходимо вкладывать куда больше труда, чем для создания стабильной неразберихи.

Все то же самое можно изложить с ужасающе научной количественной точки зрения — что Больцман и другие, собственно говоря, и сделали в 1870-х годах. Мы тщательно изучим результаты их работы и попробуем понять, на какие вопросы они дают ответы, а на какие нет и насколько эти ответы согласуются с основополагающими законами физики, которые, как мы знаем, полностью обратимы. Однако уже сейчас должно быть понятно, что ключевую роль здесь играет *большое количество* атомов, составляющих макроскопические объекты в реальном мире. Если бы у нас была только одна красная песчинка и одна синяя, то между «смешанным» и «несмешанным» состояниями никакого различия бы не было. В предыдущей главе мы говорили о том, что физические законы работают совершенно одинаково как вперед во времени, так и назад (при условии, что мы дали надлежащее определение направлению времени). Это микроскопическое описание, требующее тщательного отслеживания каждой индивидуальной составляющей системы. Однако в реальном мире, где в различных процессах участвует невообразимое количество атомов, мы попросту не в состоянии обрабатывать такие объемы информации. Нам приходится прибегать к упрощениям — рассматривать средний цвет, или температуру, или давление вместо положения и импульса каждого атома. Когда мы мыслим макроскопически, мы забываем (или отбрасываем) детальную информацию об отдельных частицах, — и здесь на сцену выходят энтропия и необратимость.

Огрубление

Главное, что мы хотим понять, — это «как макроскопические характеристики системы, состоящей из множества атомов, меняются вследствие движения отдельных атомов?» (Я буду попеременно использовать все три термина — «атомы», «молекулы» и «частицы», подразумевая примерно одно и то же, так как для нас важно лишь то, что это крохотные объекты, подчиняющиеся обратимым законам физики, и что для того, чтобы сконструировать нечто макроскопическое, нужно взять необычайно много таких объектов.) Чтобы разобраться в этом, рассмотрим герметичный контейнер, разделенный на две части перегородкой, в которой проделано отверстие. Молекулы газа летают в одной половине контейнера и чаще всего отскакивают от центральной перегородки, однако периодически часть молекул пролетает сквозь отверстие на другую половину. Можно предположить, например, что молекулы отскакивают от перегородки в 995 случаях из 1000, но полпроцента из них при каждом столкновении (которое случается, скажем, каждую секунду) умудряется пробраться в другую часть контейнера.

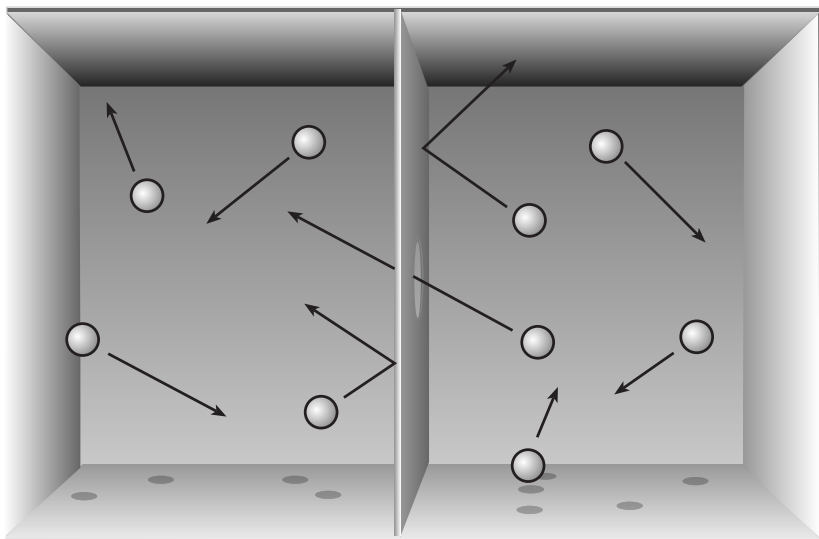


Рис. 8.1. Контейнер, полный молекул газа, посередине которого установлена перегородка с отверстием. Каждую секунду у каждой молекулы есть крошечный шанс пролететь сквозь отверстие на другую сторону

Этот пример весьма специфичен и тем удобен; мы можем в деталях изучить каждый вариант развития событий и описать, что при этом происходит.¹ Про каждую молекулу в левой половине контейнера мы можем сказать, что каждую секунду с вероятностью 99,5 % она останется в своей половине, а с вероятностью 0,5 % переместится в противоположную; то же самое верно для правой половины контейнера. Это правило абсолютно инвариантно относительно обращения времени: если снять на пленку движение произвольной частицы, подчиняющейся этому правилу, то при просмотре фильма невозможно будет сказать, вперед или назад по времени воспроизводится запись. На уровне отдельных частиц прошлое и будущее совершенно идентичны.

На рис. 8.2 мы изобразили один из возможных вариантов; как всегда, значение времени увеличивается снизу вверх. В контейнере 2000 «молекул воздуха», и в момент времени $t = 1$ в левой части находится 1600 молекул, а в правой — только 400. (Пока что вы не должны спрашивать, почему первоначальная конфигурация выбрана именно такой, хотя позже, когда мы заменим «контейнер» на «Вселенную», мы начнем задавать подобные вопросы.) Итак, мы наблюдаем за молекулами, летающими внутри контейнера и отскакивающими от стенок, и то, что происходит далее, нас совсем не удивляет. Каждую секунду любая молекула с небольшой вероятностью может перелететь на другую половину, но поскольку в самом начале в одной части контейнера существенно больше молекул, чем в другой, в целом наблюдается тенденция к выравниванию. (В точности как с температурами в формулировке второго начала термодинамики, предложенной Клаузиусом.) Пока в левой части контейнера молекул больше, общее количество молекул, пролетающих сквозь отверстие слева направо, превышает количество молекул, перемещающихся в обратном направлении. Через 50 секунд мы увидим, что количества молекул в обеих частях начинают выравниваться, а через 200 секунд они станут практически равными.

Очевидно, что этот контейнер — еще одна иллюстрация существования стрелы времени. Даже если бы мы не указали моменты времени на различных конфигурациях, показанных на рисунке, большинство людей без труда угадали бы, что было в начале, а чем все закончилось. Нас не удивляет тот факт, что концентрация молекул воздуха выравнивается, но мы бы были поражены, если бы все (или почти все) молекулы внезапно собрались в одной половине контейнера. «Прошлое» — это с той стороны стрелы времени, где объекты находятся в более разделенном состоянии, тогда как «будущее» — это там, где они перемешались, а их концентрация выровнялась. То же самое происходит, когда вы наливаете в чашку кофе ложку молока и две жидкости смешиваются.

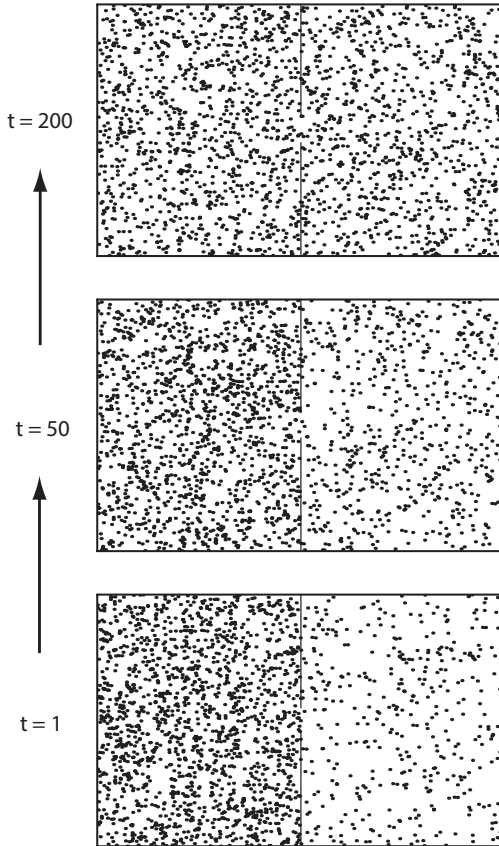


Рис. 8.2. Поведение 2000 молекул газа в контейнере с перегородкой. В самом начале 1600 молекул находятся в левой части контейнера и 400 молекул — в правой. Через 50 секунд в левой половине остается около 1400 молекул, а в правой их число уже составляет 600. По истечении 200 секунд молекулы равномерно распределены между двумя половинами контейнера

Конечно же, это всего лишь статистическая картина, а не абсолютная действительность. Я хочу сказать, что вполне вероятна ситуация, когда вначале слева и справа в контейнере будет одинаковое число молекул, а потом по удивительному стечению обстоятельств большинство частиц соберется в какой-то одной половине, образовав очень неравномерное распределение. Как мы увидим далее, вероятность такого исхода невелика, и чем больше

частиц участвуют в процессе, тем она ниже; тем не менее нельзя сбрасывать ее со счетов. Однако пока что мы можем смело игнорировать такие редкие события и сконцентрироваться на наиболее вероятном варианте эволюции системы.

Энтропия по Больцману

Нам хотелось бы сделать нечто большее, чем просто заявить: «Вполне очевидно, что молекулы, скорее всего, будут перемещаться до тех пор, пока равномерно не распределятся по объему». Мы хотели бы уметь обосновывать это ожидание и заменять выражения типа «скорее всего» и «равномерно распределятся» строгими количественными характеристиками. Этим занимается раздел науки под названием «статистическая механика». Повторяя бессмертные слова Питера Венкмана: «С дороги, человек, я ученый!»

Первой крупной догадкой Больцмана было осознание того факта, что у молекулы есть гораздо больше способов равномерно (более или менее) распределиться по объему контейнера, чем всем вместе скопиться у одной из его стенок. Представьте себе, что мы подсчитали имеющиеся молекулы и навесили на них номера от 1 до 2000. Нам интересно, сколько существует способов организовать молекулы так, чтобы в левой и правой половинах контейнера оказалось ровно требуемое число молекул. Например, сколько есть способов поместить 2000 молекул в левую часть и 0 в правую? Ровно один. Мы следим только за тем, в какой половине контейнера находится каждая молекула, и нас не интересуют ее точное положение и импульс, поэтому мы всего лишь берем и помещаем каждую молекулу в левую часть контейнера.

Теперь попробуем ответить на вопрос: сколькими способами можно поделить молекулы так, чтобы в левой части оказалось 1999 молекул, а в правой — ровно одна? Ответ: двумя тысячами способов, по одному на каждую молекулу, которой посчастливилось попасть в правую половину. А если мы хотим, чтобы в правой части всегда находилась пара молекул? Это можно сделать 1 999 000 способов. И в конце концов, если мы обнаглеем поместить в правую половину три молекулы, оставляя в левой 1997, то обнаружим, что вариантов такого размещения молекул целых 1 331 334 000.²

Очевидно, что эти числа увеличиваются очень быстро: 2000 намного больше 1, 1 999 000 намного больше 2000, а 1 331 334 000 еще больше. По мере того как мы в ходе своего мысленного эксперимента перемещаем все больше и больше молекул в правую половину, опустошая левую, они продолжают возрастать, а затем в определенный момент начинают уменьшаться.

В конце концов, задавшись вопросом, много ли существует способов поместить все 2000 молекул в правую часть контейнера, оставив в левой ровно ноль, мы вновь вернемся к единственному уникальному варианту такой конфигурации.

Ситуация, соответствующая наибольшему числу всевозможных конфигураций, — очевидно, та, когда в каждой половине контейнера находится ровно по 1000 молекул. Создать такую конфигурацию можно... в общем, очень большим количеством способов. Мы не будем приводить точное число; скажем только, что оно примерно равно $2 \cdot 10^{600}$ — двойка, за которой следует шестьсот нулей. И это всего лишь для двух тысяч частиц. Попробуйте вообразить приблизительное число возможных конфигураций атомов в комнате с обычным объемом воздуха или даже в стакане воды (предмет, который можно удержать в руке, состоит где-то из $6 \cdot 10^{23}$ молекул — это число Авогадро). Возраст Вселенной — всего лишь около $4 \cdot 10^{17}$ секунд, так что можете представить себе, как быстро вам придется двигать молекулы туда и сюда, для того чтобы изучить все возможные допустимые конфигурации.

Все это наводит на определенные мысли. Существует относительно немного способов собрать все молекулы в одной половине контейнера, но огромное число вариантов более или менее равномерного распределения их по доступному пространству. К тому же разумно ожидать, что очень неравномерное распределение с легкостью будет переходить в относительно равномерное, но не наоборот. Эти заявления похожи, но не эквивалентны. Следующим шагом Больцмана было предположение о том, что если у нас нет какой-то особой информации о состоянии системы, то следует предполагать, что она будет переходить от «специальных» конфигураций к «общим», то есть от ситуаций, соответствующих относительно небольшому числу вариантов расположения частиц, к ситуациям, соответствующим множеству способов их расположения.

Размышляя подобным образом, Больцман ставил целью объяснить на атомном уровне второе начало термодинамики — утверждение, что энтропия в замкнутой системе всегда увеличивается (или остается постоянной). Формулировки второго начала уже были даны Клаузиусом и другими учеными, однако Больцман хотел вывести их из некоего простого набора базовых принципов. Вы уже заметили, что статистическое мышление движет нас в правильном направлении: заявление о том, что «развитие систем происходит от специальных конфигураций к общим», весьма похоже на «развитие систем происходит от конфигураций с низкой энтропией к конфигурациям с высокой энтропией».

Таким образом, напрашивается определение энтропии как «количества перестановок микроскопических частей системы, при которых ее макроскопическое состояние не меняется». В нашем примере с перегородкой внутри контейнера это соответствует количеству способов разместить отдельные молекулы внутри сосуда так, чтобы общее число молекул в каждой половине осталось неизменным.

Мы почти подошли к верному ответу, но все же не совсем. В действительности пионерам термодинамики было известно об энтропии не только то, что «она обычно увеличивается». Например, они знали, что если взять две разные системы и заставить их взаимодействовать, то общая энтропия будет равна простой сумме отдельных энтропий этих двух систем. Энтропия аддитивна, точно так же, как число частиц (в отличие, например, от температуры). Однако количество конфигураций совершенно точно свойством аддитивности не обладает: если соединить два контейнера с газом, то общее количество способов реорганизации молекул в двух контейнерах станет во много раз больше, чем в пределах одной емкости.

Больцману удалось справиться с задачей формулировки определения энтропии в терминах микроскопических перестановок. Мы будем использовать букву W (от немецкого *Wahrscheinlichkeit* — «вероятность») для обозначения количества перестановок микроскопических составляющих системы без изменения ее макроскопических свойств. Последним шагом Больцмана было взятие логарифма от W и объявление о том, что результат пропорционален энтропии.

Слово «логарифм» звучит очень по-научному, но это всего лишь способ показать, как много цифр понадобится для написания числа. Если число представляет собой степень 10, то его логарифм равен всего лишь этой степени,³ то есть логарифм 10 равен 1, логарифм 100 равен 2, логарифм 1 000 000 равен 6 и т. д.

В приложении мы более подробно обсудим некоторые математические тонкости. Они не очень важны для составления глобальной картины; если вы притворитесь, что не замечаете слова «логарифм», то ничего особо не потеряете. В действительности важно знать только лишь две вещи:

- ◆ по мере увеличения чисел возрастают и их логарифмы;
- ◆ но не слишком быстро; сами числа становятся неимоверно больше, однако их логарифмы увеличиваются довольно медленно. Один миллиард намного больше тысячи, однако 9 (логарифм миллиарда) не сильно больше 3 (логарифм 1000).

Когда дело доходит до огромных чисел, например таких, с которыми мы сталкиваемся в этой игре, последнее свойство здорово нам помогает. Поделить 2000 частиц поровну можно $2 \cdot 10^{600}$ способов — просто невообразимое число! Но логарифм этого числа равен всего лишь 600,3 — с этим еще можно иметь дело.

Формула Больцмана для энтропии, традиционно обозначаемой буквой S (букву E мы использовать не хотим, потому что она обычно обозначает энергию), гласит, что энтропия равна произведению некоторой константы k , которая называется постоянной Больцмана, на логарифм W , где W — число микроскопических состояний системы, неразличимых с макроскопической точки зрения.⁴ Таким образом⁵,

$$S = k \lg W.$$

Это, без сомнения, одно из важнейших уравнений за всю историю науки — триумф физики XIX века, которое можно поставить в один ряд с ньютоновским описанием динамики в XVII веке и революционными открытиями в области теории относительности и квантовой механики в двадцатом. Посетив могилу Больцмана в Вене, вы увидите, что это уравнение выгравировано на его надгробном камне (см. главу 2).⁶

Взятие логарифма избавляет нас от основной проблемы, а формула Больцмана приводит как раз к тем свойствам, которые разумно ожидать от такого явления, как энтропия. В частности, полная энтропия двух систем после объединения равна всего лишь сумме энтропий этих систем. Это обманчиво простое уравнение обеспечивает количественную связь между микроскопическим миром атомов и макроскопическим миром, который мы видим вокруг себя.⁷

Контейнер с газом возвращается

Для примера мы могли бы вычислить энтропию показанного на рис. 8.2 контейнера с газом, внутри которого есть перегородка с небольшим отверстием. Наша макроскопическая наблюдаемая — это полное количество молекул в левой или правой половине контейнера (нам неизвестно, что это за молекулы, где они находятся и какие у них импульсы). Величина W в данном примере — это всего лишь число способов распределить 2000 частиц между двумя половинами контейнера так, чтобы их количество в каждой половине оставалось постоянным. Если слева 2000 частиц, то W равно 1, а $\lg W$ равен 0. Еще несколько вариантов перечислено в табл. 8.1.

Таблица 8.1. Количество расположений W и логарифм этого значения, вычисленные для контейнера с 2000 частицами, часть из которых находится слева от перегородки, а часть — справа

Число частиц слева / справа	W	$\lg W$
2000 / 0	1	0
1999 / 1	2000	3,3
1998 / 2	1999 000	6,3
1997 / 3	1331 334 000	9,1
...
1000 / 1000	$2 \cdot 10^{600}$	600,3
...
3 / 1997	1331 334 000	9,1
2 / 1998	1999 000	6,3
1 / 1999	2000	3,3
0 / 2000	1	0

На рис. 8.3 представлено изменение энтропии (в определении Больцмана) со временем в нашем контейнере с газом. Я перемасштабировал график так, чтобы максимальное значение энтропии контейнера равнялось 1. Начальное значение энтропии относительно невелико — оно соответствует первой конфигурации на рис. 8.2, где в левой части контейнера находится 1600 молекул, а в правой — только 400. По мере того как молекулы постепенно просачиваются сквозь отверстие в центральной перегородке, энтропия увеличивается. Это лишь один пример эволюции системы; поскольку наш «закон физики» (каждую секунду у каждой частицы есть 0,5-процентная вероятность попасть на другую сторону) включает вероятностную составляющую, движение системы в разных экспериментах неизбежно будет отличаться в деталях. Однако в подавляющем большинстве случаев энтропия все же будет увеличиваться, поскольку система тяготеет к макроскопическим конфигурациям, соответствующим большему числу микроскопических расстановок. Второе начало термодинамики в действии.

Согласно Больцману и коллегам, это и есть источник стрелы времени. Сначала у нас имеется лишь набор микроскопических законов физики, инвариантных относительно обращения времени: для них прошлое и будущее неразличимы. Однако мы имеем дело с системами, включающими огромное количество частиц, для полного описания состояния которых нам не требуется отслеживать

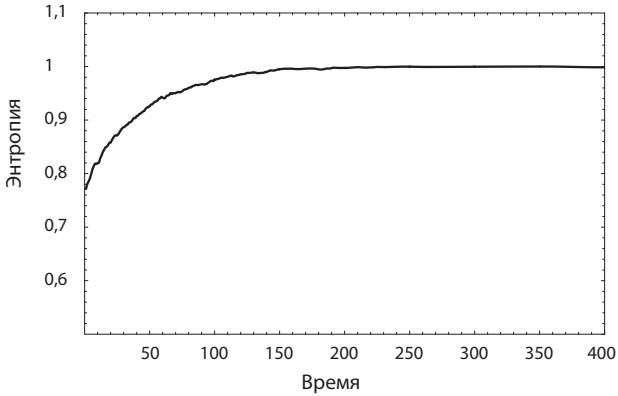


Рис. 8.3. Увеличение энтропии в контейнере с перегородкой, содержащем молекулы газа. Вначале большая часть молекул сосредоточена в левой половине, но со временем распределение выравнивается (см. рис. 8.2). Соответственно увеличивается и энтропия, поскольку существует гораздо больше способов равномерно поделить молекулы между двумя отсеками контейнера, чем собрать их все с одной или с другой стороны. Для удобства мы показываем энтропию в единицах ее максимального значения, которое на данном графике равно единице

каждую деталь — мы следим лишь за некоторыми поддающимися наблюдению макроскопическими величинами. Энтропия — это мера числа микроскопических состояний, неразличимых с точки зрения макроскопического наблюдателя (и под этим заявлением мы подразумеваем, что она пропорциональна логарифму этого числа). В предположении, что система развивается по направлению к макроскопическим конфигурациям, соответствующим большему количеству возможных состояний, естественно говорить о том, что со временем энтропия увеличивается.

В частности, было бы очень странно, если бы она внезапно уменьшилась. Стрела времени появляется потому, что система (или Вселенная) с течением времени естественным образом переходит от редких конфигураций к более общим.

Все это на первый взгляд кажется весьма правдоподобным, и в конечном итоге мы убедимся, что это действительно так. Но в ходе наших рассуждений мы сделали несколько «обоснованных» логических скачков, заслуживающих более тщательного рассмотрения. В оставшихся разделах этой главы мы прольем свет на различные предположения, которые необходимо сделать для Больцмановской интерпретации энтропии, и попробуем решить, насколько они оправданы.

Полезная и бесполезная энергия

У нашего примера с контейнером газа есть интересная особенность: стрела времени там — явление временное. После того как концентрация газа выравнивается (примерно в момент времени $t = 150$ на рис. 8.3), ничего больше не происходит. Отдельные молекулы продолжают перелетать из левой половины в правую и обратно, но число таких молекул взаимно компенсируется, и большую часть времени количество молекул слева и справа будет одинаково. Это конфигурации, соответствующие наибольшему числу расстановок отдельных молекул, в которых система соответственно обладает наибольшей энтропией.

Система, обладающая максимально возможной энтропией, находится в *равновесии*. Когда наступает состояние равновесия, системе становится некуда двигаться дальше; такая конфигурация для нее наиболее естественна. В равновесной системе стрела времени отсутствует, так как энтропия не увеличивается (и не уменьшается). Для макроскопического наблюдателя система в равновесии предстает статичной, не меняющейся.

Ричард Фейнман в своей лекции «Характер физических законов» рассказывает историю, иллюстрирующую концепцию равновесия.⁸ Представьте себе, что вы сидите на пляже и внезапно на вас обрушивается ливень. Вы принесли с собой полотенце, но пока вы успеваете добежать до укрытия, оно также промокает. Оказавшись под крышей, вы начинаете вытираться полотенцем. Какое-то время это работает, потому что полотенце промокло чуть меньше, чем вы. Тем не менее вскоре вы обнаруживаете, что оно пропиталось влагой и вы, вытираясь им, настолько же быстро смачиваете свою кожу, насколько быстро стираете с нее капли воды. Вы с полотенцем достигли состояния «равновесия влажности», и оно уже не может высушить вас. Это состояние, в котором число способов разместить молекулы воды на вас и на вашем полотенце максимально.⁹

После достижения состояния равновесия полотенце становится непригодным для достижения первоначальной цели (обсушиться). Обратите внимание, что когда вы вытираетесь, полный объем воды не меняется — она просто переходит с вас на полотенце. Аналогично, в контейнере с газом, изолированном от внешнего мира, полная *энергия* не меняется; она остается постоянной, по крайней мере в ситуациях, когда расширением пространства можно пренебречь. Однако энергия может быть распределена так, чтобы приносить какую-то пользу, а может быть и бесполезной. Когда энергия находится в конфигурации с низкой энтропией, ее можно использовать для совершения работы.

Но тот же объем энергии в состоянии равновесия абсолютно бесполезен. Энтропия — это также мера бесполезности конфигурации энергии.¹⁰

Снова вернемся к нашему контейнеру с перегородкой. Но на этот раз пусть это будет не перегородка с отверстием, жестко зафиксированная внутри контейнера и лишь позволяющая некоторой части молекул пролетать из одной его половины в другую, а сплошная подвижная пластина, прикрепленная к стержню, выходящему за пределы контейнера. То, что мы сейчас описали, — всего лишь обыкновенный поршень, с помощью которого при определенных обстоятельствах можно производить работу.

На рис. 8.4 показаны две разные ситуации, в которых может оказаться наш поршень. Вверху проиллюстрирована конфигурация с низкой энтропией: все молекулы газа находятся с одной стороны от перегородки. Внизу изображена ситуация с высокой энтропией: с обеих сторон от перегородки находятся равные объемы газа. Полное количество молекул и полная энергия одинаковы в обоих случаях; отличается только энтропия. Также очевидно, что развиваться события в этих двух случаях будут совершенно по-другому. В случае, представленном в верхней части рисунка, весь газ находится с левой стороны от поршня. Сила молекул, ударяющихся о перегородку, оказывает давление, которое выталкивает поршень до тех пор, пока газ не заполнит весь объем контейнера. Подвижный стержень поршня можно использовать для выполнения полезной работы, например кручения маховика (по крайней мере, в течение какого-то небольшого промежутка времени). При этом расходуется энергия газа, поэтому в конце процесса его температура станет ниже. (Поршни в двигателе вашего автомобиля работают точно так же, расширяя и охлаждая горячие газы — продукты сгорания паров бензина; эта полезная работа и приводит автомобиль в движение.)

В нижней части рисунка показан процесс, в котором первоначальная энергия такая же, но энтропия намного выше: по обеим сторонам перегородки находится одинаковое количество частиц. Высокая энтропия подразумевает равновесие, что, в свою очередь, свидетельствует о бесполезности энергии. И действительно, мы видим, что поршень не движется. Давление газа с одной стороны перегородки компенсируется давлением с другой стороны. Полная энергия газа в этом контейнере равна полной энергии в контейнере, изображенном в левом верхнем углу, однако в данном случае мы не можем воспользоваться ею в своих целях, например заставить газ передвинуть поршень и помочь нам сделать что-то полезное.

Этот пример помогает нам понять связь между взглядом Больцмана на энтропию и мнением Рудольфа Клаузиуса, который впервые сформулировал

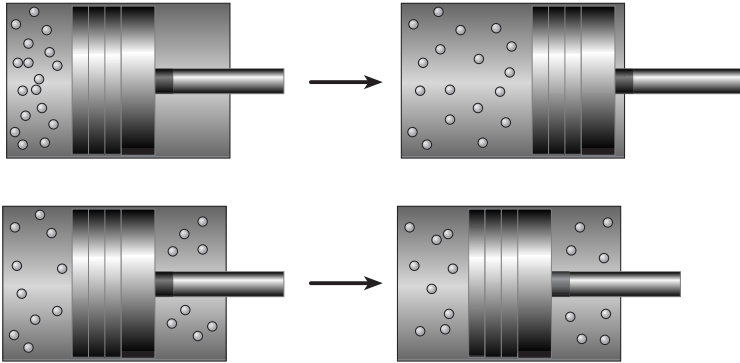


Рис. 8.4. Газ в разделенном сплошной перегородкой контейнере, применяемый для приведения в движение поршня. Вверху газ в состоянии с низкой энтропией выталкивает поршень вправо, производя полезную работу. Внизу газ в состоянии с высокой энтропией никак не влияет на положение поршня

второе начало термодинамики. Вспомните, что Клаузиус и его предшественники вообще не думали об энтропии в терминах атомов, они рассматривали ее как независимую субстанцию с собственной динамикой. В исходной версии второго начала термодинамики энтропия даже не упоминалась; это было всего лишь утверждение о том, что «теплота не может спонтанно начать течь от более холодного объекта к более горячему». Когда контактируют два объекта с разной температурой, их температуры постепенно изменяются по направлению к некоторому равновесному значению между ними. Если же в контакте находятся два объекта с одинаковой температурой, то с ними ничего не происходит (так как они уже находятся в температурном равновесии).

С точки зрения физики атомов все это также имеет смысл. Возьмем классический пример соприкосновения двух объектов с разной температурой: кубик льда в стакане теплой воды (о котором мы говорили в конце прошлой главы). И кубик льда, и жидкость состоят из совершенно одинаковых молекул, а именно H_2O . Единственное различие заключается в том, что температура льда намного ниже. Как мы уже говорили выше, температура — это мера средней энергии движения молекул в веществе. Таким образом, молекулы жидкой воды двигаются относительно быстро, а молекулы льда — медленно.

Однако такой тип условий — два набора молекул, в одном из которых молекулы движутся быстро, а в другом медленно, концептуально почти не отличается от двух наборов молекул, заключенных в контейнере по разные стороны от перегородки. В любом случае присутствуют макроскопические ограничения на

перестановки микроскопических частей этих систем. Если бы у нас был только стакан воды, имеющей постоянную температуру, мы могли бы заменять молекулы в одной части стакана молекулами из какой-то другой его части, и с макроскопической точки зрения никаких различий при этом мы бы не увидели. Но если в воде плавает кубик льда, то нельзя запросто поменять местами молекулы льда и молекулы обычной воды — при этом кубик льда начал бы двигаться, и мы заметили бы это даже со своей макроскопической точки зрения. Деление молекул воды на «жидкость» и «лед» накладывает серьезные ограничения на число доступных перестановок, поэтому данная конфигурация обладает низкой энтропией. По мере того как температура молекул воды, составлявших в начале эксперимента ледяной кубик, и температура «жидкой» воды в стакане выравниваются, энтропия возрастает. Правило Клаузиуса о тенденции к выравниванию температур и о том, что теплота не может спонтанно течь от холодного объекта к горячему, абсолютно эквивалентно утверждению, что энтропия, как ее определил Больцман, в замкнутой системе никогда не уменьшается.

Ничто из этого, разумеется, не означает, что охладить объект невозможно. Однако в повседневной жизни с учетом того, что большинство вещей вокруг нас имеют одинаковую температуру, это требует большей изобретательности, чем нагревание. Холодильник — куда более сложное устройство, чем плита (работа холодильника основывается на том же базовом принципе, что и работа поршня, показанного на рис. 8.4: двигатель устройства расширяет газ, забирая у него энергию и таким образом охлаждая его). Когда Гранту Ачатцу, шеф-повару чикагского ресторана «Alinea», потребовалось устройство, которое умело бы быстро охлаждать продукты — точно так же, как поставленная на огонь сковорода мгновенно нагревает их, для создания такой машины ему пришлось объединить усилия с Филипом Престоном, технологом, специализирующемся на кухонном оборудовании. Результатом их совместной работы стала «антисковорода» — устройство размером с микроволновую печь, металлическая верхняя поверхность которого имеет температуру $-34\text{ }^{\circ}\text{C}$. Если вылить на эту «антисковороду» горячее пюре или соус, то нижний его слой мгновенно замерзнет, а верхняя часть останется мягкой. Мы уже давно усвоили основы термодинамики, но продолжаем изобретать новые способы применения науки для облегчения собственной жизни.

Не зацикливайтесь на деталях

В пятницу вечером вы выбрались с друзьями в клуб поиграть в бильярд. Сейчас мы говорим о бильярде из реального мира, а не о «бильярде физиков», в кото-

ром мы пренебрегаем трением и шумом.¹¹ Один из ваших друзей только что эффектно разбил пирамиду. Раскатившиеся по столу шары остановились, вы принялись обдумывать свой следующий удар, и вдруг проходящий мимо незнакомец восклицает: «Ух ты! Это невероятно!»

В недоумении вы спрашиваете, что же тут невероятного, и слышите в ответ: «Вы только посмотрите: все эти шары оказались *ровно в этих точках* на столе! Какова вероятность того, что вам когда-либо удастся расположить их в точности таким же образом? Да вы не сможете повторить этого и за миллион лет!»

От загадочного незнакомца пахнет безумием — наверное, он немного свихнулся, читая слишком много философских трактатов об основах статистической механики. Однако в его словах есть определенный смысл. На столе с несколькими шарами появление любой заданной конфигурации крайне маловероятно. Представьте, что вы запустили биток в группу случайным образом расставленных по столу шаров, а они, покатавшись туда-сюда, остановились ровно в тех же точках, в которых находились до удара. Увидев такое, вы были бы поражены до глубины души! Однако вероятность данной конфигурации (конечные положения в точности совпадают с начальными) не больше и не меньше вероятности любого другого расположения шаров на столе.¹² Имейте ли мы право выделять ее на фоне других, называя «поразительной» или «невероятной», а все остальные именовать «непримечательными» или «случайными»?

Этот пример превосходно иллюстрирует центральный вопрос Больцмановского определения энтропии и понимания второго начала термодинамики: кто решает, можно ли считать два данных микроскопических состояния системы одинаковыми с нашей, макроскопической, точки зрения?

Формула для энтропии, выведенная Больцманом, основывается на величине W , которую мы определили как «количество способов разместить микроскопические составляющие системы так, чтобы ее макроскопический образ не изменился». В предыдущей главе мы определили «состояние» физической системы как полный набор информации, необходимой для однозначного описания ее движения с течением времени; в классической механике это положения и импульсы всех составляющих систему частиц. Теперь, когда мы рассматриваем статистическую механику, удобно использовать термин «микросостояние», подразумевая точное состояние системы, в противоположность «макросостоянию», включающему лишь те характеристики, которые поддаются наблюдению с макроскопической точки зрения. В этом случае можно дать величине W краткое определение: число микросостояний, соответствующих данному макросостоянию.

Для контейнера с газом, разделенного перегородкой на две половины, микросостоянием в любой момент времени является список положений и импульсов всех молекул газа. Однако нас интересовало только, сколько молекул находится слева от перегородки, а сколько — справа. Неявным образом каждый вариант деления группы молекул на части — сколько-то слева, а оставшиеся справа — определял «макросостояние» контейнера. А когда мы вычисляли значения W , мы всего лишь подсчитывали количество микросостояний, соответствующих данному макросостоянию.¹³

Раньше решение не отслеживать ничего, кроме количества молекул в каждой половине контейнера, казалось нам совершенно безобидным. Но мы могли бы следить и за массой других параметров. Имея дело с атмосферой в настоящей комнате, мы можем учитывать намного больше параметров, чем просто количество молекул в каждой части помещения: например, отслеживать температуру, плотность и атмосферное давление в каждой точке комнаты или, по крайней мере, в некотором наборе точек. Если в атмосфере содержится смесь газов, то мы могли бы по отдельности следить за плотностью и другими параметрами каждого из газов. В любом случае, объем информации, которым нам пришлось бы при этом манипулировать, все равно был бы намного меньше, чем если бы мы записывали положения и импульсы всех молекул в комнате. Тем не менее процедура выбора, какую информацию относить к макроскопическим характеристикам, а какую отбрасывать как несущественную составляющую микросостояния, определена недостаточно четко.

Процесс деления пространства микросостояний какой-то физической системы (газ в контейнере, стакан воды или Вселенная) на наборы, которые мы помечаем как «макроскопически неразличимые», называется «огрублением». Это такая черная магия, играющая критически важную роль в наших рассуждениях об энтропии. Рисунок 8.5 демонстрирует, как она работает: мы всего лишь делим пространство всех состояний системы на области (макросостояния), которые с точки зрения макроскопического наблюдателя кажутся одинаковыми. Каждая точка внутри любой такой области соответствует одному из микросостояний, а энтропия, связанная с данным микросостоянием, пропорциональна логарифму площади этой области, которому это микросостояние принадлежит (в действительности не площади, а объема, так как мы говорим о чрезвычайно многомерном пространстве). При взгляде на подобную схему становится очевидно, почему энтропия имеет тенденцию к увеличению: как правило, система развивается по направлению от состояний с низкой энтропией, соответствующих крошечной части пространства состояний, к состояниям из объемных областей, с которыми связаны большие значения энтропии.



Рис. 8.5. Процедура огрубления представляет собой разделение пространства всех возможных микросостояний на области, считающиеся неразличимыми с макроскопической точки зрения, — макросостояния. С каждым макросостоянием связано значение энтропии, пропорциональное логарифму объема этого макросостояния в пространстве состояний. Размер областей с низкой энтропией увеличен в целях наглядности; в действительности они чрезвычайно малы по сравнению с областями с высокой энтропией

Рисунок 8.5 не масштабирован; если бы мы хотели представить реальную систему, то макросостояния с низкой энтропией занимали бы намного меньшую площадь по сравнению с площадью, отведенной под макросостояния с высокой энтропией. Как мы убедились на примере с поделенным на две части контейнером, количество микросостояний, соответствующих макросостояниям с высокой энтропией, куда больше количества микросостояний, определяющих макросостояния с низкой энтропией. Нет ничего удивительного в том, что система с низкой начальной энтропией перейдет в более объемные области пространства состояний, к макросостояниям с высокой энтропией. Если же вначале система обладает высокой энтропией, то она может очень долго блуждать по пространству состояний, не встречая при этом областей с низкой энтропией. Вот что мы имеем в виду, говоря, что система находится в равновесии: она не находится в статическом микросостоянии, просто никогда не выходит из области, соответствующей макросостоянию с высокой энтропией.

Все эти рассуждения могут показаться вам нелепыми. Два микросостояния принадлежат одному и тому же макросостоянию, если они макроскопически неразличимы. Но это всего лишь один из способов сказать: «... когда мы не можем отличить одно от другого, основываясь на своих макроскопических

наблюдениях». Именно это «мы» и должно вызывать у вас тревогу. Почему вообще мы припели сюда какие-то свои способности? Мы говорим об энтропии как о характеристике всего *мира*, а не как об одной из сторон *нашего умения воспринимать мир*. Два стакана воды находятся в одном и том же макросостоянии, если весь объем воды в них имеет одинаковую температуру, даже если распределения положений и импульсов молекул воды в них отличаются, потому что мы не можем непосредственно измерить эти величины. Однако представьте себе, что нам встретилась раса супернаблюдательных инопланетян, способных впериться взором в толщу воды и увидеть положения и импульсы каждой заключенной там молекулы. Неужели эта раса вправе будет заявить, что энтропии вообще не существует?

Ученые, работающие в области статистической механики, пока что не признали единственно верным ни один из возможных ответов на озвученные выше вопросы (если бы это произошло, то мы бы только его и рассматривали). Давайте обсудим пару мнений.

Прежде всего, многие считают, что это вообще не важно. То есть вам-то может быть очень даже важно, как именно вы будете объединять микросостояния в макросостояния в целях какой-то конкретной актуальной для вас физической задачи, но в конечном итоге не имеет значения, как вы сделаете это, если единственная ваша цель — доказать истинность какого-то утверждения вроде второго начала термодинамики. Если посмотреть на рис. 8.5, станет понятно, почему второе начало термодинамики работает: в пространстве состояний гораздо больший объем отведен под состояния с высокой энтропией, чем с низкой, поэтому если мы начнем путешествие из последнего состояния, нет ничего удивительного в том, что в итоге мы окажемся в первом. Однако так будет всегда, независимо от того, как мы отсортируем микросостояния. Второе начало термодинамики непоколебимо; оно зависит от определения энтропии как логарифма от некоего объема внутри пространства состояний, но не от точного способа выбрать этот объем. Как бы то ни было, на практике из множества альтернатив мы выбираем что-то одно, поэтому такая прозрачная попытка избежать прямого ответа не может нас полностью удовлетворить.

Второе мнение заключается в том, что выбор — как именно провести огрубление — не может быть *абсолютно* произвольным и зависящим от человека, даже если без определенной степени предвзятости не обойтись. Действительно, мы сортируем микросостояния естественным, на наш взгляд, образом, учитывая реальные физические условия, а не собственные прихоти. Например, наблюдая за температурой и давлением в стакане воды, мы отбрасываем ту информацию, получить которую можно лишь путем изучения содержимого

данного стакана под микроскопом. Мы определяем средние свойства в относительно небольших областях пространства, потому что так работают наши органы чувств. Определившись с доступными критериями огрубления, мы получаем относительно хорошо определенный набор поддающихся макроскопическому наблюдению величин.

Усреднение величин в небольших областях пространства — это не случайный метод и не специфическая особенность функционирования человеческих органов чувств в противоположность органам чувств гипотетических инопланетян. Это совершенно естественный подход с учетом того, как работают законы физики.¹⁴ Когда я среди нескольких чашек кофе отмечаю те, куда только что вылили ложку молока, и те, в которых молоко уже хорошенько перемешали с основным содержимым, мои решения, к какой категории «состояний кофе» отнести ту или иную чашку, не случайны; я руководствуюсь тем, как кофе, с моей точки зрения, *выглядит* — непосредственно и феноменологически. Итак, даже если, в принципе, наш подход к огрублению микросостояний в макросостояния кажется абсолютно произвольным, в действительности мудрая природа одарила нас умением делать это правильно и разумно.

Прокрутка энтропии в обратную сторону

У сформулированного Больцманом статистического определения энтропии есть одно примечательное следствие: второе начало термодинамики не абсолютно, а всего лишь описывает сценарий развития, вероятность наступления которого существенно выше всех остальных. Если взять систему, находящуюся в макросостоянии с энтропией средней величины, почти все микросостояния, составляющие это макросостояние, будут развиваться в сторону увеличения энтропии, однако найдется некоторое незначительное число микросостояний, эволюция которых пойдет в противоположную сторону.

Это утверждение несложно проиллюстрировать. Снова представьте себе контейнер с газом. Пусть энтропия газа в начальный момент времени очень низкая — все молекулы собрались в центре сосуда. Если просто понаблюдать за развитием событий, то мы увидим, как молекулы летают туда и сюда, сталкиваются друг с другом и со стенками контейнера и в итоге (с громадной вероятностью) формируют конфигурацию с намного более высокой энтропией.

Теперь рассмотрим одно конкретное микросостояние газа в какой-то момент времени после того, как энтропия внутри контейнера стала высокой. Из него сконструируем новое состояние: сохраним положения всех молекул, но скорости заменим на противоположные. Полученное микросостояние также будет

обладать высокой энтропией, ведь оно входит в то же макросостояние, с которого мы начали (если кто-то внезапно поменяет направления движения всех молекул воздуха вокруг вас на противоположные, вы этого даже не заметите; в среднем в любом направлении движется примерно одинаковое число молекул). Начиная с этого состояния каждая молекула «пройдет по своим следам» обратно, то есть их движение будет происходить по тому же пути, по которому они пришли из состояния с низкой энтропией, но в обратную сторону. Для внешнего наблюдателя это будет выглядеть так, словно энтропия начала спонтанно уменьшаться. Процент высокоэнтропийных состояний, способных продемонстрировать это занятное свойство, астрономически мал, но они определенно существуют.

Если мы верим, что фундаментальные физические законы обратимы, то почему бы целой Вселенной не развиваться по такому сценарию? Взять нашу Вселенную в ее сегодняшнем виде: ее описывает какое-то конкретное микросостояние, нам неизвестное, и все же мы знаем кое-что о макросостоянии, которому оно принадлежит. Давайте возьмем и поменяем импульсы всех частиц во Вселенной на противоположные, а в дополнение сделаем любые другие преобразования (например, заменим частицы античастицами), необходимые для совершения полного обращения времени. И посмотрим, что произойдет. Мы должны увидеть, как Вселенная развивается по направлению к «будущему», где ее ждет коллапс, расформирование звезд и планет и общее уменьшение энтропии; это будет история нашей настоящей Вселенной, воспроизведенная в обратную сторону.

Однако мысленный эксперимент поворота стрелы времени в целой Вселенной вспять совсем не так интересен, как тот же самый эксперимент, но проведенный над некоторой подсистемой Вселенной. Причина проста: никто ничего не заметит.

В главе I мы задавали вопрос, как будет выглядеть наша жизнь, если время потечет быстрее или медленнее, и основная трудность, с которой мы столкнулись в поисках ответа на этот вопрос, — нам было непонятно, с чем сравнивать. «Для всего, что только есть в мире, время внезапно начинает идти быстрее» — утверждение бессмысленное; мы измеряем время с помощью синхронизированных повторений, и пока все часы, к какому бы типу они ни принадлежали (включая биологические часы и часы, определяемые субатомными процессами), идут синхронно друг с другом, у нас нет никакой возможности определить, что «скорость времени» изменилась в ту или иную сторону. Только если ход каких-то конкретных часов ускорится или замедлится по сравнению со всеми остальными, это понятие обретет какой-то смысл.

Точно такая же проблема связана и с идеей о «времени, идущем назад». Представляя ситуацию, когда время начинает течь в обратную сторону, мы обычно воображаем, будто процессы в какой-то одной части Вселенной побежали вспять, например в стакане прохладной воды внезапно образовался кубик льда. Однако если *вообще все сущее* начнет «жить в обратную сторону», то с точки зрения внутреннего наблюдателя по сравнению с текущей ситуацией ничего не изменится. Все будет точно так же, как при развитии Вселенной вперед во времени, за исключением странной временной координаты, бегущей в противоположном направлении.

Стрела времени — следствие не того, что «энтропия увеличивается по направлению к будущему», а того, что «поведение энтропии вдоль одного направления во времени кардинально отличается от поведения энтропии вдоль другого». Предположим, во Вселенной есть место, с которым мы никоим образом не соприкасаемся и не взаимодействуем, и там энтропия в том направлении, которое мы сейчас называем будущим, уменьшается. Так же как и мы, люди, обитающие в этом мире обратного времени, ничего особенного вокруг себя не замечают. Они живут в соответствии с обычной стрелой времени и утверждают, что в их прошлом (в те времена, о которых у них есть воспоминания) энтропия была ниже, а в будущем она будет только возрастать. Различие лишь в том, что «будущее» для них — это наше «прошлое», и наоборот. Направление временной координаты во Вселенной абсолютно произвольно, устанавливается нами самими и никакого смысла само по себе не несет. Просто нам удобно говорить, что «время» растет в направлении увеличения энтропии. Важно понимать, что энтропия увеличивается вдоль одного и того же временного направления для всех, кто живет в обозримой Вселенной, если все они договорились о направлении стрелы времени.

Разумеется, все меняется, когда два человека (или две другие подсистемы физической Вселенной), способных общаться и взаимодействовать друг с другом, расходятся во мнениях относительно направления стрелы времени. Возможно ли, чтобы моя стрела времени указывала в другом направлении — совсем не туда, куда указывает ваша?

Деконструкция Бенджамина Баттона

Вторую главу мы открыли несколькими литературными примерами необычной стрелы времени — это были истории о людях или вещах, для которых время текло в обратную сторону. В «Стреле времени» у повествователя были воспоминания о будущем, но не о прошлом; Белая Королева чувствовала боль от

укола еще до того, как булавка касалась ее пальца; а главный герой «Загадочной истории Бенджамина Баттона» Фрэнсиса Скотта Фицджеральда становился моложе с течением времени, хотя воспоминания и опыт у него накапливались обычным образом, как у всех остальных людей. Теперь у нас есть инструменты, благодаря которым мы можем обоснованно доказать, что ничего подобного в реальном мире никогда не произойдет.

Если фундаментальные законы физики обратимы, то, зная точное состояние всей Вселенной (или любой другой замкнутой системы) в произвольный момент времени, мы с помощью этих законов можем определить, в каком состоянии она окажется в любой момент в будущем или какой она была в любой момент в прошлом. Обычно в качестве точки отсчета выбирают «начальный» момент времени, но это, в принципе, может быть и любое другое мгновение. Более того, в текущем контексте, когда нас больше всего волнуют стрелы времени, указывающие во всевозможных направлениях, одного начального момента времени для всего сущего мы и вовсе не найдем. Итак, вот что нам интересно: почему настолько сложно, а то и вовсе невозможно найти состояние Вселенной, обладающее интересующим нас свойством — чтобы по мере нашей эволюции вперед во времени в некоторых ее частях энтропия увеличивалась, а в других уменьшалась?

На первый взгляд кажется, что это элементарно. Возьмите два контейнера с молекулами газа. Создайте в одном из них состояние с низкой энтропией, как в левом верхнем углу на рис. 8.6. Как только молекулы начинают движение, их энтропия возрастает, как и ожидалось. Второй контейнер мы возьмем в состоянии с высокой энтропией, которое получилось из состояния с низкой энтропией в результате временной эволюции. Изменим скорости всех содержащихся в нем молекул на противоположные, как в левом нижнем кадре на том же рисунке. Таким образом, во втором контейнере все будет готово для того, чтобы энтропия начала со временем уменьшаться. Итак, начиная с мгновения, когда вы завершили подготовку, в двух контейнерах энтропия будет меняться в противоположных направлениях.

Однако нам нужно больше. Совсем не интересно наблюдать, как жизнь протекает вдоль разнонаправленных стрел времени в двух не связанных друг с другом мирах. Мы хотим воспроизвести это состояние во *взаимодействующих* системах — таких, которые способны каким-то образом общаться друг с другом.

И это все изменяет.¹⁵ Представьте себе, что мы взяли эти два контейнера: в одном все готово к увеличению энтропии, а во втором — к ее уменьшению. После этого добавим крошечное взаимодействие: скажем, несколько протонов,

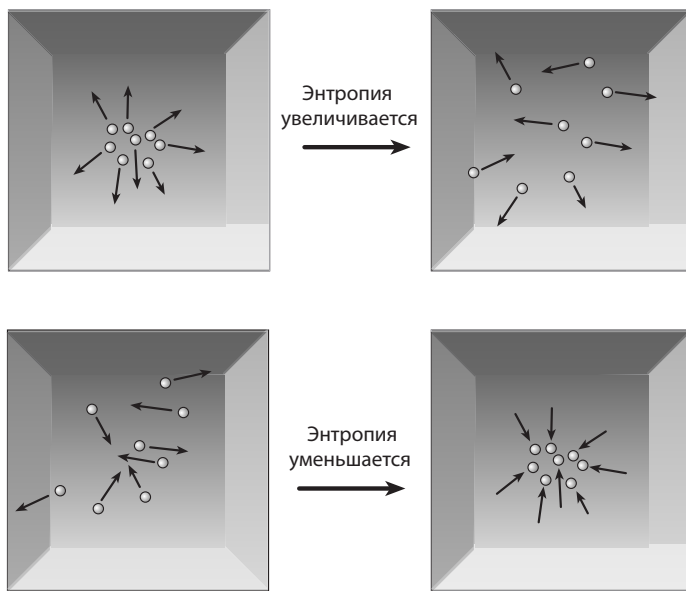


Рис. 8.6. На верхних рисунках мы видим обычное поведение молекул в контейнере, которые из начального состояния с низкой энтропией переходят в конечное высокоэнтропийное состояние. На нижних рисунках мы обратили импульсы всех частиц из финального состояния верхней строки, для того чтобы пустить эволюцию в обратную сторону и добиться снижения энтропии

летающих туда и сюда между двумя контейнерами. Столкнувшись с молекулами в одном контейнере, они будут перелетать в другой, отталкиваться там от новых молекул и т. д. Определенно, тело Бенджамин Баттона взаимодействовало с окружающим миром куда сильнее (так же, как Белая Королева и повествователь в «Стреле времени» Мартина Эмиса).

Это небольшое взаимодействие приведет к легкому изменению скоростей тех молекул, с которыми доведется столкнуться протонам (импульс сохраняется, поэтому других вариантов быть не может). Для контейнера, где энтропия изначально была низкой, это не представляет никакой проблемы, так как для того, чтобы заставить энтропию расти, специальной тонкой настройки проводить не нужно. Однако это полностью разрушает нашу попытку создать во втором контейнере условия, при которых энтропия смогла бы уменьшиться. Даже самое незначительное изменение скорости очень быстро распространится на весь объем газа: одна столкнувшаяся с протоном молекула ударит

другую, та, в свою очередь, врежется еще в пару и т. д. Для того чтобы энтропия в контейнере с газом стала волшебным образом уменьшаться, направления скоростей всех молекул должны быть точно согласованы, и любое дополнительное взаимодействие нарушит это хрупкое согласие. В первом контейнере энтропия будет вполне ожидаемо возрастать, а во втором она как была высокой, так высокой и останется — по сути, эта подсистема будет пребывать в равновесном состоянии. Во взаимодействующих подсистемах Вселенной не могут существовать несовместимые стрелы времени.¹⁶

Энтропия как беспорядок

Мы часто говорим, что энтропия — мера беспорядка. Это всего лишь удобный перевод очень специфического понятия на простой человеческий язык — абсолютно адекватный на первый взгляд, но таящий пару неточностей, которые при определенных обстоятельствах могут всплыть на поверхность. Теперь, когда нам известно настоящее определение энтропии, данное Больцманом, мы можем проверить, насколько близка к истине эта неформальная идея.

Вопрос в том, что следует понимать под «порядком». В отличие от энтропии, порядок — не такое понятие, которому можно с легкостью дать строгое определение. В голове мы ассоциируем «порядок» с целенаправленным расположением объектов тем или иным способом в отличие от состояния хаоса. Действительно, обсуждая энтропию, мы использовали очень похожие выражения. Неразбитое яйцо кажется нам более упорядоченным, чем яйцо, вылитое в чашку и взбитое до однородного состояния.

Энтропия кажется естественным образом связанной с понятием беспорядка, потому что чаще всего путей создания беспорядка больше, чем путей упорядочения объектов. Классический пример роста энтропии — распределение документов на рабочем столе. Вы складываете их в аккуратные стопки — приводите в порядок, в состояние с низкой энтропией, но со временем они расползаются по столу — порядок утерян, энтропия возросла. Конечно, ваш стол нельзя назвать замкнутой системой, но основная идея, думаю, понятна.

С другой стороны, если слишком налегать на ассоциации, можно опровергнуть свои же идеи. Взять, например, молекулы воздуха в комнате, где вы сидите прямо сейчас. Скорее всего, они равномерно распределены по всему объему помещения и образуют высокоэнтропийную конфигурацию. Теперь представьте себе, что все молекулы собрались в центре комнаты в небольшой области всего лишь в несколько сантиметров шириной и к тому же выстроились в фигуру, повторяющую Статую Свободы, только в миниатюрном варианте.

Неудивительно, что энтропия такой конфигурации намного ниже, и все согласятся, что порядка в ней намного больше. Но попробуем зайти еще дальше: пусть газ сожмется еще сильнее и соберется в крохотную аморфную кляксу диаметром не больше одного миллиметра. Поскольку область пространства, в которой теперь сконцентрирован весь газ, стала еще меньше, энтропия новой конфигурации также уменьшилась по сравнению с конфигурацией «Статуя Свободы» (расположить молекулы так, чтобы они образовали статуэтку среднего размера, можно куда большим числом способов, чем собрать их в очень маленькую кляксу). Однако вряд ли кто-то будет утверждать, что аморфная клякса более «упорядочена», чем копия знаменитого памятника, даже если эта клякса действительно крайне мала. Получается, что в данном случае корреляция между упорядоченностью и малой энтропией отсутствует, так что нам следует быть более осторожными с выбором примеров.

Этот пример кажется несколько надуманным, и действительно, совсем не нужно так изощряться, чтобы опровергнуть утверждение об эквивалентности энтропии и беспорядка. Продолжая серию кухонных примеров, рассмотрим масло и уксус. Если вы смешаете эти два ингредиента в чашке, готовя заправку для салата, а затем отставите посудину в сторону, то заметите, что смесь очень быстро перестает быть однородной — масло отделяется от уксуса. Не бойтесь, это не означает, что салатная заправка способна нарушить второе начало термодинамики. Уксус в основном состоит из воды, а молекулы воды прилипают к молекулам масла, и, в силу определенных химических свойств масла и воды, они способны образовывать при этом лишь строго определенные конфигурации. Таким образом, когда вы тщательно перемешиваете масло с водой (или с уксусом), молекулы воды прилипают к молекулам масла в очень специальных конфигурациях, соответствующих состоянию с относительно низкой энтропией. Когда же две субстанции по большей части разделены, отдельные молекулы получают возможность свободно перемещаться между другими молекулами того же типа. При комнатной температуре это приводит к тому, что у масла с водой энтропия выше в конфигурации, когда они разделены, а не когда их старательно перемешали.¹⁷ Порядок спонтанно возникает на макроскопическом уровне, но по сути — на микроскопическом уровне — это банальнейший беспорядок.

В по-настоящему больших системах все еще сложнее. Давайте перейдем от газа, содержащегося в одном небольшом помещении, к облаку газа и пыли астрономических масштабов — скажем, галактической туманности. Она производит впечатление весьма хаотичного и высокоэнтропийного объекта. Однако если размер туманности достаточно велик, она начинает сжиматься под

давлением собственной гравитации, в результате чего формируется звезда — возможно, даже с вращающимися вокруг нее планетами. Поскольку этот процесс подчиняется второму началу термодинамики, мы можем быть уверены в том, что в конце него энтропия выше, чем была в начале (мы старательно учитываем все порожденное коллапсом излучение и другие побочные эффекты). Но звезда с несколькими планетами кажется, по крайней мере с неформальной точки зрения, более упорядоченной системой, чем рассредоточенное межзвездное облако газа. Энтропия увеличилась, но точно так же возросла степень упорядоченности.

Хитрость в данном случае в гравитации. Можно бесконечно говорить о том, как гравитация в пух и прах разносит наше бытовое понимание энтропии, но достаточно будет заметить, что взаимодействие гравитации с другими силами обладает чудесной способностью создавать порядок, одновременно, тем не менее, повышая энтропию — хотя бы и временно. Это великолепная подсказка, дающая понять, как работает Вселенная; жаль только, что пока наших знаний недостаточно для того, чтобы ею воспользоваться.

Пока давайте просто запомним, что связка «энтропия — беспорядок» не идеальна. В этом нет ничего страшного, и мы можем продолжать неформально объяснять понятие энтропии на примере захламленного рабочего стола. Однако что в действительности сообщает нам энтропия, так это сколько микросостояний с макроскопической точки зрения кажутся нам неразличимыми. Иногда это напрямую связано с порядком, а иногда нет.

Принцип безразличия

С больцмановским подходом ко второму началу термодинамики связаны еще два надоедливых вопроса, которые не мешало бы прояснить или, по крайней мере, о которых стоит упомянуть. Итак, у нас есть огромный набор микросостояний, который мы подразделяем на макросостояния, и мы объявляем, что энтропия равна логарифму числа микросостояний в данном макросостоянии. Теперь нам предлагают добавить еще один существенный факт — предположение о том, что все микросостояния, отвечающие одному и тому же макросостоянию, «равновероятны».

Следуя по цепочке рассуждений Больцмана, логично было бы утверждать, что причина возрастания энтропии со временем кроется всего-навсего в количестве микросостояний: куда больше микросостояний образуют макросостояния с высокой энтропией, чем с низкой. Однако это утверждение не имело бы никакого смысла, если бы типичная система проводила намного больше вре-

мени в низкоэнтропийных микросостояниях (а их относительно немного), чем в высокоэнтропийных (которых гораздо больше). Представьте себе, будто у микроскопических законов физики появилось новое свойство: почти все высокоэнтропийные состояния естественным образом переходят в одно из немногих низкоэнтропийных состояний. В таком случае тот факт, что состояний с высокой энтропией больше, не играл бы совершенно никакой роли; мы все равно знали бы, что если подождать достаточно долго, то энтропия в системе понизится.

Несложно вообразить мир с подобными безумными законами физики. Давайте еще раз вернемся к бильярдному столу с катающимися по нему шарами. Шары перемещаются по столу совершенно обычным образом, за одним важным исключением: каждый раз, когда шар врезается в какой-то один бортик стола, он мгновенно к нему прилипает. (Мы предполагаем, что в нашем мысленном эксперименте нет злоумышленника, намазавшего бортик клеем, или еще чего-то подобного, демонстрирующего, тем не менее, обратимое поведение на микроскопическом уровне, — в данном случае мы вводим совершенно новый фундаментальный закон физики.) Обратите внимание на то, что пространство состояний этих бильярдных шаров абсолютно такое же, каким оно было бы в традиционном мире: зная положение и импульс каждого шара, мы можем с идеальной точностью предсказать их будущее. Тонкость лишь в том, что с громадной вероятностью в конце эволюции этой системы все шары будут находиться возле одного из бортиков. Энтропия такой конфигурации чрезвычайно низка; подобных микросостояний совсем немного. В таком мире энтропия могла бы спонтанно уменьшиться даже в замкнутой системе, такой как бильярдный стол.

Совершенно очевидно, что в этом примере, хоть и притянутом за уши, фигурирует новшество: необратимый закон физики. А сама система очень напоминает шахматную доску D из предыдущей главы: там диагональные линии серых квадратиков обрывались после соприкосновения с одним из вертикальных столбцов. Информации о положениях и импульсах всех шаров на этом забавном столе достаточно для того, чтобы предсказывать будущее, но восстановить прошлое она не позволит. Увидев шар, лежащий рядом с бортиком, мы уже не сможем узнать, как долго он там находится.

Реальные же законы физики на фундаментальном уровне обратимы. И если вдуматься, это их свойство гарантирует, что высокоэнтропийные состояния не будут стремиться переходить в состояния с низкой энтропией. Как вы помните, основа обратимости — сохранение информации. Информация, необходимая для описания конкретного состояния, сохраняется, несмотря на то что

система движется, меняясь с течением времени. Это означает, что два разных состояния с течением времени всегда переходят в два разных состояния; если бы в будущем они приходили в какое-то одно состояние, то мы не могли бы восстановить прошлое этого состояния. Поэтому совершенно невозможно, чтобы все высокоэнтропийные состояния стремились в низкоэнтропийные: состояний с низкой энтропией просто-напросто слишком мало, для того чтобы это было реально. Данный результат называется теоремой Лиувилля в честь французского математика Жозефа Лиувилля.

Это почти то, что нам нужно, но не совсем. И, как это часто случается, мы хотим того, что вряд ли сможем в действительности получить. Предположим, что у нас есть какая-то система, мы знаем, в каком макросостоянии она находится, и хотели бы сделать какие-то предсказания относительно ее будущего. Пусть это будет, например, стакан воды с плавающим в ней кубиком льда. Согласно теореме Лиувилля, большинство микросостояний этого макросостояния будут стремиться к увеличению (либо сохранению) энтропии. То же самое говорит нам второе начало термодинамики: кубик льда, скорее всего, растает. Однако система находится ровно в одном конкретном микросостоянии, даже если мы не знаем точно, в каком. Можем ли мы быть уверены, что это не одно из того крошечного набора микросостояний, в которых энтропия способна в любое мгновение внезапно уменьшиться? Как гарантировать, что кубик льда не увеличится, одновременно нагрев окружающую его воду?

Ответ прост: никак. В макросостоянии «вода с кубиком льда» обязательно присутствует какое-то конкретное, очень редкое микросостояние, которое действительно будет эволюционировать по направлению к микросостоянию с меньшей энтропией. Статистическая механика (основанная на атомах версия термодинамики), по сути, наука вероятностная: нам неизвестно, что в точности произойдет; мы можем лишь утверждать, что вероятность определенных событий наиболее высока. По крайней мере, нам хотелось бы иметь возможность делать такие утверждения. В действительности же мы можем говорить лишь о том, что большинство состояний с небольшой энтропией будут развиваться в сторону увеличения, а не уменьшения энтропии. Вы обратили внимание на тонкое различие между «большинство микросостояний данного макросостояния развиваются в сторону увеличения энтропии» и «принадлежащее данному макросостоянию микросостояние с большой вероятностью будет развиваться в сторону увеличения энтропии»? Первое утверждение — это всего лишь подсчет относительного числа микросостояний, обладающих разными свойствами («кубик льда тает» или «кубик льда растет»), однако во втором

мы уже делаем заявление о вероятности какого-то события в реальном мире. Это не одно и то же. В мире больше китайцев, чем литовцев; однако это не означает, что вы с большей вероятностью столкнетесь с китайцем, чем с литовцем, прогуливаясь по улицам Вильнюса.

Другими словами, традиционная статистическая механика основывается на критически важном допущении: если мы находимся в определенном макросостоянии и знаем полный набор составляющих его микросостояний, мы можем предполагать, что *все эти микросостояния одинаково вероятны*. В любых подобных рассуждениях допущения неизбежны, потому что без их помощи нам никак не перейти от банального подсчета количества состояний к точному вычислению вероятностей. У предположения о равной вероятности есть название, которое также отлично подошло бы в качестве заглавия для стратегии поиска спутника жизни, особенно если вы человек эмоциональный: «принцип безразличия». Впервые оно прозвучало в контексте теории вероятностей задолго до того, как на сцене появилась статистическая механика, и озвучил его наш старый друг Пьер-Симон Лаплас. Он был упертым детерминистом, однако, как и любой другой человек, понимал, что чаще всего нам приходится оперировать далеко не всеобъемлющими наборами фактов. Тем не менее ему было интересно, какие выводы человек способен делать в ситуациях неполной информированности.

Так вот, чаще всего лучшее из всего, что мы можем предпринять, — применить принцип безразличия. Если нам не известно ничего, кроме того, что система находится в определенном макросостоянии, мы предполагаем, что все образующие его микросостояния одинаково вероятны (не забывая, однако, об одном принципиальном исключении, которое называется гипотезой о прошлом, — о нем мы поговорим в конце главы). Было бы очень здорово, если бы у нас была возможность *доказать* истинность данного предположения, — и действительно, многие люди пытались это сделать. Например, если бы система в процессе своего движения проходила через все возможные микросостояния (или по крайней мере через достаточно большой их набор, почти полностью охватывающий все возможные микросостояния) за разумный промежуток времени, то у нас были бы определенные основания считать все микросостояния одинаково вероятными. Система, посещающая каждое (или почти каждое) состояние в своем пространстве состояний и, таким образом, перебирающая все (или почти все) возможные исходы, называется *эргодической*. Проблема в том, что даже если система действительно является эргодической (а таковыми являются далеко не все системы), ей потребовалась бы целая вечность, чтобы пройти вблизи всех своих микросостояний. Ну ладно,

может быть, не вечность, но это все равно заняло бы ужасно много времени. Макроскопическая система может пребывать в таком огромном числе состояний, что для того, чтобы перепробовать их все, потребуется время, сопоставимое с возрастом Вселенной.

Настоящая причина существования принципа безразличия заключается в том, что ничего лучше у нас просто нет. Ну и, конечно, потому что он вроде бы работает.

Другие энтропии, другие стрелы

В наших рассуждениях мы дали четкие определения энтропии и стрелы времени. Энтропия — это число состояний, неразличимых с точки зрения макроскопического наблюдателя, а стрела времени возникает, потому что во всей обозримой Вселенной энтропия непрерывно увеличивается. Несмотря на то что, формулируя эти определения, мы отталкивались от свойств реального мира, другие люди, употребляя те же самые термины, могут подразумевать что-то совершенно иное.

Определение энтропии, с которым мы работаем, — то самое, что выгравировано на могильной плите Больцмана, — связывает с каждым индивидуальным микросостоянием определенную энтропию. Главная особенность этого определения — его двухэтапность. Сначала мы принимаем решение о том, что же можно считать «макроскопически неразличимыми» характеристиками состояния, а затем на основании этого разбиваем все пространство состояний на части — набор макросостояний. Для вычисления энтропии микросостояния мы берем общее число макроскопически неотличимых от него микросостояний и вычисляем ее логарифм.

Однако обратите внимание на то, что здесь происходит кое-что очень интересное. Пусть некоторое состояние эволюционирует с течением времени из низкоэнтропийной области в высокоэнтропийную. Пусть мы потеряли всю информацию об этом состоянии, кроме макросостояния, которое оно проходит в данный момент времени. Тогда со временем мы будем обладать все меньшей информацией о микросостоянии, которое рассматриваем. Другими словами, когда нам говорят, что система принадлежит определенному макросостоянию, вероятность того, что она находится в конкретном микросостоянии из этого макросостояния, с увеличением энтропии уменьшается — просто потому, что число вариантов стремительно возрастает. Точность нашей информации о состоянии — насколько верно мы определили микросостояние — уменьшается по мере того, как энтропия увеличивается.

Это подразумевает необходимость иного подхода к определению энтропии, и альтернативный взгляд традиционно связывают с именем Джозайи Уилларда Гиббса (в действительности Больцман исследовал похожие определения, но нам удобнее ассоциировать новый подход именно с Гиббсом, потому что у Больцмана уже один есть). Вместо того чтобы рассматривать энтропию как характеристику состояний, а именно числа других состояний, макроскопически неотличимых от рассматриваемого, — мы могли бы считать энтропию мерой того, что нам известно о состоянии. В больцмановском подходе сведения о том, в каком макросостоянии мы находимся, по мере увеличения энтропии теряют информативность: мы не понимаем, о каком микросостоянии идет речь. Гиббс то же самое рассматривает с другой стороны, и у него энтропия определяется в терминах того, как много мы знаем. Вместо того чтобы фильтровать пространство состояний, мы начинаем с распределения вероятностей, указывающего для каждого возможного микросостояния шанс, что система действительно сейчас находится в нем. Также Гиббс дает нам формулу, аналогичную больцмановской, для расчета энтропии, связанной с данным распределением вероятностей.¹⁸ Ничего округлять не приходится.

И все же ни больцмановскую формулу для энтропии, ни формулу Гиббса нельзя назвать «правильной». Мы сами вводим эти определения, манипулируем ими и используем для того, чтобы лучше понять мир; у каждой свои преимущества и недостатки. Формулу Гиббса часто применяют в прикладных задачах по одной простой причине: ее проще использовать. Поскольку округление отсутствует, дискретного изменения значения энтропии при переходе системы от одного макросостояния к другому не происходит — это важное преимущество, упрощающее решение уравнений.

Однако подход Гиббса обладает двумя заметными недостатками. Один из них эпистемологический: идея «энтропии» здесь связывается с нашими знаниями о системе, а не с самой системой. У людей, старающихся с большой осторожностью рассуждать о том, что же такое на самом деле энтропия, это продолжает вызывать страшную головную боль, и споры насчет обоснованности этого подхода не утихают. Но тот подход, которого я решил придерживаться в этой книге: считать энтропию характеристикой состояния, но не характеристикой наших знаний о нем, — вроде бы позволяет избежать большинства проблемных вопросов.

Второй недостаток куда значительнее: если вам известны законы физики и вы примените их для изучения эволюции «энтропии Гиббса» с течением времени, вы обнаружите, что ее величина не меняется. Если вдуматься, то ни-

какой ошибки здесь нет. Энтропия Гиббса описывает то, насколько хорошо мы понимаем текущее состояние системы. Однако при условии обратимости физических законов данная величина меняться не будет, ведь информация не возникает и не разрушается. Для того чтобы энтропия увеличивалась, в будущем у нас должно стать меньше сведений о состоянии системы, чем есть сейчас; но мы всегда можем прокрутить пленку назад и посмотреть, что было раньше, поэтому такая ситуация невозможна. Вывести второе начало термодинамики или что-то подобное, придерживаясь подхода Гиббса, можно только в том случае, если «забыть» часть информации о движении. Но если копнуть поглубже, то станет очевидно, что с философской точки зрения это то же самое, что огрубление, с которым мы имели дело в больцмановском подходе; просто мы перенесли процедуру «забывания» из пространства состояний на уравнения движения.

Тем не менее практическая польза формулы Гиббса для определенных приложений не вызывает сомнения, и ученые продолжают активно пользоваться ею. Однако и это еще не конец истории; существует несколько других известных подходов к изучению энтропии, а в литературе непрерывно продолжают появляться упоминания о новых. Ничего странного в этом нет; в конце концов, определения Больцмана и Гиббса должны были заменить вполне достойное определение энтропии, данное Клаузиусом, но оно и по сей день используется под названием термодинамической энтропии. После появления на сцене квантовой механики Джон фон Нейман предложил формулу для энтропии, особым образом адаптированную под квантовый мир. Клод Шеннон сформулировал определение энтропии, очень близкое по духу к гиббсоновскому, однако в рамках информационной теории, а не физики — об этом мы поговорим в следующей главе. Смысл не в том, чтобы найти одноединственное истинное определение энтропии. Ученые придумывают понятия, служащие полезным целям в определенных случаях, и это абсолютно нормально. Не позволяйте никому одурачить вас заявлениями о «единственно верном определении», уникальным образом раскрывающем суть такого явления, как энтропия.

Точно так же, как существует несколько определений энтропии, есть множество различных «стрел времени» — еще один потенциальный источник мошенничества. Мы рассматривали термодинамическую стрелу времени, определяемую энтропией и вторым началом термодинамики. Но можно также говорить о космологической стреле времени (Вселенная расширяется), психологической стреле времени (мы помним прошлое, но не будущее), стреле времени излучения (электромагнитные волны расходятся прочь от движущихся

ся зарядов, а не притягиваются к ним) и т. д. Все это разнообразие стрел времени естественным образом подразделяется на несколько категорий. Часть из них, например космологическая стрела, отражает факты об эволюции Вселенной, но тем не менее обладает свойством обратимости. Вполне возможно, что окончательное объяснение термодинамической стрелы времени также раскроет нам глаза на космологическую стрелу (и это действительно кажется весьма вероятным); в то же время с точки зрения микроскопических законов физики расширение Вселенной не представляет никакой загадки в отличие от увеличения энтропии. Другие стрелы, отражающие поистине необратимые процессы, — психологическую стрелу, стрелу излучения и даже стрелу, определяемую квантовой механикой, мы будем исследовать позже. Все они кажутся отражениями одних и тех же глубинных причин, характеризующихся изменением энтропии. Разобраться в подробностях, как они все взаимосвязаны, несомненно, важно и интересно, однако я продолжу использовать термин «стрела времени», имея в виду одну конкретную стрелу — ту, что основывается на увеличении энтропии.

Доказательство второго начала термодинамики

После того как Больцману открылся смысл энтропии как меры количества микросостояний, соответствующих выбранному макросостоянию, он поставил себе новую цель: уже на этом уровне понимания установить происхождение второго начала термодинамики. Я уже рассказывал об основных причинах, почему второе начало действительно работает: состояний с высокой энтропией намного больше, чем с низкой, а разные начальные состояния в процессе развития приходят к разным конечным состояниям, поэтому большую часть времени (с действительно подавляющей вероятностью) можно ожидать, что энтропия будет увеличиваться. Однако Больцман был истинным ученым, и ему недостаточно было лишь этого. Он хотел *доказать*, что второе начало термодинамики следует из его определения.

Довольно непросто вообразить себя на месте ученого, занимающегося исследованием термодинамики в конце XIX века. Эти ребята чувствовали, что неспособность энтропии уменьшаться в замкнутой системе не просто отличная идея, а закон. Мысль о том, что энтропия, *вероятно*, будет увеличиваться, казалась им не более правдоподобной, чем, например, предположение о том, что энергия, *вероятно*, будет сохраняться. И правда, числа настолько

оселомляюще велики, что вероятностные выводы статистической механики можно было бы использовать как абсолютно верные для всех практических задач. Тем не менее Больцман стремился продемонстрировать нечто более определенное.

В 1872 году Больцман (в то время ему было двадцать восемь лет) опубликовал статью, в которой предлагал использовать для доказательства того, что энтропия всегда будет либо увеличиваться, либо оставаться постоянной, кинетическую теорию. Этот результат называется Н-теоремой, которая с того самого времени остается источником множества споров в научной среде. Даже сегодня одни люди уверены, что Н-теорема объясняет незыблемость второго начала термодинамики в реальном мире, тогда как другие полагают ее всего лишь забавным пережитком истории интеллектуальной мысли. Правда в том, что это действительно чрезвычайно интересный результат для статистической механики, но «доказать» второе начало он все же не в силах.

Больцман размышлял следующим образом. В макроскопическом объекте, таком как наполненная газом комната или чашка кофе с молоком, присутствует невероятное количество молекул — более 10^{24} . Он рассматривал такой случай, когда газ относительно разрежен; в этой ситуации столкнуться могут две любые частицы, но редкие события, когда одновременно друг в друга врезаются три или более частиц, можно игнорировать (это на самом деле не вызывающее претензий предположение). Нам необходимо найти способ, как охарактеризовать макросостояние всех этих частиц. Итак, вместо того чтобы отслеживать положения и импульсы всех молекул (что дало бы нам полное описание микросостояния), давайте следить за средним числом частиц, обладающих данным положением и импульсом. Например, в контейнере с газом, находящемся в равновесии при определенной температуре, среднее число частиц в каждой точке равно, а также существует некоторое распределение импульсов, такое, что средняя энергия частиц дает нам нужную температуру. Имея на руках лишь эту информацию, можно вычислить энтропию газа. А затем (если вы Больцман) доказать, что энтропия газа, пребывающего не в равновесном состоянии, будет со временем возрастать, пока не достигнет максимального значения, после чего останется на этом уровне. Очевидно, что мы вывели второе начало термодинамики.¹⁹

Очевидно, однако, что здесь что-то не чисто. Мы начали с микроскопических законов физики, совершенно инвариантных относительно направления времени, — они работают одинаково хорошо как вперед во времени, так и назад. А Больцман утверждал, что получил на основе этих законов результат, абсо-

лютно точно не обладающий свойством инвариантности и приводящий к очевидной стреле времени, что подтверждается словами об увеличении энтропии по направлению к будущему. Как же можно получить необратимые результаты исходя из обратимых предположений?

Данное возражение было громко и ясно высказано Йозефом Лошмидтом в 1876 году, после того как схожие сомнения появились у Уильяма Томсона (лорда Кельвина) и Джеймса Клерка Максвелла. Лошмидт был близким другом Больцмана, взявшим молодого физика под свою опеку в Вене в 1860-е годы. И он не проявлял никакого скептицизма по отношению к атомной теории; в действительности Лошмидт первым сумел точно оценить физические размеры молекул. Однако ему было невдомек, как Больцман сделал вывод об асимметрии времени, не прибегая к помощи его предположений.

Доводы, стоящие за тем, что нам сегодня известно под названием «возражения Лошмидта об обратимости», просты. Рассмотрим какое-то конкретное микросостояние, соответствующее макросостоянию с низкой энтропией. Оно с огромной вероятностью будет развиваться в сторону высокоэнтропийных состояний. Но инвариантность относительно отражения времени гарантирует, что для каждого такого пути развития существует другой допустимый путь — зеркальное отражение оригинала, — начинающийся в высокоэнтропийном состоянии и эволюционирующий навстречу низкой энтропии. В пространстве всех процессов, которые могут происходить с течением времени, можно найти ровно столько же систем, начинающих существование в условиях высокой энтропии и приходящих в состояние с низкой энтропией, как и систем, переходящих из низкоэнтропийного состояния к высокоэнтропийному. На рис. 8.5, где показано пространство состояний, разделенное на макросостояния, мы нарисовали траекторию, берущую начало в макросостоянии с очень низкой энтропией. Однако траектория не появляется из ниоткуда; она должна была существовать и до того, и в ее истории должно было быть состояние с высокой энтропией, — явный пример пути, вдоль которого энтропия уменьшилась. Очевидно, что если вы верите в динамику, инвариантную относительно отражения времени (как все эти ученые), то совершенно невозможно доказать, что энтропия всегда только увеличивается.²⁰

Однако Больцман *что-то* доказал, и, насколько можно было судить, в его рассуждениях не было математических или логических ошибок. Скорее всего, в его доводы каким-то образом проникло предположение об асимметричности времени, даже если эта идея не была высказана явно.

Действительно, так и случилось. Одним из важнейших шагов в аргументах Больцмана было предположение о молекулярном хаосе — *Stosszahlansatz* по-немецки, что можно буквально перевести как «гипотеза о числе столкновений». Суть его в том, что мы считаем движение молекул произвольным, то есть они не строят коварных заговоров с целью подчинить свое движение определенной схеме. Но для того, чтобы энтропия уменьшалась, именно это и требуется — коварный заговор! Таким образом, Больцман, в сущности, доказал, что энтропия может увеличиваться только в том случае, если с самого начала отмести любые альтернативные варианты. В частности, он предполагал, что импульсы любой пары частиц до того, как они столкнутся, независимы или не скоррелированы между собой. Однако это «до» как раз и иллюстрирует то самое предположение об асимметричности времени; если частицы никак не скоррелированы до столкновения, то после между ними установится взаимосвязь или корреляция. Вот так предположение о необратимости прокралось в доказательство.

Если взять систему в состоянии с низкой энтропией и позволить ей развиваться по направлению к увеличению энтропии (например, подождать, пока растает кубик льда), то после того, как все закончится, между молекулами можно будет найти огромное количество корреляций. В частности, среди них будут корреляции, гарантирующие, что если мы инвертируем все импульсы, то система вернется в низкоэнтропийное начальное состояние. В рассуждениях Больцмана такая возможность учтена не была. Он доказал, что энтропия никогда не будет уменьшаться, если отбросить обстоятельства, при которых энтропия могла бы уменьшиться.

Когда законов физики недостаточно

В конечном счете совершенно ясно, каким будет итог всех этих споров — по крайней мере, в нашей наблюдаемой Вселенной. Лошмидт прав; действительно, в наборе всех возможных процессов уменьшение энтропии встречается так же часто, как и увеличение. Однако прав и Больцман, поскольку статистическая механика убедительно объясняет, почему с подавляющей вероятностью мы будем встречать низкоэнтропийные условия, переходящие в высокоэнтропийные, а не наоборот. Вывод очевиден: помимо того что динамикой управляют физические законы, необходимо также предполагать, что Вселенная начала свое существование в состоянии с низкой энтропией. Это дополнительное предположение, *граничное условие*, которое не является частью

законов физики (во всяком случае, пока мы не переходим к обсуждению того, что происходило до Большого взрыва, а такую дискуссию вряд ли можно было услышать в 1870-х годах). К сожалению, такого вывода было недостаточно для ученых того времени, и в последующие годы дискуссии о статусе H-теоремы заполнили ученый мир.

В 1876 году Больцман опубликовал ответ на возражение Лошмидта об обратимости, который, впрочем, ничуть не прояснил ситуацию. Определенно, Больцман согласился с тем, что в словах Лошмидта есть смысл, и признал, что второе начало термодинамики, несомненно, обладает вероятностными свойствами — ведь если кинетическая теория верна, то оно попросту не может быть абсолютным. В начале статьи Больцман явно говорит об этом:

Поскольку энтропия уменьшалась бы при прохождении системы через эту последовательность в обратном направлении, мы убеждаемся, что факт увеличения энтропии во всех физических процессах нашего мира невозможно было бы подтвердить, отталкиваясь исключительно от природы сил, действующих между частицами; это должно быть следствием начальных условий.

Можно ли найти заявление более недвусмысленное, чем это: «факт увеличения энтропии во всех физических процессах нашего мира... должен быть следствием изначальных условий»? Однако, не в силах расстаться с идеей о доказательстве, не зависящем от начальных условий, он тут же заявляет:

Тем не менее нам не нужно предполагать существование специального типа начальных условий для того, чтобы предоставить механическое доказательство второго начала термодинамики, — если мы готовы принять статистическую точку зрения.

«Принятие статистической точки зрения», судя по всему, означает, что он согласен с утверждением о подавляющей вероятности такого развития событий, при котором энтропия будет увеличиваться, хотя это будет происходить не всегда. Но что он имеет в виду, говоря, что нам не нужно предполагать существование специального типа начальных условий? Следующие предложения подтверждают худшие опасения:

Хотя вероятность любого индивидуального неоднородного состояния (соответствующего низкой энтропии) эквивалентна вероятности любого индивидуального однородного состояния (соответствующего высокой энтропии), существует намного больше однородных состояний, чем неодно-

родных. Следовательно, если начальное состояние выбирается случайным образом, то можно с уверенностью говорить, что система, скорее всего, будет развиваться по направлению к однородному состоянию, а энтропия будет увеличиваться.

Первое предложение истинно, но второе содержит очевидную ошибку. Если выбирать начальное состояние случайным образом, то оно не «скорее всего, будет развиваться по направлению к однородному состоянию», а вероятнее всего *само* окажется однородным (высокоэнтропийным). Почти все из небольшого числа низкоэнтропийных состояний будут стремиться к увеличению энтропии. В противоположность этому, лишь крайне малая часть состояний с высокой энтропией будет развиваться по сценарию уменьшения энтропии; в то же время самих высокоэнтропийных состояний существует невообразимо больше. Общее число низкоэнтропийных состояний, эволюционирующих по направлению к увеличению энтропии, равно, как и утверждал Лошмидт, общему числу высокоэнтропийных состояний, теряющих энтропию в процессе эволюции.

Чтение трудов Больцмана вызывает стойкое ощущение того, что этот ученый на несколько шагов опережал свое время: он видел детали, заключенные в любых приводимых доводах, куда лучше любого собеседника. Однако, перебирая эти детали, он все же не всегда умел вовремя остановиться; более того, печально известно его непостоянство в выборе рабочих гипотез, на которых он основывал ту или иную работу. Тем не менее не нам его судить. Ведь прошло уже 140 лет, а мы до сих пор не можем прийти к согласию относительно того, что же такое энтропия и в каких терминах правильно рассуждать о втором начале термодинамики.

Гипотеза о прошлом

Невозможно установить происхождение постоянного увеличения энтропии и соответствующей этому стрелы времени в пределах наблюдаемой Вселенной, опираясь только на основополагающие обратимые законы физики. Требуется некое граничное условие в начале времен. Чтобы понять, почему второе начало термодинамики действительно работает в реальном мире, недостаточно всего лишь подойти к основополагающим физическим законам со статистической точки зрения; мы должны также предположить, что обзримая Вселенная начала свое существование в состоянии очень низкой энтропии. Дэвид Альберт заботливо присвоил данному предположению удобное и простое название: «Гипотеза о прошлом».²¹

Гипотеза о прошлом представляет собой несущее огромную значимость исключение из принципа безразличия, на который мы ссылались выше. Согласно принципу безразличия, если нам известно, в каком макросостоянии пребывает система, то мы должны считать все составляющие данное макросостояние микросостояния одинаково вероятными. Это предположение здорово помогает прогнозировать *будущее* на основе статистической механики. Но если попытаться применить его для реконструкции *прошлого*, результат будет плачевным.

Больцман привел убедительные аргументы, объясняющие, почему энтропия увеличивается: возможностей оказаться в высокоэнтропийном состоянии куда больше, чем в низкоэнтропийном, поэтому большинство микросостояний в макросостояниях с низкой энтропией эволюционируют по направлению к высокоэнтропийным макросостояниям. Однако направление времени в этом объяснении никак не фигурирует. Следуя этой логике, высокую энтропию в большей части микросостояний из произвольного макросостояния мы будем наблюдать не только в будущем — в прошлом они также когда-то прошли через этап высокой энтропии.

Рассмотрим все микросостояния из произвольного макросостояния с небольшой энтропией. Подавляющее большинство этих состояний когда-то обладали *высокой* энтропией. Так обязательно должно быть, потому что состояний с низкой энтропией не так много, чтобы все рассматриваемые микросостояния могли произойти из них. Таким образом, высока вероятность того, что типичное микросостояние с небольшой энтропией — «статистическая флуктуация» высокоэнтропийного прошлого. Этот довод эквивалентен утверждению о том, что энтропия в будущем должна увеличиваться, но только в противоположном направлении по времени.

В качестве примера снова возьмем контейнер с перегородкой, содержащий 2000 частиц газа. Изначально у системы низкая энтропия (80 % частиц скопились в одной половине контейнера), но затем она начинает увеличиваться, как показано на рис. 8.3. На рис. 8.7 мы дополнили график роста энтропии в будущем, показав, как энтропия эволюционирует по направлению к прошлому. Поскольку базовое правило динамики нашей системы («каждая частица каждую секунду с вероятностью 0,5 % может перелететь на другую сторону») не зависит от направления времени, неудивительно, что высокая энтропия наблюдается и справа, и слева относительно нашей стартовой точки, то есть и в прошлом, и в будущем.

Вы можете возразить: очень маловероятно, что система, начавшая существование в равновесном состоянии, вдруг начнет терять энтропию. Это верно; скорее всего, энтропия либо возрастет, либо останется примерно на том же

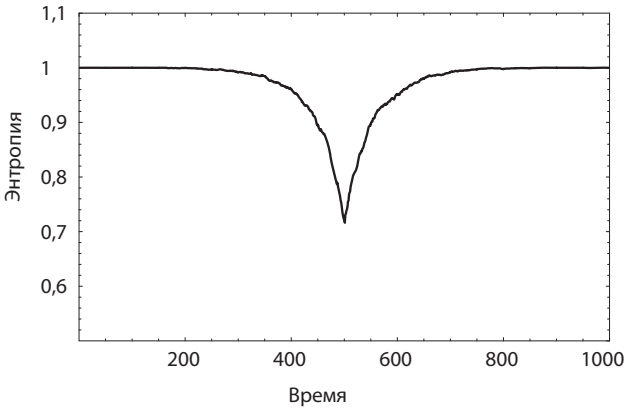


Рис. 8.7. Энтропия контейнера с газом, разделенного перегородкой. «Граничное» условие наложено в момент времени, равный 500, когда 80 % частиц находятся в одной половине контейнера, а 20 % — в другой (низкоэнтропийное макросостояние). Энтропия увеличивается в обоих направлениях от этой точки: и при эволюции в сторону будущего, и при движении к прошлому

уровне. Однако учитывая, что мы, в принципе, настаиваем на существовании низкоэнтропийного состояния, высока вероятность того, что данное состояние представляет на кривой энтропии минимум — с более высокими значениями как в прошлом, так и в будущем.

По крайней мере, такая ситуация была бы наиболее вероятной, если бы, кроме принципа безразличия, нам больше не на что было опереться. Проблема в том, что никто не считает, будто энтропия реальной Вселенной ведет себя так, как показано на рис. 8.7. Все согласны с утверждением о том, что завтра энтропия будет выше, чем сегодня, и ни у кого не возникает сомнений, что сегодня она выше, чем была вчера. Это всеобщее убеждение поддерживается вескими аргументами, которые мы подробно обсудим в следующей главе: если сейчас мы живем в минимуме кривой энтропии, то никакие наши воспоминания о прошлом не могут быть достоверными, а осмыслить такой вариант Вселенной попросту невозможно.

Итак, если нам правда интересно, какие механизмы работают под капотом нашего мира, мы должны в дополнение к принципу безразличия учитывать также и гипотезу о прошлом. Когда дело доходит до выбора микросостояний из нашего макросостояния, мы не считаем их все одинаково вероятными: мы выбираем только те микросостояния, которые совместны с условием намного

более низкой энтропии в прошлом (а их очень, очень мало!), и лишь им приписываем равные значения вероятности.²²

Однако эта стратегия поднимает важнейший вопрос: почему мы считаем, что гипотеза о прошлом верна? Во времена Больцмана никто и понятия не имел об общей теории относительности или Большом взрыве, не говоря уж о квантовой механике или квантовой гравитации. И все же вопрос остается, хотя и приобретает более конкретную форму: почему непосредственно после Большого взрыва у Вселенной была такая низкая энтропия?

Примечания

- ¹ Почти такой же пример рассматривается Уилером в *Wheeler, J. A. Time Today / In: Physical Origins of Time Asymmetry / J. J. Halliwell, J. Pérez-Mercader, W. H. Zurek, eds. — Cambridge: Cambridge University Press, 1994, p. 1–29*. В этой книге авторство эксперимента приписывается Паулю Эренфесту. В сосуде, который Уилер называет «урной Эренфеста», на каждом шаге ровно одна частица перелетает на противоположную сторону, тогда как в нашем обсуждении у каждой частицы есть небольшой шанс пролететь сквозь отверстие в перегородке.
- ² Когда справа находятся две молекулы, первой из них может быть любая из 2000, а второй — любая из оставшихся 1999. Таким образом, логично предположить, что существует $1999 \times 2000 = 3\,998\,000$ подобных комбинаций. Однако здесь кроется ошибка, так как две молекулы справа не должны там появиться в каком-то определенном порядке (заявление о том, что «справа находятся молекулы под номерами 723 и 1198» эквивалентно заявлению, что «справа находятся молекулы 1198 и 723»). Следовательно, первоначальный результат нужно поделить на два, и тогда мы получим правильный ответ: существует 1 999 000 способов перенести две молекулы в правую часть, оставив в левой 1998. Если мы перемещаем в правую половину три молекулы, то порядок вычислений следующий: $1998 \times 1999 \times 2000$ необходимо разделить на 3×2 различных последовательностей. Вы уже видите закономерность: для четырех частиц произведение $1997 \times 1998 \times 1999 \times 2000$ следует разделить на $4 \times 3 \times 2$ и т. д. У величин, которые мы получаем в результате, есть особое название: «биномиальный коэффициент». Они представляют собой число способов, которыми можно выбрать определенное количество объектов из более крупного набора.
- ³ Разумеется, здесь мы подразумеваем логарифм по основанию 10, так как в общем случае в качестве основания может использоваться любое число. «Логарифм по основанию 2» от 8 (то есть 2^3) равен 3; логарифм по основанию 2 от 2048 (то есть 2^{11}) равен 11. Захватывающие подробности вы найдете в приложении.
- ⁴ В числовом выражении k составляет около $3,2 \cdot 10^{-16}$ эрг на кельвин, где эрг — единица энергии, а кельвин, конечно же, — единица температуры (в большинстве справочников вам будет встречаться другое значение; причина в том, что мы используем логарифмы по основанию 10, а формулу чаще всего записывают с использованием натуральных логарифмов). Говоря «температура есть мера средней кинетической энергии движущихся

в веществе молекул», в действительности мы имеем в виду, что «средняя энергия на степень свободы составляет половину произведения температуры на постоянную Больцмана».

⁵ Мы обозначили логарифм «lg», так как он десятичный. Для обозначения логарифма по другому основанию, например по основанию 2, в русскоязычной литературе применяется обозначение «log». — *Примеч. пер.*

⁶ Настоящая история физики куда запутаннее, чем базовые понятия, удивляющие своей красотой. Больцман додумался до идеи $S = k \lg W$, но для ее описания он использовал совсем другие символы. В знакомую нам форму ее облек Макс Планк, также предложивший выгравировать уравнение на могильном камне Больцмана; кроме того, именно Планк впервые предложил использовать константу, которую мы сегодня зовем постоянной Больцмана. И чтобы окончательно все запутать, скажу, что уравнение на могильном камне представляет собой совсем не то, что обычно называют «уравнением Больцмана». Под этим понимается другое открытое Больцманом уравнение, описывающее эволюцию распределения большого числа частиц в пространстве состояний.

⁷ Для того чтобы данное определение имело реальный смысл, должно выполняться важное требование: мы должны уметь подсчитывать микросостояния разного типа и определять, сколько из них соответствуют тому или иному макросостоянию. Когда микросостояния формируют дискретный набор (как распределения частиц между двумя половинами одного контейнера), это звучит достаточно просто; намного сложнее справляться с непрерывными пространствами состояний (такими, как состояния реальных молекул с их положениями и импульсами или практически любых других объектов из реального мира). К счастью, в контексте двух важнейших описаний динамики — классической механики и квантовой механики — существует превосходно определенная «мера» пространства состояний, что позволяет нам вычислить величину W , по крайней мере, в принципе. В некоторых конкретных примерах наше понимание пространства состояний может размываться, и тогда следует соблюдать особую осторожность.

⁸ *Feynman, R. P. The Character of Physical Law. Cambridge, MA: MIT Press, 1964.*

⁹ Я знаю, о чем вы думаете: «Не знаю, как вы, но когда я вытираюсь, большая часть воды оказывается на полотенце; совсем не пятьдесят на пятьдесят». Это действительно так, но причина в том, что структура волокон хорошего пушистого полотенца предоставляет намного больше места для размещения молекул воды, чем ваша гладкая кожа. По той же самой причине высушить полотенцем волосы намного сложнее, чем кожу, а попытка вытереться листком бумаги далеко не столь эффективна, как применение полотенца.

¹⁰ Не всегда, но по крайней мере в определенных обстоятельствах. Представьте себе, что в нашем контейнере с газом каждая молекула в левой части «желтая», а каждая молекула в правой части «зеленая». По всем остальным параметрам они абсолютно идентичны. Энтропия такой конфигурации довольно низка, но если бы мы позволили двум цветам смешиваться, то она бы быстро повысилась. И все же никакой полезной работы в данной системе не происходило бы.

¹¹ Трение и шум в реальной жизни вездесущи, и за это нужно благодарить все то же второе начало термодинамики. При столкновении двух бильярдных шаров молекулы, из которых они состоят, взаимодействуют друг с другом, и существует лишь крайне ограниченный набор вариантов, когда все молекулы реагируют так, что шары упруго отскакивают друг

от друга, никак не затрагивая окружающий мир. В подавляющем большинстве случаев молекулы шаров также взаимодействуют с окружающим их воздухом, в результате чего мы слышим звук соударения двух шаров. Любые личины, которые рассеяние энергии принимает в повседневной жизни, — трение, сопротивление воздуха, шум и т. д. — все это проявления тенденции к увеличению энтропии.

- ¹² Поразмыслите еще вот над чем: в следующий раз, когда вам захочется сыграть в лотерею, где нужно выбрать пять чисел от 1 до 36 в надежде, что во время розыгрыша пронумерованные шары выпадут в выбранной вами последовательности, поставьте на «1, 2, 3, 4, 5». Выпадение этой последовательности настолько же вероятно, как выпадение любой другой «случайной» последовательности чисел. (Разумеется, ваш выигрыш повлечет за собой огромный общественный протест, так как люди будут уверены, что результаты подтасовали. Так что обогатиться вам, скорее всего, так и не удастся, даже если вам действительно повезет.)
- ¹³ Строго говоря, поскольку для каждой частицы существует бесконечное количество возможных положений и бесконечное количество возможных импульсов, число микросостояний, соответствующих каждому макросостоянию, также бесконечно. Однако все возможные положения и импульсы частицы в левой половине контейнера можно поставить во взаимнооднозначное соответствие возможным положениям и импульсам в правой половине; несмотря на то что оба этих множества бесконечны, это «одинаковые бесконечности». Таким образом, мы имеем полное право говорить об одинаковом количестве возможных состояний каждой частицы в любой половине контейнера. То, чем мы занимаемся, в действительности называется вычислением «объема пространства состояний» для конкретного макросостояния.
- ¹⁴ Несмотря на риск увлечься излишними абстракциями, попробую немного раскрыть это утверждение. Альтернативой поиску среднего в небольшой области физического пространства мог бы стать поиск среднего в небольшой области пространства импульсов, то есть мы могли бы говорить о среднем положении частиц с определенным значением импульса, но не наоборот. Однако это безумие: такую информацию невозможно получить путем обычных макроскопических наблюдений. Причина кроется в том, что в реальном мире частицы взаимодействуют (сталкиваются друг с другом), когда они находятся поблизости друг от друга в пространстве, но когда две разнесенные на достаточное расстояние частицы обладают одинаковыми импульсами, ничего особенного не происходит. Две соседние частицы способны взаимодействовать независимо от того, каковы их относительные скорости; обратное неверно (никакого заметного взаимодействия между двумя частицами, разделенными несколькими световыми годами пространства, не будет, какими бы ни были их импульсы). Таким образом, сами законы физики выбирают «изменение средних свойств в небольшом регионе пространства» как самый естественный подход к изучению мира.
- ¹⁵ Схожее доказательство приводит в своей книге математик Норберт Винер (*Wiener, N. Cybernetics: or the Control and Communication in the Animal and the Machine. Cambridge, MA: MIT Press, 1961.*).
- ¹⁶ Однако есть одна лазейка. Вместо того чтобы проводить тонкую настройку первоначальных условий системы, подготавливая почву для уменьшения энтропии, а затем разрешать ей взаимодействовать с внешним миром, мы могли бы с самого начала задаться

таким вопросом: учитывая, что система не избежит общения с внешним миром, какое состояние нам следует создать в ней прямо сейчас, чтобы в будущем энтропия уменьшилась? Такой тип граничного условия в будущем можно себе представить. Однако это не совсем то, о чем идет речь. В данном случае мы имеем дело не с автономной системой с естественным образом обращенной стрелой времени, а с тонкой подстройкой всех частиц Вселенной так, чтобы энтропия некоторой подсистемы уменьшалась. Эта подсистема не будет выглядеть обычным объектом Вселенной, отличающимся от всех остальных объектов лишь направлением времени; наоборот, нам будет казаться, будто весь мир сговорился и подталкивает ее в состояние с низкой энтропией.

¹⁷ Обратите внимание на это маленькое замечание: «при комнатной температуре». Здесь кроется хитрость. При достаточно высокой температуре смеси (температуре, при которой начинается испарение) скорость отдельных молекул настолько возрастает, что вода перестает прилипать к маслу, и конфигурация с хорошо перемешанными ингредиентами снова становится высокоэнтропийной. Статистическая механика в полном беспорядка реальном мире — ужасно сложная штука, и лучше оставить ее профессионалам.

¹⁸ Вот эта формула: для каждого возможного микросостояния x определим p_x как вероятность того, что система находится в этом микросостоянии. Тогда энтропия представляет собой сумму по всем возможным микросостояниям x величин $k p_x \lg p_x$, где k — постоянная Больцмана.

¹⁹ Больцман действительно вычислял величину H , представляющую собой разницу между максимальной и фактической энтропией, — отсюда и название теоремы. Однако это название было присвоено ей позднее, и сам Больцман не использовал букву H . Он называл эту величину E , что делает ситуацию еще более непонятной. Первоначальная версия статьи Больцмана об H -теореме датируется 1872 годом; обновленная версия, в которой он учел критику Лошмидта и других, была опубликована в 1877 году. Мы не в силах должным образом оценить замечательное историческое развитие этих идей; с различными точками зрения вы можете ознакомиться в работах: *Von Baeyer, H. C. Warmth Disperses and Time Passes: The History of Heat.* — New York: Modern Library, 1998; *Lindley, D. Boltzmann's Atom: The Great Debate That Launched a Revolution in Physics.* — New York: Free Press, 2001; *Cercignani, C. Ludwig Boltzmann: The Man Who Trusted Atoms.* — Oxford: Oxford University Press, 1998. Более математический подход изложен в работах *Uffink, J. Boltzmann's Work in Statistical Physics. The Stanford Encyclopedia of Philosophy* (редакция Winter 2008) / Edward N. Zalta (ed.), 2004 (<http://plato.stanford.edu/archives/win2008/entries/statphys-boltzmann/>); *Brush, S. G. (ed.). The Kinetic Theory of Gases: An Anthology of Classic Papers with Historical Commentary.* — London: Imperial College Press, 2003. В частности, любой выпускник Йельского университета будет горестно оплакивать недолгую жизнь, отведенную вкладу Гиббса; для восстановления душевного равновесия см. *Rukeyser, M. Willard Gibbs.* — Woodbridge: Ox Bow Press, 1942.

²⁰ Обратите внимание, что Лошмидт не говорит о равном числе процессов с увеличивающейся и уменьшающейся энтропией, удовлетворяющих одним и тем же начальным условиям. Рассматривая обращение времени, мы меняем местами начальные и конечные условия; таким образом, Лошмидт указывает лишь на то, что существует одинаковое количество процессов с увеличивающейся и уменьшающейся энтропией. Если же ограничиваться исключительно множеством низкоэнтропийных начальных условий, то

можно успешно доказать, что энтропия в большинстве случаев будет увеличиваться. Но при этом мы не уходим от идеи асимметричности времени — она присутствует здесь благодаря тому, что мы берем именно начальные состояния, но не конечные, с низкой энтропией.

²¹ *Albert, D. Z. Time and Chance.* — Cambridge, MA: Harvard University Press, 2000; см. также *Price, H. On the Origins of the Arrow of Time: Why There Is Still a Puzzle about the Low Entropy Past*, в *Contemporary Debates in Philosophy of Science* / С. Hitchcock (ed.) — Malden: Wiley-Blackwell, 2004, p. 240–255 (и множество других прекрасных примеров). Несмотря на то что я преподношу гипотезу о прошлом как нечто (надеюсь) абсолютно очевидное, ее статус по сей день остается темой дебатов. Щепотку скептицизма вы найдете в работах *Callender, C. There Is No Puzzle About the Low Entropy Past*, в *Contemporary Debates in Philosophy of Science* / С. Hitchcock (ed.) — Malden: Wiley-Blackwell, 2004, p. 240–255; *Earman, J. The ‘Past Hypothesis’: Not Even False* // *Studies in History and Philosophy of Modern Physics*, 2006, 37, p. 399–430.

²² Читатели, изучавшие статистическую механику, могут задаваться вопросом, почему в действительности им не приходилось заниматься ничем подобным. Ответ прост: это не имеет никакого значения при условии, что мы пытаемся прогнозировать будущее. При применении статистической механики для предсказания будущего поведения системы предсказания, базирующиеся на сочетании принципа безразличия с гипотезой о прошлом, неотличимы от предсказаний, которые мы получаем, исходя из одного лишь принципа безразличия. Пока мы не делаем никаких предположений о специальных граничных условиях в будущем, все в порядке.

Глава 9

Информация и жизнь

Вам следует назвать ее энтропией по двум причинам. Во-первых, ваша функция неопределенности использовалась в статистической механике под этим названием, так что у нее уже есть имя. Во-вторых, и это важнее, никто не знает, что же такое эта энтропия на самом деле, поэтому в споре преимущество всегда будет на вашей стороне.

*Из письма Джона фон Неймана
Клоду Шэннону¹*

В знаменитой сцене из романа «По направлению к Свану» Марселя Пруста повествователя охватывает тоска и уныние. Мать предлагает ему чай, и он с неохотой соглашается его выпить. Это действие и вкус традиционного бисквита «Мадден» заставили героя непроизвольно окунуться в воспоминания детства.

И вдруг воспоминание ожило. То был вкус кусочка бисквита, которым в Комбре каждое воскресное утро... угощала меня, размочив его в чае или в липовом цвету, тетя Леония, когда я приходил к ней поздороваться... И как только я вновь ощутил вкус размоченного в липовом чае бисквита, которым меня угощала тетя... в то же мгновение старый серый дом фасадом на улицу, куда выходили окна тетиной комнаты, пристроился, как декорация, к флигельку окнами в сад, выстроенному за домом для моих родителей... А стоило появиться дому — и я уже видел городок, каким он был утром, днем, вечером, в любую погоду, площадь, куда меня водили перед завтраком, улицы, по которым я ходил, далекие прогулки в ясную погоду.²

«По направлению к Свану» — первый из семи томов магнум-опуса Пруста *À la recherche du temps perdu*, что переводится как «В поисках утраченного времени». Интересно, что Скотт Монкриф, первый переводчик опуса, позаимствовал для названия на английском языке строку из тридцатого сонета Шекспира *Remembrance of Things Past* («Память дней былых»).

Разумеется, совершенно естественно хранить воспоминания о прошлом. Что еще мы могли бы помнить? Определенно, не будущее. Из всех проявлений стрелы времени самое очевидное и самое важное для нашей повседневной

жизни — это воспоминания, а конкретнее, тот факт, что помнить можно то, что уже было, но не то, что ждет нас впереди. Возможно, главное различие в нашем восприятии текущего момента и момента, который вот-вот наступит, заключается как раз в накоплении воспоминаний, вынуждающих нас двигаться вперед, в будущее.

Пока все мои рассуждения сводились к тому, что все важные различия между прошлым и будущим можно свести к одному основополагающему принципу — второму началу термодинамики. Из этого следует, что нашу способность вспоминать прошлое, но не будущее, в конечном счете можно будет объяснить в терминах энтропии, в частности, с помощью гипотезы о прошлом, которая гласит, что в ранней Вселенной наблюдалось состояние чрезвычайно низкой энтропии. Изучение тонкостей этого механизма позволит нам погрузиться в исследование взаимосвязей между энтропией, информацией и жизнью.

Картинки и воспоминания

Одна из проблем, непременно возникающих при обсуждении «памяти», заключается в том, что мы очень многого не знаем о работе человеческого мозга, не говоря уж о том, что такой феномен, как сознание, до сих пор остается для нас по большей части загадкой.³ Нашим текущим целям это, тем не менее, не помеха. Обсуждая воспоминания прошлого, мы заинтересованы не столько в определении, что такое память с точки зрения человека, сколько в общем значении реконструкции событий прошлого исходя из текущего состояния мира. Мы ничего не потеряем, если будем рассматривать простые и понятные механические записывающие устройства или даже такие бесхитростные артефакты, как фотографии и учебники истории. (Мы делаем явное предположение о том, что люди являются частью земного бытия, поэтому под человеческим разумом можно, в принципе, понимать человеческий мозг, который так же, как и все остальное, подчиняется законам физики.)

Итак, представьте себе, что в вашем распоряжении есть нечто, что вы считаете достоверным отражением прошлого, например фотография, сделанная в ваш десятый день рождения. Вы уверенно заявляете: «Можно не сомневаться, что в тот день на мне была красная рубашка, ведь на фотографии с праздника я запечатлен именно в красной рубашке». Мы сейчас не рассматриваем возможность того, что фотография могла быть отретуширована или изменена еще каким-то способом. Вопрос в том, имеете ли вы право делать выводы касательно прошлого, основываясь на существовании данной фотографии в настоящем?

В частности, предположим, что вы не купились на всю эту чепуху с гипотезой о прошлом. Все, что у вас есть, — это некоторая информация о текущем макросостоянии Вселенной, в том числе тот факт, что в ней существует эта конкретная фотография, вы обладаете определенными воспоминаниями, и т. п. Вы совершенно точно не знаете текущее *микросостояние* — вам неизвестны положения и импульсы всех частиц в мире, — однако вы можете воззвать к принципу безразличия и связать равные значения вероятности со всеми микросостояниями, совместимыми с текущим макросостоянием. И разумеется, вы знакомы с законами физики — возможно, не с полной Теорией Обо Всем На Свете, но ваших знаний достаточно, чтобы делать выводы об окружающем мире. Достаточно ли всего этого — текущего макросостояния, включающего фотографию, принципа безразличия и законов физики — для того, чтобы обоснованно утверждать, что в свой десятый день рождения вы действительно нарядились в красную рубашку?

Нет, и даже близко нет. Нам кажется, что этой информации вполне достаточно, и мы, живя обычной жизнью, даже не задумываемся о том, какие невообразимо тонкие взаимосвязи существуют между повседневными объектами. Грубо говоря, мы полагаем, что подобная фотография представляет собой очень специфичную конфигурацию составляющих ее молекул (так же, как и воспоминание о соответствующем событии, хранящееся в нашем мозге). Никому и в голову не приходит, что молекулы могут случайным образом собраться так, чтобы образовать именно эту конкретную фотографию, — это астрономически маловероятно. Если же, однако, в прошлом действительно произошло событие, соответствующее изображению на фотографии, и в этот момент присутствовал человек с камерой, то существование снимка становится весьма вероятным. Следовательно, логично говорить о том, что раз мы видим эту фотографию сегодня, то на том дне рождения все было именно так, как представлено на ней.

Все эти утверждения вполне разумны, но проблема в том, что они даже наполовину не подтверждают истинность последнего вывода. Причина проста, и она не изменилась с прошлой главы, где мы обсуждали контейнер с газом. Действительно, фотография — это очень редкая и маловероятная конфигурация молекул. Тем не менее история, с помощью которой мы пытаемся «объяснить» ее существование: детальное воспроизведение событий прошлого, включающее дни рождения и камеры, и фотографии, сохраняющиеся в неизменном виде до сегодняшнего дня, — еще *менее* вероятна, чем сам снимок. По крайней мере если под «вероятностью» понимать ту самую равную вероятность, которую мы назначили всем возможным микросостояниям, совместимым с нашим текущим макросостоянием.

Попробуйте посмотреть на это с такой точки зрения: вы никогда не стали бы апеллировать к какой-то хитро закрученной истории из *будущего*, чтобы объяснить существование некоего предмета в настоящем. Мы можем рассуждать о том, что ждет в будущем нашу фотографию с дня рождения, и строить относительно нее определенные планы: вот бы поместить ее в альбом или повесить в рамке на стену... Но в то же время нам приходится мириться с огромной степенью неопределенности этих начинаний, ведь фотография может потеряться, может упасть в лужу и выцвести, а то и сгореть во время пожара. Все это абсолютно правдоподобные экстраполяции текущего состояния в будущее, пусть и привязанные к настоящему специфическим якорем, роль которого играет фотография. Так почему же мы с такой уверенностью рассуждаем о событиях прошлого, приводя в качестве доказательства собственной правоты всего лишь какую-то фотографию?

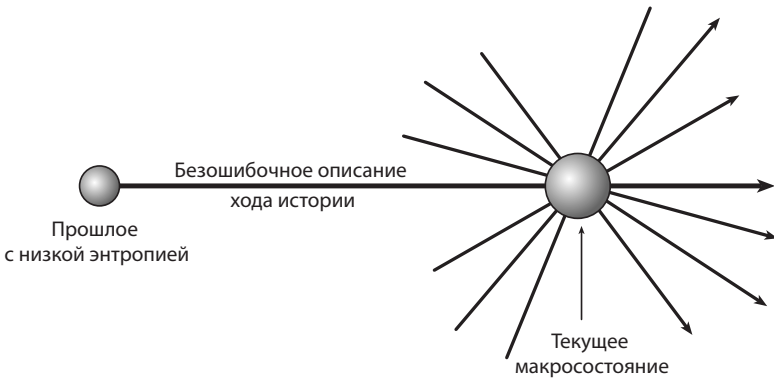


Рис. 9.1. Траектории, проходящие через (часть) пространства состояний и совместимые с нашим текущим макросостоянием. Мы можем безошибочно восстановить ход истории лишь в том случае, если в дополнение к информации о текущем макросостоянии примем на вооружение гипотезу о прошлом

Разгадка, разумеется, кроется в гипотезе о прошлом. На самом деле мы не применяем принцип безразличия ко всему текущему мировому макросостоянию — мы рассматриваем лишь те микросостояния из него, которые совместимы с условием существования очень низкой энтропии в прошлом. Именно это и порождает различия в наших трактовках того, какой смысл несут фотографии или воспоминания или любые другие виды записей о прошлом. На вопрос: «Каким путем данная конкретная фотография с наибольшей вероятностью могла образоваться в пространстве всех возможных путей эволюции

Вселенной?»), скорее всего, мы получим ответ, что она появилась как случайная флуктуация высокоэнтропийного прошлого. И доказать это можно с помощью тех же аргументов, которые убеждают нас в истинности идеи о росте энтропии в будущем. Однако вместо этого мы задаем вопрос: «Каким способом можно с наибольшей вероятностью получить данную фотографию в пространстве всех возможных эволюций Вселенной, начинающихся из очень низкоэнтропийного прошлого?» И тогда мы совершенно естественным образом приходим к тому, что, скорее всего, нам нужно будет пройти через все промежуточные этапы, включающие день рождения, красную рубашку, камеру и все остальное. Рисунок 9.1 иллюстрирует общий принцип: требуя соблюдения условия чрезвычайно низкой энтропии в начале времен, мы значительно сокращаем пространство допустимых траекторий, благодаря чему получаем возможность рассматривать лишь те варианты эволюции, в которых наши записи служат (по большей части) надежным отражением событий прошлого.

Когнитивная нестабильность

Я по своему опыту знаю, что далеко не всем эти аргументы кажутся убедительными. Очень многие спотыкаются на утверждении — критически важном, замечу! — о том, что в самом начале у нас нет ничего, кроме информации о текущем макросостоянии да незначительных сведений о фотографиях, или учебниках истории, или сохранившихся в мозге воспоминаниях. Мы на интуитивном уровне чувствуем, что обладаем знаниями не только о настоящем, но *знаем* что-то о прошлом, потому что видим его, — так, как, в принципе, не способны увидеть будущее. Это кажется нам совершенно нормальным. Хороший пример — космология, просто потому что скорость света играет важнейшую роль, и поэтому мы в буквальном смысле «смотрим на события прошлого». Человека, пытающегося восстановить историю Вселенной, может соблазнить идея посмотреть, скажем, на космическое микроволновое фоновое излучение и заявить: «Я вижу, какой Вселенная была почти 14 миллиардов лет назад; мне не нужно прибегать ни к какой мудреной гипотезе о прошлом, чтобы объяснить, каким путем я пришел к своим выводам».

Однако это неверно. Исследуя реликтовое излучение (или свет от любого другого удаленного источника, или фотографическое свидетельство предположительно свершившегося в прошлом события), мы не смотрим непосредственно на события прошлого. Мы наблюдаем за конкретными фотонами здесь и сейчас. Когда мы с помощью радиотелескопа сканируем небо и обнаруживаем тепловое излучение с температурой около 2,7 кельвина, практически одно-

родное во всех направлениях, в действительности мы видим излучение, проходящее сквозь наше *текущее* местоположение. Чтобы «заглянуть в прошлое», эту информацию необходимо экстраполировать в обратную сторону. Нельзя исключать вероятность того, что это однородное излучение пришло к нам из чрезвычайно неоднородного прошлого — но такого, где температуры, и доплеровские смещения, и гравитационные эффекты оказались так хитро и тонко между собой скоррелированы, что сумели создать очень однородный набор фотонов, который в конечном счете и прибыл в наше время. Вы можете заявить, что такой процесс крайне маловероятен, однако процесс, полученный из него обращением времени, — это в точности то, что мы ожидаем получить, если возьмем типичное микросостояние из нашего текущего макросостояния и проэволюционируем его по направлению к Большому сжатию. Суть в том, что у нас в равной степени отсутствует прямой эмпирический доступ как к прошлому, так и к будущему, если только мы не согласимся признать истинной гипотезу о прошлом.

На самом деле с гипотезой о прошлом нужно не просто «мириться» — она нам жизненно необходима, если мы хотим, чтобы в нашей интерпретации истории Вселенной действительно был смысл. Представьте себе, что мы полностью отказались от этой идеи и оперируем исключительно теми данными, которые в состоянии предоставить нам текущее макросостояние, включая конфигурацию нашего мозга, фотографии в фотоальбоме и учебники истории. В этом случае мы бы говорили, что с большой вероятностью и в прошлом, и в будущем Вселенная находилась и будет находиться в состоянии с высокой энтропией, а все низкоэнтропийные детали настоящего являются всего лишь случайными флуктуациями. Это уже звучит не слишком хорошо, но в действительности все еще хуже. В таких обстоятельствах все источники информации, которые мы традиционного используем для подтверждения истинности нашего понимания законов природы, или, если уж на то пошло, все умственные состояния (или письменная аргументация), с помощью которых мы обосновываем и математику, и логику, и научные методы, относились бы к множеству вещей, появившихся на свет таким вот случайным образом. Другими словами, подобные предположения не дают нам абсолютно никаких причин верить, будто у нас есть возможность хоть что-то доказать; более того, они ставят под сомнение допустимость самих подобных предположений.

Дэвид Альберт называл подобные парадоксы условиями *когнитивной нестабильности*: мы сталкиваемся с предположениями, само существование которых развеивает любые доказательства того, что данные предположения могут быть истинны.⁴ Это безвыходная ситуация, с которой невозможно спра-

виться, если не призвать на помощь информацию, выходящую за рамки текущего момента. Без гипотезы о прошлом мы попросту не в состоянии рассказать о мире ничего вразумительного. Получается, нам без нее никуда — и, следовательно, мы не имеем права оставлять попытки найти теорию, которая даст нам полноценное объяснение этой гипотезы.

Причина и следствие

Вся эта история с тем, как мы пользуемся воспоминаниями и записями, отличается невообразимой временной асимметрией: мы всегда апеллируем только к гипотезе о прошлом, но никогда — о будущем. Строя прогнозы, мы не отбрасываем никакие микросостояния из числа совместимых с нашим текущим макросостоянием лишь на том основании, что они не удовлетворяют какому-то конкретному будущему граничному условию. А что, если попробовать сделать так? В главе 15 мы исследуем космологические положения Голда, согласно которым Вселенная в конечном счете прекратит расширяться и примется сжиматься обратно, стрела времени перевернется, а энтропия начнет уменьшаться, знаменуя приближение Большого сжатия. При таком развитии событий мы не заметим никакой разницы между фазой сжатия и текущей фазой расширения, потому что они идентичны (по крайней мере, статистически). Наблюдатели, которым доведется жить в фазе сжатия, не будут считать, что в их Вселенной творится что-то странное, — как и мы не считаем сейчас. Они будут думать, что это *мы* жили «в обратную сторону».

Намного интереснее представить себе, какие следствия могут иметь небольшие ограничения на допустимые траектории в ближайшем будущем. По сути, это та самая ситуация, когда мы бы могли делать надежные *пророчества* о будущих событиях. Когда Гарри Поттеру сообщают, что либо он убьет Волдеморта, либо Волдеморт убьет его, в действительности это означает наложение очень строгих ограничений на допустимое пространство состояний.⁵

Крэйг Каллендер весьма красочно описывает жизнь, в которой присутствует граничное условие в будущем. Вообразите, что предсказатель с внушительным послужным списком (намного более впечатляющим, чем успехи профессора Трелони из книг о Гарри Поттере) говорит вам, что однажды все существующие в мире яйца Фаберже окажутся в ящике вашего комода и именно в этот момент ваша жизнь оборвется. Не очень правдоподобное предсказание: сами вы не увлекаетесь коллекционированием дорогого антиквариата, да и не склонны впускать в свою квартиру посторонних людей. Однако каким-то образом благодаря последовательностям непредсказуемых и невероятных совпадений эти

яйца все же умудряются проникать к вам в спальню и в ящик комода. Вы запираете ящик, но замок разбалтывается и открывается; вы просите владельцев яиц следить за тем, чтобы сокровища не перемещались, но действия воров и разнообразные случайные события оборачивают происходящее так, что яйца продолжают стекаться в вашу комнату. Вы получаете посылку, ошибочно доставленную по вашему адресу, — она должна была прибыть в музей, а внутри оказывается яйцо. В страхе вы выбрасываете его в окно, но оно отскакивает от уличного фонаря под совершенно невообразимым углом и залетает обратно в комнату, приземляясь точно в ящик комода. В этот момент у вас случается сердечный приступ, и вы умираете.⁶

Никакие законы физики не нарушаются на протяжении этой последовательности невероятных событий. На каждом шаге происходят события, которые нельзя назвать невероятными — они просто очень маловероятны. В результате наше привычное понимание причинно-следственной связи искажается, и мы уже не уверены, что есть причина, а что следствие. В повседневной жизни мы руководствуемся впитанным с молоком матери убеждением о том, что причина предшествует следствию: «По полу растеклось разбитое яйцо, потому что я только что уронил его», а не «Я только что уронил яйцо, потому что на полу должна оказаться лужица из желтка и белка с осколками скорлупы». В общественных науках, где порой бывает сложно установить причинно-следственную связь между различными явлениями социума, данное интуитивное понимание возведено в ранг принципа. Когда между двумя свойствами существует тесная взаимосвязь, не всегда очевидно, какие роли они играют: где причина, где следствие, а может быть, оба они стали результатом какого-то совершенно постороннего события? Обнаружив, что люди, которые счастливы в браке, едят больше мороженого, какой вывод вы сделаете? Что мороженое скрепляет брак или что счастье заставляет чаще покупать мороженое? Тем не менее в определенных ситуациях сомнений не возникает ни у кого, а именно когда одно свойство проявляется раньше по времени, чем второе. Уровень образования ваших дедушек и бабушек может влиять на ваш заработок, однако вашему заработку не под силу изменить образование ваших предков.⁷

Из-за граничных условий в будущем, то есть утверждений о том, что в будущем обязательно должны произойти какие-то конкретные, хоть и маловероятные события, наше понимание причин и следствий переворачивается с ног на голову. То же самое относится и к идее свободной воли. В конце концов, возможность «выбирать», каким образом жить дальше и как действовать в будущем, — это отражение нашего полнейшего непонимания конкретного микросостояния Вселенной; если бы неподалеку появился демон Лапласа,

то он бы совершенно точно знал, каких поступков ожидать от нас. Граничное условие в будущем — это одна из форм предопределения.

Все это кажется какими-то научными бреднями, в которые совершенно не стоит углубляться, — ведь мы не думаем, что на наше текущее микросостояние наложены какие-то ограничения просто потому, что в будущем должно выполниться некое граничное условие. Мы уверены, что причина всегда предшествует следствию. И тот факт, что в *прошлом* существовало условие, ныне ограничивающее наше текущее микросостояние, у нас сомнений не вызывает. Однако для микроскопических законов физики никакого различия между прошлым и будущим нет, и в их формулировках мы не найдем упоминаний о том, что одно событие может «вызвать» другое или что мы можем «выбирать», как нам действовать в будущем, несмотря на то что свои поступки в прошлом изменить уже невозможно. Получается, что без гипотезы о прошлом мы попросту не в состоянии осмыслить окружающий мир, и все же она отвечает далеко не на все вопросы.

Демон Максвелла

Давайте немного отвлечемся и снова вернемся к песочнице для мысленных экспериментов — кинетической теории XIX века. В конечном итоге это приведет нас к пониманию связи между энтропией и информацией, что, в свою очередь, прольет наконец-то свет на проблему памяти.

Самым известным мысленным экспериментом в области термодинамики, вероятно, остается демон Максвелла. Джеймс Клерк Максвелл предложил своего демона — куда более знаменитого, чем демон Лапласа, и по-своему не менее пугающего — в 1867 году, когда гипотезу о существовании атомов только-только начали применять к проблемам термодинамики. Первая работа Больцмана на эту тему вышла в свет лишь в 1870-х годах, поэтому у Максвелла не было возможности сослаться на определение энтропии в контексте кинетической теории. Но ему была известна формулировка второго начала термодинамики, предложенная Клаузиусом: при взаимодействии двух систем теплота перетекает от более горячей к более холодной, что в итоге приводит к выравниванию температур. Также Максвелл достаточно хорошо разбирался в том, что такое атомы, чтобы понимать, что «температура» представляет собой меру их средней кинетической энергии. Однако благодаря своему демону он сумел придумать способ, как увеличить разницу между температурами систем без привлечения дополнительной энергии, — очевидно, в нарушение второго начала термодинамики.

Схема проста: речь идет о том же самом контейнере с перегородкой, который нам уже давно стал близким и родным. Но вместо небольшого отверстия, через которое молекулы могут случайным образом пролетать в ту или другую сторону, перегородка оснащена крохотной дверцей — такой маленькой и легкой, что, для того чтобы открыть или закрыть ее, не приходится прилагать никаких сколько-нибудь заметных усилий. У дверцы сидит демон, наблюдающий за всеми молекулами по обе стороны от перегородки. Если справа к дверце приближается быстро движущаяся молекула, демон пропускает ее на левую половину; если медленная молекула подлетает слева, то демон пропускает ее на правую половину. Однако если медленная молекула приближается к дверце справа или быстрая слева, то демон запирает дверцу и не позволяет им перелететь на противоположную сторону перегородки.

Совершенно очевидно, к чему это все в итоге приведет: постепенно и без каких-либо затрат энергии молекулы, обладающие высокой энергией, соберутся в левой половине контейнера, а молекулы с низкой энергией скопятся справа. Если в самом начале слева от перегородки у вещества была такая же температура, как и справа, то со временем эти величины начнут расходиться: в левой половине будет становиться все горячее, а правая половина начнет остывать. Однако это же прямое нарушение формулировки второго начала термодинамики, предложенной Клаузиусом! Что же здесь происходит?

Если система из высокоэнтропийного состояния с одинаковой температурой газа во всем объеме контейнера гарантированно переходит в низкоэнтропийное (то есть события развиваются по такому сценарию для любого начального состояния, а не только для некоторых, подвергшихся тонкой настройке), то это означает, что мы имеем дело с ситуацией, в которой количество возможных начальных состояний во много раз превышает количество конечных. Но это попросту невозможно, если мы говорим о динамических законах, которые сохраняют информацию и обладают свойством обратимости. Даже представить себе нельзя, что все эти разнообразные первоначальные состояния смогут уместиться в крохотном пространстве конечных состояний. Определенно, это чем-то компенсируется: пока энтропия газа уменьшается, где-то еще энтропия возрастает. И при таком раскладе единственным местом, где мы могли бы наблюдать возрастающую энтропию, остается сам демон.

Однако как же это работает? Ведь с энтропией демона вроде бы ничего не происходит: он как сидел тихо-спокойно в начале эксперимента, наблюдая за газом и пропуская через перегородку контейнера только подходящие молекулы, так и продолжает заниматься этим в конце — все так же тихо и спокойно. Поразительно, но ученым потребовалось громадное количество времени —

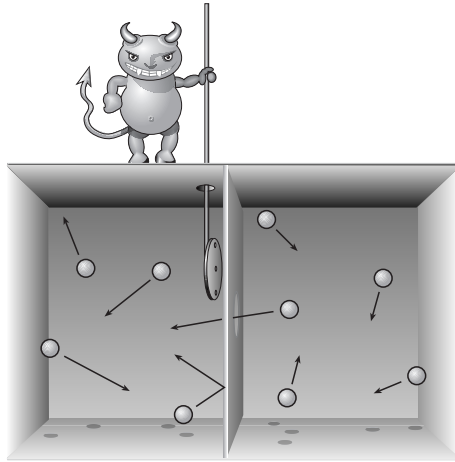


Рис. 9.2. Пропуская высокоэнергичные молекулы справа налево и низкоэнергичные молекулы слева направо, демон Максвелла заставляет теплоту перетекать от холодной системы к горячей, явно нарушая второе начало термодинамики

больше века, — чтобы понять, с какой точки зрения в действительности следует рассматривать эту проблему. Критическую связь между информацией, собираемой демоном, и его энтропией сумели обнаружить венгерско-американский физик Лео Силард и физик из Франции Леон Бриллюэн (ученые, которые впервые в истории применили новую теорию — квантовую механику — для решения задач, представляющих практический интерес). Однако лишь благодаря вкладу двух физиков и специалистов по вычислительной технике, трудившихся в ИВМ, — Рольфа Ландауэра (1961) и Чарльза Беннетта (1982) — стало окончательно понятно, почему в соответствии со вторым началом термодинамики энтропия демона просто не может не увеличиваться.⁸

Записываем и стираем

Многие попытки разгадать загадку демона Максвелла концентрировались на способах измерения скоростей молекул, пролетающих мимо него. Ландауэр и Беннетт сделали огромный концептуальный скачок вперед, изучив вопрос о том, каким образом демон *записывает* эту информацию. В конце концов, демону необходимо запоминать — хотя бы на микросекунду, — какие молекулы он должен пропустить на другую сторону, а перед какими дверцу открывать нельзя. Если бы демон просто с самого начала знал, какие молекулы какими

скоростями обладают, ему бы вообще не пришлось измерять скорости; следовательно, суть проблемы кроется не в процессе измерения.

Таким образом, мы должны снабдить демона каким-то средством для фиксации скоростей молекул — возможно, он носит с собой блокнотик, а мы для удобства рассуждений вообразим, что места в этом блокнотике достаточно, чтобы записать всю необходимую информацию. (От того, будем мы рассматривать большие или маленькие блокноты, ничего не изменится; главное, чтобы блокнот не был бесконечно большим.) Это означает, что состояние блокнота тоже следует учитывать при вычислении энтропии полной системы, состоящей из газа и демона. В частности, в самом начале листы блокнота должны быть чистыми и готовыми к тому, чтобы демон записывал на них скорости молекул.

Однако пустой блокнот представляет собой не что иное, как низкоэнтропийное граничное условие в прошлом. Это всего лишь гипотеза о прошлом, только в ином облики — соответствующем миру демона Максвелла. Таким образом, если это действительно так, то энтропия полной системы газ/Демон изначально совсем не так высока, как принято было считать. И демон не уменьшает энтропию объединенной системы; он всего лишь переносит ее из одного места в другое, одновременно меняя и состояние газа, и состояние блокнота.

Этот аргумент может показаться некоторым читателям бесосновательным. Действительно, разве не может демон взять и *стереть* записи в блокноте после того, как дело сделано? И тогда блокнот вернется в первоначальное состояние, а энтропия газа уменьшится.

Именно в этом и кроется суть озарения Ландауэра и Беннета: нельзя просто так взять и стереть записи в блокноте. По крайней мере, невозможно стереть информацию, если вы являетесь частью замкнутой системы, живущей в соответствии с обратимыми динамическими законами. В такой формулировке результат становится вполне достоверным: если бы информацию можно было бесследно уничтожать, то как бы мы могли восстановить историю вплоть до какого-то предыдущего состояния? Если в системе можно стирать информацию, то это означает, что либо фундаментальные законы необратимы — и тогда наличие демона, умеющего уменьшать энтропию, не должно никого удивлять, либо система на самом деле не замкнута. В последнем случае «уничтожение информации» является процессом переноса энтропии во внешний мир. (В случае стирания настоящих записей карандашом в реальном мире энтропия в основном принимает форму тепла, пыли и крохотных осметков ластика.)

В конечном итоге возможны два варианта: либо демоническая версия гипотезы о прошлом (у демона в самом начале в руках чистый блокнот, обладающий низкой энтропией, и демон переносит энтропию газа в блокнот), либо процесс переноса энтропии во внешний мир, необходимый для того, чтобы стирать информацию в блокноте. В любом случае можно перевести дыхание: второе начало термодинамики в безопасности. И кстати, в ходе расследования мы неожиданно открыли дверь в захватывающий мир взаимосвязей между информацией и энтропией.

Информация — физическая величина

Несмотря на то что, обсуждая динамические законы физики, мы то и дело произносили слово «информация» — обратимые законы сохраняют информацию, само это понятие все так же кажется несколько абстрактным по сравнению с беспорядочным миром энергии, тепла и энтропии. Один из уроков, которые преподает нам демон Максвелла, заключается в том, что это мнение ошибочно. Информация — физическая величина. А именно благодаря наличию информации мы можем заставлять систему производить полезную работу, которая в противном случае была бы нам недоступна.

Лео Силард наглядно продемонстрировал это на упрощенной модели демона Максвелла. Вообразите, что в контейнере с газом содержится одна-единственная молекула; следовательно, «температура» представляет собой всего лишь энергию этой одинокой молекулы газа. Если это вся информация, которой мы обладаем, то заставить молекулу произвести полезную работу у нас не получится; она хаотично летает от стенки к стенке, как камешек в жестяном ведре. Однако теперь представьте себе, что у нас появилась дополнительная информация: нам известно, в какой половине контейнера находится молекула — в правой или в левой. Основываясь на этом знании и применив хитрые манипуляции, возможные лишь в мысленном эксперименте, мы можем заставить молекулу работать. Для этого нам нужно просто-напросто быстренько вставить поршень в противоположную половину контейнера. Молекула врежется в поршень и нажмет на него, а мы используем движение поршня для выполнения полезной работы, например поворота маховика.⁹

Обратите внимание на то, какую важную роль в эксперименте Силарда играет информация. Если бы мы не знали, в какой половине контейнера находится молекула, то не догадывались бы, в какую половину нужно вставить поршень. Если бы мы случайным образом выбирали, в какую половину контейнера вставить поршень, то в половине случаев он бы выталкивался наружу,

а в половине — затягивался внутрь. В среднем никакой полезной работы бы не производилось. Информация, которой мы обладаем, позволила нам извлечь энергию из системы, и так, казалось бы, находящейся на максимальном уровне энтропии.

Повторю еще раз, чтобы ни у кого не оставалось сомнений: ни в одном из этих мысленных экспериментов мы не нарушили второе начало термодинамики. Да, эти эксперименты выглядят так, будто мы действительно нашли способ нарушить этот физический закон, — но стоит принять во внимание критически важную роль информации, как все становится на свои места. Информация, которую собирает и обрабатывает демон, должна каким-то образом учитываться в любой согласованной и непротиворечивой истории, включающей энтропию.

Конкретная связь между энтропией и информацией была установлена в 1940-х Клодом Шэнноном, инженером и математиком, трудившимся в «Bell Labs». ¹⁰ Одна из задач, которую решил Шэннон, состояла в поиске эффективных и надежных способов отправки сигналов по зашумленным каналам. Он высказал идею о том, что одни сообщения несут эффективно больше информации, чем другие, просто потому, что они более «удивительные» или неожиданные. Если я скажу, что солнце завтра взойдет на востоке, то не передам вам никакой особой информации, потому что этот факт и так уже был вам известен. Однако если я скажу, что завтра максимальная температура составит ровно 25 °C, то это уже будет сообщение, содержащее больший объем информации, потому что без этого вы бы не знали, какую точно температуру ожидать завтра.

Шэннон нашел способ, как формализовать эту интуитивную идею об эффективном информационном наполнении сообщения. Предположим, что мы рассматриваем набор из всех возможных сообщений определенного типа, которые мы могли бы получить (правда же, это навевает воспоминания о «пространстве состояний», с которым мы работали при обсуждении физических систем, а не сообщений?). Например, если речь идет о результатах подбрасывания монеты, то возможных сообщений только два: «орел» или «решка». До того как мы получаем сообщение, оба варианта одинаково вероятны; тот факт, что мы получаем сообщение, означает, что мы узнаем ровно один бит информации.

Если же, с другой стороны, нам рассказывают о максимальной температуре завтра днем, то набор возможных сообщений становится куда больше: скажем, это может быть любое целое число от -273 и до плюс бесконечности, представляющее собой температуру, выраженную в градусах Цельсия (температура -273 °C соответствует абсолютному нулю). Однако не все эти варианты

одинаково вероятны. Летом в Лос-Анджелесе наиболее вероятна температура 27–28 °С, тогда как зафиксировать температуру –13 или +4324 °С относительно сложно. Узнав, что завтрашняя температура лежит в области этих «невероятных» значений, мы действительно получаем огромный объем информации (по всей видимости, связанной с какой-то глобальной катастрофой).

Грубо говоря, информационное наполнение сообщения *возрастает* по мере того, как вероятность получения данного сообщения *уменьшается*. Однако Шэннону хотелось большей конкретики в формулировках. В частности, он хотел показать, что если мы получим два сообщения, совершенно независимых друг от друга, то общая полученная информация будет равна сумме информации, извлеченной из каждого индивидуального сообщения. (Вспомните, что, когда Больцман разрабатывал свою формулу энтропии, одно из свойств, которые он стремился воспроизвести, заключалось в следующем: энтропия полной системы равна сумме энтропий подсистем.) Попробовав то и это, Шэннон выяснил, что самым правильным будет взять логарифм вероятности получения конкретного сообщения. В конечном итоге он пришел к такому результату: количество информации, содержащееся в сообщении, равно логарифму вероятности того, что сообщение примет данный вид, со знаком минус.

Многое из этого наверняка кажется вам удивительно знакомым, и это не случайность. Больцман связывал энтропию с логарифмом числа микросостояний в определенном макросостоянии. Однако с учетом принципа безразличия число микросостояний в макросостоянии очевидно пропорционально вероятности того, что одно из них будет случайным образом выбрано из всего пространства состояний. Низкоэнтропийное состояние аналогично удивительному, наполненному информацией сообщению, в то время как знание о том, что вы находитесь в высокоэнтропийном состоянии, не дает вам никакой особой информации. С учетом всего вышесказанного, если мы поставим в соответствие «сообщение» и макросостояние, в котором пребывает сейчас система, связь между энтропией и информацией будет очевидной: информация — это разность максимально возможной энтропии и фактической энтропии макросостояния.¹¹

Есть ли у жизни смысл?

Неудивительно, что идеи о связи между энтропией и информацией приходят на ум сразу же, стоит нам начать рассуждать о взаимоотношениях между термодинамикой и жизнью. Нельзя сказать, что эти взаимоотношения так уж просты

и очевидны; хотя в их наличии никто не сомневается, ученые все еще не пришли к общему мнению относительно того, что же такое «жизнь», не говоря уж о том, как все это работает. Эта область исследований находится сейчас в фазе активного развития, объединяя такие направления, как биология, физика, химия, математика, вычислительная техника и изучение сложных систем.¹²

Не пытаюсь пока давать точное определение понятию «жизнь», мы можем обсудить вопрос, который логично было бы сформулировать следующим образом: имеет ли смысл такое понятие, как «жизнь», с термодинамической точки зрения? Сразу скажу, что ответ: «да». Но в истории науки можно было услышать и противоположные заявления, хотя, конечно, звучали они из уст не признанных и уважаемых ученых, а креационистов, целью которых было сбросить дарвиновскую теорию естественного отбора с пьедестала единственно верного объяснения эволюции жизни на Земле. Один из их аргументов основывается на неправильном толковании второго начала термодинамики, который они читают как «энтропия всегда увеличивается», делая вывод об универсальной тенденции к увеличению беспорядка и общему угасанию всех естественных процессов. Чем бы ни была жизнь, совершенно очевидно, что это сложная и хорошо организованная штука. Как же в таком случае ее можно увязать с естественной тенденцией к росту беспорядка?

Разумеется, никакого противоречия здесь нет. Из доводов креационистов совершенно четко следует, что и существование холодильников невозможно; следовательно, эти доводы попросту неверны. Второе начало термодинамики не говорит нам, что энтропия всегда увеличивается. Согласно этому закону, энтропия всегда увеличивается (или остается постоянной) в замкнутой системе — системе, которая никак заметно не взаимодействует с внешним миром. Совершенно очевидно, что жизнь не может быть замкнутой системой; живые организмы находятся в непрерывном взаимодействии с внешним миром. Это эталоны открытых систем! Вот, собственно, и всё — на этом вопрос можно закрыть и продолжать жить своей жизнью.

Однако существует и другая, более замысловатая версия этого креационистского аргумента, которая звучит уже совсем не так глупо. Несмотря на то что она также абсолютно неверна, полезно рассмотреть ее, для того чтобы понять, где именно кроется ошибка. Этот изощренный довод базируется на количественных оценках: разумеется, живые существа представляют собой открытые системы, поэтому теоретически они могут где-то уменьшать свою энтропию при условии, что в другом месте она будет увеличиваться. Однако как узнать, что увеличения энтропии во внешнем мире достаточно, чтобы отчитаться за низкую энтропию живых существ?

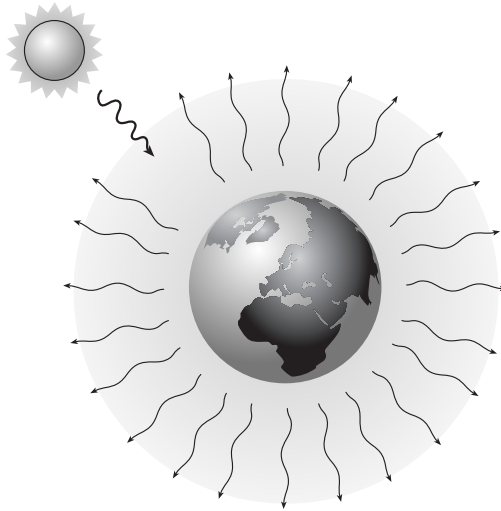


Рис. 9.3. Мы получаем энергию от Солнца в концентрированной низкоэнтропийной форме, а излучаем обратно во Вселенную в рассеянном, высокоэнтропийном виде. На каждый получаемый Землей высокоэнергетичный фотон приходится 20 излучаемых обратно низкоэнергетичных фотонов

Как я уже упоминал во второй главе, Земля и ее биосфера — это системы, которые находятся очень далеко от термического равновесия. Условие термического равновесия означает, что температура одинакова повсюду, но если мы посмотрим вверх, то увидим очень горячее Солнце на, в целом, весьма холодном небе. Возможностей для увеличения энтропии предостаточно, и это очевидно. Но для наглядности давайте все же проверим реальные цифры.¹³

Энергетический баланс Земли, если рассматривать ее как единую систему, очень прост. Мы получаем энергию излучения Солнца, а затем теряем тот же самый объем энергии. Точно так же, посредством излучения, он уходит в открытый космос. (В действительности эти две величины не совсем равны; такие процессы, как ядерные распады, тоже нагревают Землю и приводят к утечке энергии в космос, а скорость излучения, строго говоря, не постоянна. И все же это весьма точное приближение.) Однако, несмотря на то что энергия остается постоянной, получаемый и отдаваемый потоки энергии кардинальным образом различаются по своим *качественным* характеристикам. Вспомните, что в добольцмановские времена энтропию понимали как меру полезности определенного объема энергии; низкоэнтропийные формы энергии можно использовать для совершения полезной работы, такой как приведение в действие

двигателя или перемалывание зерна в муку, тогда как с высокоэнтропийными формами ничего особенного сделать не получится.

От Солнца мы получаем энергию в низкоэнтропийной, полезной форме, а энтропия энергии, которую мы излучаем обратно в космическое пространство, намного больше. Температура Солнца примерно в 20 раз выше средней температуры Земли. Что касается излучения, то температура — это всего лишь средняя энергия фотонов, из которых оно состоит, поэтому Земле приходится излучать 20 низкоэнергетичных фотонов (с большой длиной волны — инфракрасных) на каждый полученный высокоэнергетичный фотон (с малой длиной волны — в видимом диапазоне). Простые математические расчеты демонстрируют, что «в 20 раз больше фотонов» — это то же самое, что «энтропия в 20 раз больше». Земля излучает тот же объем энергии, что приходит к ней от Солнца, но энтропия этой энергии в 20 раз больше.

Самое сложное здесь — разобраться, что в действительности имеется в виду под «низкоэнтропийностью» жизненных форм здесь, на Земле. Как провести границу? Ответ на этот вопрос существует, и даже не один, но добраться до него совсем непросто. К счастью, можно срезать путь. Рассмотрим всю биомассу Земли — все молекулы, составляющие все существующие живые организмы, к какому бы типу они ни принадлежали. Несложно вычислить максимальную энтропию, которой мог бы обладать этот набор молекул при условии термического равновесия. Подставив реальные значения (биомасса 10^{15} килограммов; температура Земли 255 кельвинов), получаем ответ: максимальная энтропия равна 10^{44} . Сравним это значение с нулем — минимальной энтропией, которой могла бы обладать биомасса (если бы она находилась в каком-то одном исключительном состоянии).

Таким образом, самое большое потенциальное изменение энтропии, которое может потребоваться для приведения абсолютно беспорядочного набора молекул размером с нашу биомассу к любой другой конфигурации, включая нашу текущую экосистему, равно 10^{44} . Если эволюция жизни происходит в соответствии со вторым началом термодинамики, то за этот период Земля выработала больше энтропии (путем преобразования высокоэнергетичных фотонов в низкоэнергетичные), чем уменьшила в ходе создания жизни. Значение 10^{44} , несомненно, представляет собой более чем щедрую оценку — нам совершенно не нужно производить такой объем энтропии. Однако если мы можем создать столько энтропии, значит, со вторым началом термодинамики все в порядке.

Как много времени потребуется на создание такого объема энтропии путем преобразования полезной солнечной энергии в бесполезную излученную

теплоту? Расчеты, принимающие во внимание температуру Солнца и т. п., позволяют дать следующий ответ: около одного года. Если ударно поработать, то за год мы могли бы из неопределенной массы размером со всю биосферу сформировать систему с такой низкой энтропией, какую только можно вообразить. В действительности же эволюция жизни продолжалась миллиарды лет, и общая энтропия системы «Солнце + Земля (включая жизнь) + ушедшее излучение» весьма заметно увеличилась. Таким образом, второе начало термодинамики идеально согласуется с жизнью как мы ее знаем, — хотя, уверен, вы в этом нисколько не сомневались.

Жизнь в движении

Приятно осознавать, что жизнь не нарушает второе начало термодинамики. Но также неплохо было бы окончательно разобраться в вопросе, что же такое «жизнь». Ученые пока не пришли к единственно верному определению, тем не менее существует ряд свойств, которые традиционно связывают с живыми организмами: сложность, организация, метаболизм, обработка информации, репродукция, реакция на стимулы, старение. Сложно сформулировать набор критериев, с помощью которого можно было бы безошибочно отделять живых существ — водоросли, земляных червей, домашних кошек — от сложных неживых объектов, таких как лесные пожары, галактики, персональные компьютеры. И все же мы можем проанализировать некоторые характерные признаки того, что принято считать жизнью, рассматривая их в контексте живого и неживого.

Одна из самых знаменитых попыток разложить по полочкам понятие жизни с физической точки зрения была предпринята в книге *What Is Life?* («Что такое жизнь?») небезызвестного Эрвина Шрёдингера. Шрёдингер считается одним из основоположников квантовой теории; именно его уравнение пришло на смену ньютоновским законам движения для динамического описания мира при переходе от классической механики к квантовой. Также он автор знаменитого мысленного эксперимента под названием «кот Шрёдингера», цель которого — подчеркнуть отличие нашего непосредственного восприятия мира от формальной структуры квантовой теории.

После прихода к власти нацистов Шрёдингеру пришлось покинуть Германию. Однако, несмотря на присужденную в 1933 году Нобелевскую премию, ему оказалось очень непросто найти новое место для постоянного проживания — в основном из-за весьма насыщенной личной жизни (его жена Анне-мари знала о наличии у него любовниц, и у нее самой также было несколько

романов «на стороне»; в то время Шрёдингер находился в интимных отношениях с Хильде Марх, женой одного из своих помощников, которая впоследствии родила ему ребенка). В конце концов он обосновался в Ирландии, где стал одним из основателей Дублинского института перспективных исследований.

В Ирландии Шрёдингер прочитал курс публичных лекций, которые затем были опубликованы в форме небольшой книги под названием *What Is Life?*. Феноменом жизни он интересовался с точки зрения ученого-физика, в частности эксперта по квантовой и статистической механике. Вероятно, наиболее примечательной идеей среди высказанных в этой публикации была догадка Шрёдингера о том, что стабильность генетической информации с течением времени легче всего объяснить, постулируя существование некоего «аперриодического кристалла», сохраняющего информацию в своей химической структуре. Эта догадка вдохновила Фрэнсиса Крика на смену области деятельности: оставив физику, он занялся молекулярной биологией; ему, а также биологу Джеймсу Уотсону принадлежит слава открытия двойной спирали ДНК.¹⁴

Также Шрёдингер пытался найти определение «жизни». Он даже высказал вполне конкретное предположение — правда, в довольно небрежном и неформальном стиле, вследствие чего оно не было воспринято с той серьезностью, которой, несомненно, заслуживает:

Что является характерной чертой жизни? Когда мы говорим про кусок материи, что он живой? Когда он продолжает «делать что-либо», двигаться, обмениваться веществами с окружающей средой и т. д., — и все это в течение более долгого времени, чем по нашим ожиданиям мог бы делать неодушевленный кусок материи при подобных же условиях.¹⁵

Разумеется, это довольно расплывчатое высказывание: что именно подразумевается под «делать что-либо», как долго следует «ожидать», что это действие будет продолжаться, и что считать «подобными же условиями»? Помимо этого, в данном определении ни слова не говорится об организации, сложности, обработке информации или о чем-то подобном.

Тем не менее в идее Шрёдингера содержится важный намек на то, чем жизнь отличается от не-жизни. Где-то в подсознании у него наверняка крутилась версия второго начала термодинамики, сформулированная Клаузиусом: если объекты находятся в тепловом контакте, их температуры усредняются (система стремится к термодинамическому равновесию). Если поместить кубик льда в стакан с теплой водой, он довольно быстро растает. Даже если два объекта сделаны из совершенно разных материалов — скажем, мы кладем в стакан воды

пластиковый «кубик льда», их температуры все равно сравниваются. Неживые физические объекты вообще стремятся к снижению активности — они хотят лежать и ничего не делать. Во время лавины камень может катиться по склону горы, но вскоре он достигнет подножия, растратив всю энергию на создание шума и тепла, и полностью остановится.

В действительности Шрёдингер имел в виду, что для живых организмов этот процесс перехода к состоянию неподвижности может продолжаться намного дольше, даже быть бесконечным. Представьте себе, что вместо кубика льда мы поместили в стакан с водой золотую рыбку. В отличие от кусочка льда (неважно, сделанного из воды или пластика) золотая рыбка «придет в равновесие» с водой далеко не сразу — точно не в течение нескольких минут или даже часов. Она останется живым существом, которое будет что-то делать, плавать туда и сюда, обмениваясь веществами с окружающей ее средой. Если же мы выпустим рыбку в озеро или аквариум с изобилием пищи, то этот процесс растянется на еще более долгое время.

В этом, по мнению Шрёдингера, и заключается суть жизни: отсрочить естественное стремление прийти к равновесию с окружающей средой. На первый взгляд большинство свойств, которые мы традиционно ассоциируем с жизнью, в этом определении отсутствуют. Однако если мы задумаемся, *почему* организмы способны делать что-то в течение длительного времени после того, как неживые объекты остановятся и успокоятся, — почему золотая рыбка продолжает плавать, хотя кубик льда давно растаял, то немедленно придем к таким свойствам живых существ, как сложность и способность обрабатывать информацию. Способность организма «что-то делать» на протяжении долгого времени — это внешний признак жизни, однако механизм, стоящий за этой способностью, представляет собой деликатное взаимодействие множества уровней иерархической структуры.

И все же хотелось бы иметь возможность оперировать более конкретными понятиями. Когда мы говорим: «живые существа — это объекты, которые продолжают “что-то делать” намного дольше, чем можно было бы ожидать, а происходит это, потому что они очень сложные», все вроде бы понятно, но в то же время очевидно, что это далеко не конец истории. К сожалению, это чрезвычайно запутанная история, ученые пока до конца в ней не разобрались. Определенно, энтропия играет огромную роль в природе жизни, но существуют и другие важные аспекты, не связанные с энтропией. Энтропия — характеристика состояния в данный момент времени, а основополагающие свойства жизни включают процессы, которые происходят на протяжении какого-то промежутка времени. Само по себе понятие энтропии оказывает

лишь грубое влияние на эволюцию с течением времени: она либо возрастает, либо остается неизменной, но никогда не уменьшается. Во втором начале термодинамики ничего не говорится о том, *как быстро* энтропия будет расти и *каким образом* она это будет делать, — он посвящен Существующему, а не Возникающему.¹⁶

Как бы то ни было, даже если забыть о попытках ответить на все возможные вопросы о том, что же считать «жизнью», в существовании одного понятия, играющего важнейшую роль во всем этом, сомнений не остается. Это понятие *свободной энергии*. Шрёдингер вскользь упоминал о ней в первом издании книги «Что такое жизнь?», а в последующих редакциях добавил примечание, в котором выражал сожаление, что не придал ей большего значения. Идея свободной энергии помогает связать вместе энтропию, второе начало термодинамики, демона Максвелла и способность живых существ продолжать «что-то делать» дольше, чем неживые.

Свободная энергия, а не свободный доступ к пивному крану

В последние годы популярность такой научной области, как биологическая физика, значительно возросла. Без сомнения, это очень хорошо: биология важна, и физика важна, и на стыке этих двух наук возникает множество важных и интересных проблем. Однако также неудивительно, что на всем протяжении своего существования эта область оставалась относительно неразвитой. Если взять и сравнить учебники начального уровня по физике и биофизике, вы сразу же заметите, как сильно различается используемая терминология.¹⁷ Учебники по физике для начинающих изобилуют такими словами, как «сила», «импульс» и «сохранение», тогда как для книг по биофизике более характерны термины «энтропия», «информация» и «диссипация».

Различия в терминологии — это лишь отражение абсолютной непохожести двух подходов. С тех самых пор, как Галилей впервые предложил игнорировать сопротивление воздуха при изучении падения объектов в гравитационном поле, физика продолжает исповедовать принцип минимализма, пренебрегая трением, рассеянием, шумом и всем остальным, что способно невзначай отвлечь нас от неприкрытого проявления сути простых микроскопических динамических законов. В биологической физике такой подход недопустим: игнорируя трение, вы игнорируете саму жизнь. Действительно, существует даже заслуживающее серьезного рассмотрения альтернативное определение жизни: «жизнь — это организованное трение».

Вы наверняка думаете, что здесь кроется какая-то ошибка. Ведь жизнь нацелена на поддержание структуры и организации, а трение создает энтропию и беспорядок. На самом деле обе точки зрения в какой-то мере отражают истину. Жизнь занимается тем, что создает энтропию в одних местах, для того чтобы обеспечить структуру и организацию в других. Это урок, который нам преподал демон Максвелла.

Давайте попробуем разобраться, что же это может означать. В главе 2, обсуждая второе начало термодинамики, мы упомянули о различии между «полезной» и «бесполезной» энергией: полезную энергию можно преобразовать в какую-нибудь работу, тогда как бесполезная энергия попросту бесполезна. Одним из вкладов Джозайи Уилларда Гиббса была формализация этих понятий путем ввода новой величины, которую он назвал свободной энергией. Шрёдингер не использовал этот термин в своих лекциях, так как беспокоился о его возможной двусмысленности: то, что энергия «свободна», не означает, что ее можно просто взять и использовать, ничего не отдавая взамен; это означает, что она доступна для преобразования ее в работу и достижения какой-то цели¹⁸ («свобода слова», а не «свободный доступ к пивному крану», как любит говорить гуру свободного программного обеспечения Ричард Столлман). Гиббс понял, что понятие энтропии позволяет точно поделить полный объем энергии на полезную энергию, которую он назвал «свободной», и бесполезную:¹⁹

$$\begin{aligned} & \text{полная энергия} = \text{свободная энергия} + \\ & + \text{бесполезная (высокоэнтропийная) энергия.} \end{aligned}$$

Когда физический процесс создает энтропию в системе с фиксированной полной энергией, он расходует свободную энергию. Как только запасы свободной энергии заканчиваются, устанавливается равновесие.

Это один из способов, как можно представлять себе суть живых организмов: они поддерживают порядок в своем локальном окружении (включая собственные тела), пользуясь преимуществами свободной энергии, и своими действиями превращают свободную энергию в бесполезную. Если поместить золотую рыбку в контейнер с водой, где больше ничего нет, то она сохранит свою структуру (далекую от равновесия с окружающей средой) намного дольше, чем был бы способен кубик льда; однако в конечном итоге она умрет от голода. Однако если мы *покормим* рыбку, то она проживет еще дольше. С физической точки зрения еда — это банальный источник свободной энергии, которой живой организм может воспользоваться, чтобы поддержать свой метаболизм.

Получается, что демон Максвелла (вместе со своим контейнером с газом) являет собой превосходную парадигму того, как работает жизнь. Рассмотрим чуть более сложную версию истории демона. Возьмем контейнер с газом, разделенный перегородкой, и внедрим его в «среду», которую мы смоделируем в форме сколь угодно большого объема вещества, пребывающего при постоянной температуре, — физики называют это тепловой баней. (Смысл в том, что среда настолько велика, что взаимодействие с интересующей нас маленькой системой, в данном случае с контейнером газа, никак не повлияет на ее собственную температуру.) Несмотря на то что молекулы газа остаются внутри контейнера, тепловая энергия способна передаваться изнутри наружу и снаружи внутрь; следовательно, если демон примется эффективно разделять газ на «холодную половину» и «горячую половину», температура в контейнере немедленно начнет выравниваться из-за взаимодействия с окружающей средой.

Мы считаем, что демон стремится к тому, чтобы в этом конкретном контейнере равновесие не наступило; он прилагает все усилия для сохранения высокой температуры в левой части сосуда и низкой температуры в его правой части (обратите внимание на то, что мы сделали демона главным героем, а не главным злодеем этой истории). Таким образом, он занимается привычной сортировкой молекул в зависимости от их скоростей, но теперь он вынужден заниматься этим постоянно, ведь в противном случае каждая из половин контейнера придет в равновесие с окружающей средой. Мы уже знаем из предыдущего обсуждения, что демон не может выполнять сортировку, не оказывая воздействия на внешний мир; процесс стирания записей в конечном итоге создает энтропию. Следовательно, демону требуется бесконечный источник свободной энергии. Он берет свободную энергию («еду») и использует ее для стирания записей, производя, таким образом, энтропию и превращая свободную энергию в бесполезную. Бесполезная энергия затем выбрасывается в форме тепла (или чего-то еще). Стерев все записи в блокноте, демон снова готов поддерживать в своем контейнере состояние, далекое от равновесного, — по крайней мере, до тех пор, пока блокнот снова не наполнится записями, и тогда цикл опять повторится.

Эта прелестная зарисовка, разумеется, не дает полного описания того, что мы подразумеваем под идеей жизни, но все же позволяет уловить суть. Жизнь стремится к поддержанию порядка, несмотря на требования второго начала термодинамики, будь то фактическое тело живого организма, его психическое состояние или деяния Озимандии. Делает она это вполне конкретным образом: уменьшая свободную энергию во внешнем мире. И все это ради того, чтобы держаться как можно дальше от термодинамического равновесия. Как мы уже

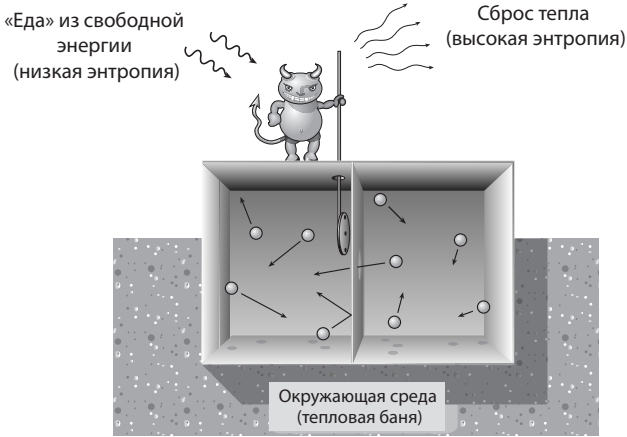


Рис. 9.4. Демон Максвелла как парадигма жизни. Демон поддерживает порядок — разные температуры в разных половинах контейнера, несмотря на воздействие окружающей среды. С этой целью он обрабатывает информацию посредством преобразования свободной энергии в высокоэнтропийное тепло

убедились, эта деятельность тесно связана с идеей обработки информации. Выполняя свою работу, демон преобразует свободную энергию в информацию о молекулах в контейнере, которую затем использует для предотвращения выравнивания температур в двух половинах сосуда. На самом базовом уровне назначение жизни заключается в том, чтобы выжить: организм стремится к обеспечению бесперебойной работы своей сложной структуры.²⁰ Свободная энергия и информация — это ключи к достижению данной цели.

С точки зрения естественного отбора существует масса причин, почему сложные устойчивые структуры могут оказаться предпочтительны в процессе адаптации; например, глаз — сложная структура, несомненно, вносящая неоценимый вклад в здоровье организма. Однако чем сложнее структуры, тем большие объемы свободной энергии приходится превращать в тепло только для того, чтобы поддерживать их невредимыми и функциональными. Такая картина взаимосвязи энергии с информацией позволяет дать логичный прогноз: чем более сложным будет становиться организм, тем более *неэффективно* он будет использовать энергию для «рабочих» целей — простых механических операций, таких как бег и прыжки. В то же время он будет тратить много энергии на «профилактику», то есть поддержание механизмов в хорошем рабочем состоянии. Выясняется, что это на самом деле так; что касается реальных биологических организмов, то чем они сложнее, тем менее эффективно расходуют свою энергию.²¹

Сложность и время

Взаимосвязь энтропии, информации, жизни и стрелы времени порождает массу интересных тем для исследования, которым, к сожалению, мы не сможем уделить внимание в этой книге: эволюция, смертность, мышление, сознание, социум и бесчисленное множество других. Для того чтобы обсудить все эти вопросы, потребовалась бы отдельная книга, а у нас сейчас иные цели. Однако прежде чем вернуться на относительно твердую почву традиционной статистической механики, давайте рассмотрим еще один гипотетический вопрос. Впрочем, не исключено, что новые исследования в ближайшем будущем смогут пролить на него свет.

По мере развития Вселенной энтропия увеличивается. Это очень простая зависимость: в начале времен, сразу после Большого взрыва, энтропия была очень низкой, но с тех пор она выросла и продолжит расти в будущем. Однако, грубо говоря, помимо энтропии для описания состояния Вселенной в любой момент времени мы можем использовать такую величину, как *сложность*, — или противоположность сложности, то есть простоту. А изменение сложности со временем происходит совсем не так прямолинейно, как изменение энтропии.

Дать количественную оценку сложности физической ситуации можно разными способами, но одна характеристика завоевала наибольшую популярность: это *колмогоровская сложность*, или *алгоритмическая сложность*.²² Данная величина формализует наше интуитивное представление о том, что простую ситуацию просто описывать, а сложную ситуацию описать сложно. Количественной оценкой сложности описания ситуации может служить длина самой короткой из всех возможных компьютерных программ (на определенном языке программирования), выдающих описание данной ситуации. Колмогоровская сложность представляет собой всего лишь длину такой максимально короткой компьютерной программы.

Рассмотрим две строки, содержащие цифры; длина каждой строки составляет ровно миллион символов. В первой строке место каждого символа занимает восьмерка — другие цифры отсутствуют. Вторая строка представляет собой какую-то последовательность разнообразных цифр, в которой невозможно выделить повторяющийся шаблон:

88888888888888888888 ...

60462491123396078395 ...

Первая строка проста, и она характеризуется низкой колмогоровской сложностью. Суть в том, что эту последовательность могла бы сгенерировать

программа, состоящая из одной команды: «напечатать цифру 8 миллион раз». С другой стороны, во второй строке мы имеем дело со сложной последовательностью. Любая программа, печатающая данную строку, должна содержать не менее миллиона символов, так как единственный способ описать эту строку — непосредственно указать каждую цифру. Это определение сложности удобно использовать для таких чисел, как π или квадратный корень из двух: на первый взгляд они чрезвычайно сложны, однако в обоих случаях вычислить их с любой желаемой точностью можно с помощью довольно простой программы, так что колмогоровская сложность этих чисел низка.

У ранней Вселенной была низкая сложность, потому что ее очень легко описать. Это было горячее, плотное состояние частиц, крайне однородное на больших масштабах, расширяющееся с определенной скоростью и включающее некоторый (подающийся простому определению) набор разбросанных тут и там крохотных возмущений плотности. Если не вдаваться в детали, то это и есть полное описание ранней Вселенной, больше о ней сказать особо нечего. В далеком будущем сложность Вселенной снова станет низкой: это будет пустое пространство, содержащее разреженную и продолжающую разрезаться кашичу из отдельных частиц. Но между этими моментами — например, прямо сейчас — все выглядит чрезвычайно сложным. Даже после макроскопического огрубления невозможно найти простой способ описания иерархических структур, которые составляют газ, пыль, звезды, галактики и кластеры, не говоря уже о вещах, происходящих на гораздо более мелком масштабе, таких как наша экосистема здесь, на Земле.

Таким образом, хотя энтропия Вселенной с течением времени всегда только увеличивается, сложность ведет себя намного интереснее: сначала она находилась на низком уровне, затем возросла до относительно высокого, а после этого снова снизится. Но почему так происходит? И какие следствия имеет такой путь эволюции? В голове сразу начинается масса вопросов. При каких обстоятельствах сложность начинает возрастать и каковы условия ее падения? Всегда ли такое поведение наблюдается при изменении энтропии от низкой до высокой или же другие динамические свойства также играют важную роль? Является ли возникновение сложности (или «жизни») характерной чертой эволюции в присутствии градиентов энтропии? Насколько важен тот факт, что наша ранняя Вселенная была не только простой, но и низкоэнтропийной? Как долго сможет просуществовать жизнь после того, как Вселенная перейдет в простое, но высокоэнтропийное состояние?²³

Цель науки — давать ответы на сложные вопросы, но также одна из ее задач — находить правильные вопросы. Однако в своих исследованиях про-

блемы жизни мы даже не можем быть уверены в том, что задаем правильные вопросы. У нас есть целый набор интригующих понятий, которые наверняка должны сыграть более или менее важную роль в поиске окончательного ответа: энтропия, свободная энергия, сложность, информация. И все же пока мы не в состоянии составить из них цельную картину. Ничего страшного; наука — это путешествие, в котором самое интересное происходит в пути, а не по прибытии.

Примечания

- ¹ Цитировано из работы *Tribus, M., McIrvine, E. Energy and Information // Scientific American, 1971, August, p. 179.*
- ² *Пруст М.* По направлению к Свану. М.: Республика, 1992 (*Proust, M. Swann's Way: In Search of Lost Time. V. 1 (Du côté de chez Swann: À la recherche du temps perdu) / Trans. by L. Davis. New York: Penguin Classics, 2004.*)
- ³ Однако с каждым днем мы узнаем все больше и больше. В работе: *Schacter, D. L., Addis, D. R., Buckner, R. L. Remembering the Past to Imagine the Future: The Prospective Brain // Nature Reviews Neuroscience, 2007, 8, p. 657–661* вы найдете обзор последних достижений нейробиологии, доказывающих, что при реконструкции воспоминаний в человеческом мозге происходят процессы, удивительно похожие на те, с помощью которых мы представляем себе будущее.
- ⁴ *Albert, D. Z. Time and Chance. Cambridge, MA: Harvard University Press, 2000.*
- ⁵ *Роулинг Дж.* Гарри Поттер и Принц-полукровка. Махаон, 2015 г. (*Rowling, J. K. Harry Potter and the Half-Blood Prince. New York: Scholastic, 2005.*)
- ⁶ *Callender, C. There is No Puzzle about the Low Entropy Past / In: Contemporary Debates in Philosophy of Science / C. Hitchcock (ed.). Malden: Wiley-Blackwell, 2004, p. 240–255.* В версии Каллендера это не вы умираете, а Вселенная завершает свое существование, — просто мне не хотелось смешивать эту историю со сценарием Большого сжатия. На самом деле хотелось бы видеть больше описаний мысленных экспериментов, в которых будущее граничное условие выглядит как «вы влюбляетесь» или «вы выигрываете в лотерею».
- ⁷ Дэвис (*Davis, J. A. The Logic of Causal Order. Thousand Oaks, CA: Sage Publications, 1985, p. 11*) пишет: «Я сформулирую четыре правила, каждое из которых в действительности представляет собой специфичное приложение великого принципа причинно-следственного порядка: “после” не может стать причиной “до”... не существует способа изменить прошлое... время пронзают однонаправленные стрелы».
- ⁸ Вы найдете гораздо более подробную историю демона Максвелла в других источниках. Лефф и Рекс (*Leff, H. S., Rex, A. F. (eds.). Maxwell's Demon 2: Entropy, Classical and Quantum Information, Computing. Bristol: Institute of Physics, 2003*) собрали несколько оригинальных работ. Фон Баэйер (*Von Baeyer, H. C. Warmth Disperses and Time Passes: The History of Heat. New York: Modern Library, 1998*) использует демона в качестве проводника по истории термодинамики. Зайфе (*Seife, C. Decoding the Universe: How the New Science of Information Is Explaining Everything in the Cosmos, from Our Brains to Black Holes. New York: Viking, 2006*) замечательно разъясняет основы теории информации и говорит о ее

роли в поисках разгадки этой головоломки. Сами Беннетт и Ландауэр написали о своей работе в журнале *Scientific American* (Bennett, Landauer, 1985; Bennett, 1987).

- ⁹ Этот сценарий можно развить. Представьте себе, что контейнер погружен в термальную баню с газом при температуре T , а стенки контейнера пусть обладают теплопроводностью. Таким образом, молекула внутри контейнера находится в тепловом равновесии с газом снаружи. Если бы мы продолжали получать обновленную информацию о том, в какой половине контейнера пребывает молекула, мы могли бы непрерывно извлекать из нее энергию, искусно вставляя поршень с нужной стороны. Потеряв энергию вследствие столкновения с поршнем, молекула снова получала бы ее из бани. То, что мы сейчас описали, — это вечный двигатель, работающий исключительно на гипотетическом бесконечном притоке информации (и это в очередной раз подтверждает тот факт, что бесплатной информации не бывает). Силард сумел даже дать точную количественную оценку энергии, которую можно извлечь из одного бита информации: $kT \lg 2$, где k — постоянная Больцмана.
- ¹⁰ Удивительно, но как и в начале XIX века, когда множество передовых исследований в области термодинамики было проведено людьми, которые ставили перед собой исключительно практические цели, такие как построение лучших паровых двигателей, прорыв в информационной теории в XX веке тоже случился благодаря практичным умам, целью которых было создание лучших коммуникационных систем и компьютеров.
- ¹¹ И это заявление тоже можно развить. Так же как Гиббс пришел к определению энтропии, основанному на вероятности пребывания системы в различных состояниях, мы можем определить «информационную энтропию» пространства возможных сообщений в терминах вероятности того, что сообщение примет ту или иную форму. Оказывается, формулы для энтропии Гиббса и информационной энтропии совершенно одинаковые, несмотря на то что используемые в них символы трактуются немного по-разному.
- ¹² О новейших исследованиях вы можете прочитать в работах: *Morango, M. Life Explained / Trans. by M. Cobb, M. DeBevoise. New Haven, CT: Yale University Press, 2008; Regis, E. What Is Life?: Investigating the Nature of Life in the Age of Synthetic Biology. Oxford: Oxford University Press, 2009.*
- ¹³ Следующий аргумент позаимствован из работы *Bunn, E. F. Evolution and the Second Law of Thermodynamics, 2009, <http://arxiv.org/abs/0903.4603>*, а вдохновением для этого источника послужила работа *Styer, D. F. Entropy and Evolution // American Journal of Physics, 2008, 76, p. 1031–1033*. Подробности и дополнительные соображения вы также сможете найти в статье *Lineweaver, C. H., Egan, C. A. Life, Gravity, and the Second Law of Thermodynamics // Physics of Life Reviews, 2008, 5, p. 225–242*.
- ¹⁴ *Crick, F. What Mad Pursuit: A Personal View of Scientific Discovery. — New York: Basic Books, 1990.*
- ¹⁵ *Шрёдингер Э. Что такое жизнь? / Пер. с англ. М.: Изд-во иностранной литературы, 1947 (Schrodinger, E. What Is Life? Cambridge: Cambridge University Press, 1944).*
- ¹⁶ «От существующего к возникающему» — это название популярной книги (1980 г.) бельгийского лауреата Нобелевской премии Ильи Пригожина, который известен как первооткрыватель диссипативных структур и самоорганизующихся систем в статистической механике. См. также: *Prigogine, I. Thermodynamics of Irreversible Processes. New York: John Wiley, 1955; Kauffman, S. A. The Origins of Order: Self- Organization and Selection*

in Evolution. Oxford: Oxford University Press, 1993; *Avery, J.* Information Theory and Evolution. Singapore: World Scientific, 2003.

- ¹⁷ Одно из новейших и очень хороших изданий на эту тему: *Nelson, P.* Biological Physics: Energy, Information, Life (издание дополненное и исправленное). New York: W. H. Freeman, 2007.
- ¹⁸ В наше время он бы еще больше опасался этого термина. Поиск в Google по запросу «свободная энергия» дает множество ссылок на схемы вечных двигателей, а также на ресурсы, посвященные экологически чистой энергии.
- ¹⁹ На самом деле неформальные понятия «полезной» и «бесполезной» энергии появились, конечно же, задолго до Гиббса; его вклад состоял в том, что он связал эти идеи с конкретными формулами, которые в дальнейшем были доработаны немецким физиком Германом Гельмгольцем. В частности, то, что мы называем «бесполезной энергией», — это всего лишь (в формулировке Гельмгольца) температура тела, умноженная на его энтропию. Таким образом, свободная энергия представляет собой разность между общим объемом внутренней энергии тела и этой величиной.
- ²⁰ В 1950-х годах Клод Шэннон построил «совершенную машину», в основе которой лежала идея, высказанная Марвином Минским. В спящем состоянии машина выглядит как коробка с единственным переключателем на передней панели. Если щелкнуть этим переключателем, то раздастся громкое жужжание. Затем крышка приоткроется, и вылезшая наружу механическая рука переведет переключатель обратно в исходное положение. После этого рука снова спрячется в коробке, и жужжание прекратится. Какова мораль этой истории? Например, такова, что стойкость может быть хорошей штукой сама по себе.
- ²¹ В частности, более массивные организмы, которые чаще всего и более сложные, так как включают большее число подвижных частей, потребляют больше свободной энергии на единицу массы, чем более мелкие. См., например, работу *Chaisson, E. J.* Cosmic Evolution: The Rise of Complexity in Nature. Cambridge, MA: Harvard University Press, 2001.
- ²² Этот и другие количественные характеристики связывают с именами таких ученых, как Андрей Колмогоров, Рэй Соломонофф и Грегори Хайтин. Подробное обсуждение см., например, в работе *Gell-Mann, M.* The Quark and the Jaguar: Adventures in the Simple and Complex. New York: W. H. Freeman, 1994.
- ²³ Некоторые мысли на эту тему изложены в *Dyson, F. J.*, Time Without End: Physics and Biology in an Open Universe, *Reviews of Modern Physics* 51 (1979): 447–60; и *Adams, F., Laughlin, G.*, The Five Ages of the Universe: Inside the Physics of Eternity, New York: Free Press, 1999.

Глава 10

Повторяющиеся кошмары

Природа — это длительная последовательность невообразимых катастроф.

Славой Жижек

В четвертой книге своего труда «Веселая наука», написанного в 1882 году, Фридрих Ницше предлагает мысленный эксперимент. Он просит читателя вообразить такой сценарий, при котором все, что случается во Вселенной, включая мельчайшие детали наших собственных жизней, однажды повторяется, и этот цикл воспроизводится снова и снова на протяжении вечности.

Представь себе, что однажды — днем или ночью — к тебе в твоём полнейшем уединении подкрался демон и говорил тебе: «Твоя жизнь, которую ты ведешь теперь и которую прожил, тебе придется повторить еще раз и еще бесчисленное число раз; и не будет ничего нового, но все та же боль, все те же желания и мысли, и вздохи, и все невыразимо малые и великие события твоей жизни пройдут перед тобой в прежнем порядке и прежней последовательности — и этот паук, и этот лунный свет между деревьями, и этот миг, и я сам. Вечные песочные часы бытия будут снова и снова перевертываться, и ты с ними, пылинка из пылинок!»¹

Интерес Ницше к бесконечно повторяющейся Вселенной носил по большей части этический характер. Он интересовался: как бы вам понравилась мысль о том, что ваша жизнь повторится бесчисленное число раз? Погрузились бы вы в пучину тревоги и отчаяния — в тексте даже упоминается скрежетание зубами — от подобной ужасающей перспективы или же возликовали бы? Ницше полагал, что успешной можно назвать такую жизнь, которую вы бы с гордостью проживали в бесконечном цикле.²

Труд Ницше, разумеется, ни в коем случае не может считаться первоисточником идеи циклической Вселенной, или «извечного возвращения». Упоминания о ней то тут, то там встречаются во многих древних религиях: в греческой мифологии, индуизме, буддизме, некоторых аборигенных американских культурах. Колесо жизни вращается, история повторяется.

Однако вскоре после того, как Ницше предложил своего демона, идея извечного повторения проникла и в физику. В 1890 году Анри Пуанкаре доказал интригующую математическую теорему, в которой утверждается, что опреде-

ленные физические системы непременно возвращаются к любой своей конфигурации бесконечное число раз — нужно лишь подождать достаточно долго. За этот результат ухватился молодой математик по имени Эрнст Цермело, заявивший, что данная идея несовместима с предложенным Больцманом выводом второго начала термодинамики на основе фундаментальных обратимых законов движения атомов.

В 1870-х годах Больцман сражался с «парадоксом обратимости» Лошмидта. В противоположность этому 1880-е годы были относительно спокойным временем в истории развития статистической механики: Максвелл скончался в 1879 году, а Больцман, помимо продвижения своей научной карьеры, сосредоточил усилия на технических приложениях разработанного им формализма. Однако в 1890-х годах споры разгорелись снова — на этот раз в форме «парадокса повторения» Цермело. По сей день результаты этих споров так до конца и не приняты физиками; многие вопросы, поднятые Больцманом и его современниками, до сих пор остаются предметом жарких дискуссий ученых. В контексте современной космологии вопросы, связанные с парадоксом повторения, все еще остаются нерешенными.



Рис. 10.1. Анри Пуанкаре, пионер топологии, теории относительности и теории хаоса, позднее президент Бюро Долгот

Хаос Пуанкаре

Оскар II, король Швеции и Норвегии, родился 21 января 1829 года. В 1887 году шведский математик Гёста Миттаг-Лефлер подал королю идею отметить грядущее шестидесятилетие весьма необычным способом: устроив математическое соревнование, в котором участникам будут предложены на выбор четыре задачи. Приз получит тот, кто найдет самое оригинальное и творческое решение любой из них.

Одной из предложенных задач была «задача трех тел». В этой задаче требуется описать движение трех массивных объектов под влиянием взаимного гравитационного притяжения. (Для двух тел задача решается просто: еще Ньютон доказал, что планеты движутся по эллиптическим орбитам.) За эту

задачу взялся Анри Пуанкаре, который в тридцать с небольшим лет уже считался одним из ведущих мировых математиков. Ему не удалось найти решение, однако он предоставил очерк, демонстрирующий одно критически важное свойство: орбиты этих планет *стабильны*. То есть, даже не зная точного решения, можно быть уверенным в том, что планеты по крайней мере будут вести себя предсказуемо. Метод Пуанкаре оказался настолько остроумным, что премию в итоге присудили именно ему, а его статья была подготовлена для публикации в новом журнале Миттага-Лефлера *Acta Mathematica*.³

Однако возникла небольшая загвоздка: Пуанкаре допустил ошибку. У Эдварда Фрагмена, одного из редакторов журнала, возникли некоторые вопросы относительно статьи, и в процессе поиска ответов Пуанкаре осознал, что при построении своего доказательства упустил один важный случай. Подобные малозаметные ошибки частенько закрадываются в сложные математические работы, и Пуанкаре взялся за исправление своего очерка. Но стоило ему потянуть за одну ниточку, как все доказательство разошлось по швам. В итоге Пуанкаре доказал утверждение, прямо противоположное исходному: орбиты трех тел совсем не были стабильными. Эти орбиты не только не являются периодическими — они даже примерно не описываются никаким регулярным поведением. Сегодня, благодаря существованию компьютеров, способных моделировать любое движение, подобный результат не кажется нам таким уж удивительным, но в то время это был настоящий шок. Начав с попытки доказать стабильность орбит планет, Пуанкаре пришел к чему-то совершенно иному: он изобрел теорию хаоса.

Однако история на этом не заканчивается. Миттаг-Лефлер, уверенный в том, что Пуанкаре без труда исправит свой удостоенный награды очерк, поторопился и напечатал его. К тому времени как Пуанкаре сообщил, что не стоит ждать никаких исправлений, журнал уже был отправлен крупнейшим математикам по всей Европе. Миттаг-Лефлер тут же телеграфировал в Берлин и Париж, приказывая уничтожить все копии журнала. В целом ему это удалось, но не без небольшого скандала в элитных математических кругах по всему континенту.

В ходе пересмотра своего доказательства Пуанкаре пришел к обманчиво простому и мощному результату, который сегодня известен под названием теоремы Пуанкаре о возвращении. Представьте себе, что у вас есть система, все составляющие которой движутся в какой-то ограниченной области пространства, как планеты, вращающиеся вокруг Солнца. Теорема о возвращении гласит, что если начиная с некоторой конфигурации эволюционировать систему в соответствии с законами Ньютона, то она гарантированно вернется

к своей первоначальной конфигурации и будет делать это снова и снова, бесконечное число раз в будущем.

Кажется, что это довольно очевидно, и, возможно, никто даже не удивляется этому. Если мы с самого начала предполагаем, что все части нашей системы (планеты, вращающиеся вокруг Солнца, или молекулы, летающие туда и сюда внутри контейнера) связаны в ограниченном объеме, а промежуток времени мы рассматриваем бесконечный, то системе ничего не остается, кроме как возвращаться к одному и тому же состоянию бесчисленное количество раз. А куда ей деваться?

Однако в действительности все немного сложнее. Главная тонкость заключается в том, что число возможных состояний бесконечно, даже если сами объекты не убегают на бесконечность.⁴ Круговая орбита заключена в конечном объеме, но сама она содержит бесконечное число точек; точно так же внутри контейнера с газом конечного объема существует бесконечно много точек пространства. В подобных случаях системы обычно не возвращаются в состояние, *в точности* совпадающее с исходным. Пуанкаре пришел к выводу о том, что в этом случае вполне достаточно «почти полного» совпадения. Если вы заранее объявите, насколько близкими должны быть два состояния, чтобы их можно было считать неразличимыми, то, согласно доказательству Пуанкаре, система будет бесконечно много раз оказываться близко к начальному состоянию.

Рассмотрим три планеты внутренней части Солнечной системы: Меркурий, Венеру и Землю. Венера совершает один оборот вокруг Солнца за 0,61520 года (примерно 225 дней), тогда как Меркурию для этого требуется 0,24085 года (около 88 дней). Взгляните на схему, изображенную на рис. 10.2. Мы начинаем наблюдение с конфигурации, когда все три планеты выстроились в прямую линию. Пройдет 88 дней, и Меркурий вернется к точке старта, однако Венера и Земля в это время будут находиться в каких-то других точках своих орбит. Однако если потратить на ожидание достаточно много времени, то они снова выстроятся в прямую линию — или линию, очень близкую к прямой. Скажем, через 40 лет эти три планеты образуют конфигурацию, почти идентичную той, которую мы наблюдали вначале.

Пуанкаре показал, что так себя ведут все связанные механические системы, даже те, в которых количество движущихся частей очень велико. Но необходимо помнить о том, что время ожидания, пока система вернется в состояние, близкое к начальному, по мере увеличения числа частей также увеличивается. Если бы мы захотели увидеть, как в линию выстроятся все девять планет Солнечной системы,⁵ нам пришлось бы потратить на ожидание куда больше

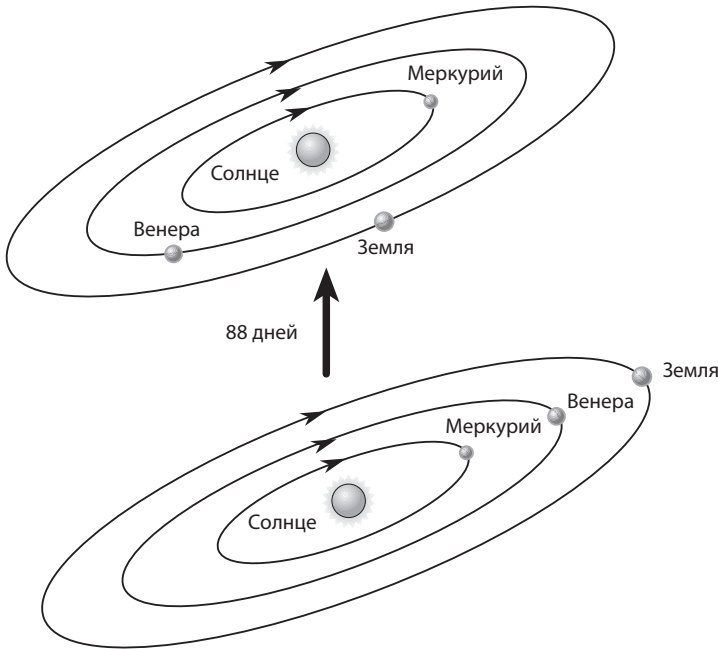


Рис. 10.2. Внутренняя часть Солнечной системы, в которой Меркурий, Венера и Земля находятся на одной линии (внизу), и конфигурация 88 дней спустя (вверху). Меркурий вернулся в исходное положение, а Венера и Земля находятся в других точках своих орбит

40 лет. В какой-то степени это можно оправдать тем, что внешние планеты медленнее вращаются вокруг Солнца, но главная причина в том, что большему количеству объектов требуется больше времени, чтобы общими усилиями воссоздать данную начальную конфигурацию.

Это стоит подчеркнуть: по мере того как число частиц в рассматриваемой системе увеличивается, время, необходимое для возвращения системы в исходное положение или близкое к нему, известное под вполне логичным названием времени *возврата*, — также возрастает, причем очень быстро, становясь в итоге невообразимо большим.⁶ Вернемся еще раз к разделенному перегородкой контейнеру с газом, с которым мы играли в главе 8. В контейнере у отдельных частиц каждую секунду есть небольшой шанс перескочить из одной половины в другую. Очевидно, что если контейнер содержит всего лишь две или три частицы, то системе не потребуется много времени, для того чтобы вернуться в состояние, с которого все началось. Но если взять контейнер хотя бы

с *шестьдесятю* частицами, мы обнаружим, что время возврата уже становится сопоставимым с текущим возрастом наблюдаемой Вселенной.

В большинстве реальных объектов содержится куда больше частиц. Время возврата типичного макроскопического объекта будет составлять по меньшей мере

$$10^{1\,000\,000\,000\,000\,000\,000\,000\,000} \text{ секунд.}$$

Это очень много. Для всех частиц в наблюдаемой Вселенной время возврата еще больше — но стоит ли об этом волноваться? Время возврата любого объекта, достаточно большого, чтобы представлять хоть какой-нибудь интерес, слишком велико. Мы попросту не в состоянии оценить его с точки зрения нашего жизненного опыта. Возраст обозримой Вселенной — всего лишь около 10^{18} секунд. Если найдется физик-экспериментатор, который предложит добавить в чашку кофе ложку молока и подождать время возврата, чтобы увидеть, как молоко снова отделяется от кофе, ему придется здорово попотеть, выбывая финансирование под такой грант.

И все же, если подождать достаточно долго, это случится. Демон Ницше не ошибается; просто он заглядывает далеко вперед.

Цермело против Больцмана

В исходной статье Пуанкаре, где доказана теорема о возвращении, ученый в основном рассматривает четкий, предсказуемый мир ньютоновской механики. Однако Пуанкаре также был знаком со статистической механикой, поэтому он очень быстро осознал, что идея вечного возвращения может показаться несовместимой с попытками вывести второе начало термодинамики. В конце концов, второе начало утверждает, что энтропия меняется только в одну сторону: она возрастает. В то же время создается впечатление, что, согласно теореме о возвращении, после того как низкоэнтропийное состояние перейдет в высокоэнтропийное, нужно всего лишь подождать достаточно долго, и оно вернется к своему низкоэнтропийному началу. Это означает, что где-то по пути энтропия должна уменьшиться.

В 1893 году Пуанкаре написал небольшую статью, посвященную исследованию этого очевидного противоречия. Он подчеркнул, что теорема о возвращении действительно подразумевает, что энтропия Вселенной в конечном счете начнет уменьшаться:

Я не знаю, было ли замечено то, что английские кинетические теории не могут вытупаться из указанного противоречия. Согласно этим теориям мир сна-

чала стремится к состоянию, в котором он остается долгое время без заметных изменений, и это согласуется с опытом. Однако он остается в этом состоянии не всегда, если теорема, упомянутая выше, не нарушается; он просто находится в нем чрезвычайно долгое время — время, которое тем больше, чем более многочисленными являются молекулы. Это состояние будет не окончательной смертью Вселенной, а своего рода сном, от которого она пробудится через миллионы миллионов столетий.

Согласно этой теории, для того чтобы наблюдать переход тепла от холодного тела к горячему, вовсе не обязательно обладать острым зрением, разумом и проворством «демона» Максвелла — для этого достаточно иметь лишь немного терпения.⁷

Под «английскими кинетическими теориями» Пуанкаре предположительно понимал работы Максвелла, Томсона и других — никакого упоминания о Больцмане (или, если уж на то пошло, Гиббсе). По этой ли причине или просто потому, что данная статья не попала к нему на глаза, но Больцман так никогда и не ответил Пуанкаре напрямую.

Однако идея не была забыта. В 1896 году Цермело выдвинул простое возражение (ссылаясь именно на длинную статью Пуанкаре 1890 года, где формулировалась теорема о возвращении, а не на его более короткую статью 1893 года), которое теперь носит название возражения Цермело о возвращении.⁸ Несмотря на известность Больцмана, в конце XIX века атомная теория и статистическая механика в немецкоговорящем мире были далеко не так популярны, как в англоязычных странах. Как и многие другие немецкие ученые, Цермело считал второе начало термодинамики абсолютным законом природы; энтропия замкнутой системы *всегда*, а не просто большую часть времени увеличивается или остается постоянной. Но теорема о возвращении недвусмысленно предполагает, что если энтропия сначала увеличивается, то со временем, когда система вернется к исходной конфигурации, ей непременно придется уменьшиться. Вывод, который из этого сделал Цермело, заключался в том, что система взглядов статистической механики в корне неверна; поведение теплоты и энтропии невозможно свести к движению молекул, подчиняющихся законам Ньютона.

Позднее Цермело завоеует славу в математическом сообществе как один из основателей теории множеств, но в то время он был студентом, постигающим науку под руководством Макса Планка, и Больцман не принял всерьез возражения юного выскочки. Он снизошел до ответа, не проявив, впрочем, особой терпимости:

Работа Цермело показывает, что мои статьи были поняты неправильно; тем не менее мне доставляет удовлетворение ее появление, поскольку она, по-

видимому, является первым свидетельством того, что эти статьи вообще обратили на себя какое-то внимание в Германии.

Теорема Пуанкаре, которую Цермело разъясняет в начале своей работы, вне всякого сомнения, правильна, однако применение им этой теоремы к теории теплоты является неверным.⁹

Вот оно как! В ответ Цермело написал еще одну статью, и на нее Больцман также дал ответ.¹⁰ Но в действительности эти двое говорили о разных вещах, так что к выводу, одинаково устраивающему обе стороны, им прийти так и не удалось.

В то время Больцман полностью разделял идею о том, что второе начало термодинамики — по своей природе статистический закон, но никак не абсолютный. Основная мысль его ответа Цермело заключалась в том, что необходимо отделить теорию от практики. В теории, Вселенная может брать начало в низкоэнтропийном состоянии, доходить до термического равновесия, а затем, повторяя свое развитие в обратную сторону, снова возвращаться к состоянию с низкой энтропией. Это следует из теоремы Пуанкаре, и Больцман не отрицал этого. Но фактическое время ожидания было бы невероятно долгим, намного больше, чем «возраст Вселенной», как мы понимаем его сегодня, и, определенно, выходящим далеко за рамки любых временных интервалов, которые рассматривались учеными XIX столетия. Больцман утверждал, что выводы из теоремы о возвращении следует считать забавным математическим курьезом, который тем не менее никоим образом не может быть применим к реальному миру.

Проблемы вечной Вселенной

В главе 8 мы обсуждали возражение Лошмидта об обратимости, высказанное им в ответ на *H*-теорему Больцмана: невозможно с помощью обратимых законов физики прийти к необратимым результатам. Другими словами, существует столько же высокоэнтропийных состояний, энтропия которых будет уменьшаться, сколько и низкоэнтропийных, энтропия которых будет возрастать, так как соответствующие траектории получаются всего лишь изменением направления времени. (К слову, количество ни тех ни других не может сравниться с числом высокоэнтропийных состояний, которые сохраняют свою высокую энтропию.) Правильным ответом на данное возражение, по крайней мере в нашей наблюдаемой Вселенной, является принятие гипотезы о прошлом, то есть дополнительного постулата, доминирующего над динамическими закона-

ми природы и утверждающего, что ранняя Вселенная обладала чрезвычайно низкой энтропией.

К тому времени, когда началось их противостояние с Цермело, Больцман и сам уже пришел к осознанию этого. Он назвал свою версию гипотезы о прошлом «предположением А» и писал о нем так:

Второе начало будет объяснено на уровне механики с помощью предположения А (разумеется, недоказуемого) о том, что Вселенная, если рассматривать ее как механическую систему, — или, по крайней мере, очень большая часть ее, окружающая нас, — началась с чрезвычайно маловероятного состояния и до сих пор находится в чрезвычайно маловероятном состоянии.¹¹

В этом коротком отрывке слова Больцмана выглядят весьма решительно и однозначно, но в действительности в контексте данной статьи он предлагает несколько разных объяснений, почему энтропия вокруг нас увеличивается, и это всего лишь одно из них. К тому же обратите внимание на то, как он осторожен: не только заранее соглашается, что предположение недоказуемо, но и не берется рассматривать всю Вселенную, ограничиваясь лишь «очень большой частью [Вселенной], окружающей нас».

К сожалению, эта стратегия не очень эффективна. Возражение Цермело о возвращении тесно связано с возражением об обратимости, и все же между ними существует важное различие. Возражение об обратимости всего лишь указывает на существование равного количества эволюций с увеличением энтропии и с уменьшением энтропии; в возражении о возвращении же говорится, что процессы с уменьшением энтропии *в конечном счете будут происходить когда-то в будущем*. Это означает, что энтропия системы не просто может уменьшаться: если подождать достаточно долго, то такое развитие событий гарантировано! Это более сильное утверждение, и если мы хотим ответить на него, то нам потребуются намного более сильные аргументы.

Для защиты от проблем, порождаемых возвращением, гипотеза о прошлом нам не помощник. Предположим, мы согласны, что в какой-то момент недавнего прошлого — возможно, миллиарды лет назад, но не так давно, чтобы это время было сравнимо со временем возврата, — Вселенная обнаружила себя в состоянии чрезвычайно низкой энтропии. После этого, как учит Больцман, энтропия должна начать увеличиваться, и на это уйдет время, намного меньшее времени возврата. Однако если Вселенная действительно вечна, то это не должно играть никакой роли. В конце концов, энтропия обязательно начнет уменьшаться, пусть нам и не посчастливится наблюдать это своими глазами. Таким образом, возникает вопрос: почему же так сложилось, что мы живем

именно на этом конкретном отрезке истории Вселенной, в относительно небольшой окрестности низкоэнтропийного состояния? Почему не в каком-то более «естественном» периоде жизни Вселенной?

Последний вопрос, особенно слово «естественный», открывает настоящий ящик Пандоры. Главная проблема заключается в том, что, согласно постулатам ньютоновской физики, у Вселенной нет «начала» или «конца». Нам, жителям XXI века, с нашими пост-эйнштейновскими взглядами, идея о том, что Вселенная началась с Большого взрыва, знакома и привычна. Но Больцман и Цермело, а также их современники, не знали об общей теории относительности и не слышали о расширении Вселенной. С их точки зрения пространство и время были абсолютными, а Вселенная существовала всегда. У них не было возможности замять эти неудобные вопросы, прикрывшись Большим взрывом.

Здесь и кроется проблема. Если Вселенная действительно вечна и не имеет ни начала, ни конца, то какой в этом случае смысл несет гипотеза о прошлом? Раньше, в прошлом, был какой-то момент, когда энтропия была невелика. А что было до того? Она оставалась на этом низком уровне бесконечно долгое время, пока не произошел какой-то процесс, заставивший энтропию расти? Или раньше энтропия уже когда-то была велика? Однако в таком случае как объяснить наличие этого особого, низкоэнтропийного момента посередине истории Вселенной? Похоже, мы попали в тупик: если Вселенная вечна, а предположения, лежащие в основе теоремы о возвращении, верны, то энтропия не может увеличиваться бесконечно; по завершении периода возрастания она должна пойти вниз, и так снова и снова в бесконечном цикле.

Существует по меньшей мере три способа разрешения этой дилеммы, и все они были упомянуты Больцманом.¹² (Он был убежден в своей правоте, но никак не мог остановиться на одном-единственном обосновании, постоянно изменяя свое мнение.)

Во-первых, у Вселенной действительно могло быть «начало», включающее низкоэнтропийное граничное условие. По всей видимости, именно это Больцман подразумевал в контексте упомянутого выше «предположения А», хотя в явном виде никогда не формулировал. Но на тот момент утверждение о том, что у времени есть начало, было бы сродни революции, так как это было отклонение от основных физических законов в том виде, как их заложил Ньютон. Сегодня подобное отклонение присутствует в нашем инструментарии в форме общей теории относительности и Большого взрыва, но ученым 1890-х годов эти идеи были недоступны. Насколько мне известно, никто из современников Больцмана не отнесся к проблеме низкой энтропии в начале Вселенной достаточно серьезно, чтобы сделать явное предположение о существовании начала

времен и о том, что что-то вроде Большого взрыва действительно могло произойти.

Во-вторых, предположения, лежащие в основе теоремы Пуанкаре о возвращении, могут попросту не соответствовать условиям реального мира. В частности, Пуанкаре предполагал, что пространство состояний каким-то образом ограничено и что частицы не могут улетать в бесконечность. Это звучит как техническое предположение, но почему бы глубокой истине не скрываться под личиной технического предположения? Больцман также считает это одной из возможных лазеек:

Если сначала принять число молекул равным бесконечности и позволить времени движения становиться очень большим, то в подавляющем большинстве случаев получается кривая [для энтропии как функции времени], которая асимптотически приближается к оси абсцисс. Как легко видеть, теорема Пуанкаре в этом случае неприменима.¹³

Однако на самом деле он не принимал этот вариант всерьез. Да и не должен был, так как в данном случае подвергается сомнению строгое следствие из теоремы о возвращении, а не ее базовая суть. Если средняя плотность частиц в пространстве отлична от нуля, то в нем будут встречаться всевозможные маловероятные флуктуации, включая низкоэнтропийные состояния; просто в флуктуациях в разные моменты времени обычно участвуют разные наборы частиц, поэтому возвращения, строго говоря, не происходит. Для этого сценария характерны все проблемы истинно возвратной системы.

Третий вариант ответа на возражение о возвращении — это даже не побег, это полная капитуляция. Мы признаем, что Вселенная вечна и что возвращение происходит, то есть во Вселенной наблюдаются периоды, когда энтропия возрастает, и периоды, когда она убывает. И мы просто говорим: да, это та Вселенная, в которой мы живем.

Давайте теперь рассмотрим все три возможности в контексте современного мышления. Многие современные космологи, хотя зачастую и неявно, подписываются под одной из разновидностей первого варианта, объединяя загадку низкоэнтропийных начальных условий с загадкой Большого взрыва. Это вполне жизнеспособная перспектива, хотя в ней слегка разочаровывает необходимость мириться с тем фактом, что состояние Вселенной в начале времен выходит за рамки физических законов. Второй вариант — во Вселенной бесконечное множество частиц, а теорема о возвращении попросту не работает — позволяет отвернуться от технических условий теоремы, но не помогает понять, почему наша Вселенная именно такая, какой она выглядит сейчас. Можно было

бы рассмотреть вариацию данного подхода, где во Вселенной существует лишь конечное множество частиц, но есть тем не менее бесконечное пространство для эволюции. Тогда возвращения действительно отсутствовали бы, а энтропия бы увеличивалась, не зная границ, далеко в прошлое и далеко в будущее. Это несколько напоминает сценарий Мультиленной, о котором я выскажусь чуть далее. Однако, насколько мне известно, ни Больцман, ни его современники не придерживались такой точки зрения.

Третий вариант — что возвращения действительно происходят во Вселенной, где мы живем, — не может быть верен, в чем мы скоро убедимся. Ошибки, доказывающие его несостоятельность, позволяют извлечь несколько ценных уроков.

Флуктуации вокруг равновесия

Вспомните контейнер с перегородкой, который мы рассматривали в главе 8. В перегородке есть отверстие, позволяющее молекулам газа периодически пролетать с одной стороны на другую. Для того чтобы смоделировать эволюцию неизвестного микросостояния каждой частицы, мы допускали, что у каждой молекулы есть небольшой фиксированный шанс перелететь на другую сторону. Формула Больцмана для энтропии помогла нам продемонстрировать, как энтропия будет меняться с течением времени; она имеет ярко выраженную тенденцию к увеличению, по крайней мере если в начале эксперимента вручную создать в системе состояние низкой энтропии, когда большая часть молекул располагается по одну сторону перегородки. Система естественным образом стремится к равновесию, то есть к состоянию, в котором количество молекул по обе стороны перегородки примерно одинаково. В этом случае энтропия достигает максимального значения, помеченного «1» на вертикальной оси графика 10.3.

Однако что, если вначале система *не будет* находиться в низкоэнтропийном состоянии? Что, если начать рассматривать ее в состоянии равновесия? Если второе начало термодинамики абсолютно истинно и энтропия никогда не уменьшается, то по достижении состояния равновесия система остается в нем навсегда. Но в вероятностном мире Больцмана это не совсем верно. С высокой вероятностью система, пришедшая к равновесию, действительно продолжит пребывать в этом равновесном состоянии или в состоянии, близком к нему. Однако если подождать достаточно долго, то мы непременно заметим случайные отклонения от этого состояния. И если время ожидания будет очень большим, то мы неминуемо увидим и чрезвычайно большие флуктуации.

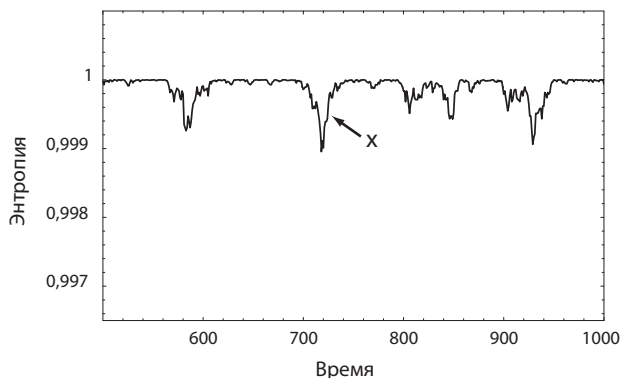


Рис. 10.3. Изменение энтропии в перегороженном контейнере с газом, начиная с состояния равновесия. Большую часть времени удерживается состояние, близкое к максимальной энтропии, но периодически можно заметить небольшие флуктуации в сторону более низкоэнтропийных состояний. Обратите внимание на сильно увеличенный масштаб по вертикальной оси; типичные флуктуации очень малы. Стрелкой с буквой *x* указан возврат к равновесному состоянию после относительно крупной флуктуации

На рис. 10.3 представлена эволюция энтропии в перегороженном контейнере с газом, содержащем 2000 частиц, но на этот раз — в более поздний период времени, после достижения равновесного состояния. Обратите внимание на то, что теперь мы рассматриваем изменения энтропии в огромном приближении: если графики в главе 8 демонстрировали изменение энтропии в диапазоне значений от 0,75 до 1, то здесь мы рассматриваем диапазон от 0,997 до 1.

То, что мы видим, — это небольшие отклонения от равновесного значения, в котором энтропия максимальна, а молекул примерно поровну в обеих половинах контейнера. И это совершенно логично, учитывая условия эксперимента: большую часть времени справа и слева от перегородки находится равное число частиц, но иногда может возникать небольшой перекося в ту или в другую сторону, соответствующий чуть меньшему значению энтропии. Абсолютно так же ситуация выглядит и при подбрасывании монеты: в среднем в длинной последовательности подбрасываний орел и решка выпадают одинаковое число раз, но если подождать достаточно долго, то нам будут встречаться подпоследовательности, в которых монета приземлялась на одну сторону много раз подряд.

Отклонения, которые мы здесь видим, очень малы, но, с другой стороны, мы не так уж долго ждали. Если растянуть эксперимент на более длительный

период — и здесь имеется в виду *гораздо* более длительный период, то энтропия в конечном итоге уменьшится до исходного значения, соответствующего конфигурации, при которой 80 % частиц находилось с одной стороны от перегородки, а 20 % частиц — с другой. Также не забывайте о том, что этот график иллюстрирует поведение энтропии для системы с 2000 частиц; в реальном мире, где любой макроскопический объект содержит намного больше частиц, флуктуации энтропии соответственно намного меньше и встречаются реже. Тем не менее они обязательно присутствуют. Их не может не быть — это неизбежное следствие вероятностной природы энтропии.

Таким образом, мы подошли к финальному предположению Больцмана: возможно, Вселенная именно такова. Возможно, время вечно и фундаментальные физические законы — ньютоновы и обратимы, и предположения, лежащие в основе теоремы о возвращении, верны.¹⁴ И, следовательно, вполне можно допустить, что график изменения энтропии во времени, показанный на рис. 10.3, показывает, как на самом деле изменяется энтропия реальной Вселенной.

Антропный принцип

Однако, скажете вы, такого не может быть. На этом графике энтропия половину времени возрастает, а половину времени убывает. В реальном мире все совсем не так; насколько мы можем видеть, энтропия у нас только возрастает.

Что же, отвечает Больцман, вам следует взглянуть на ситуацию шире. На этом графике показаны всего лишь крохотные флуктуации за относительно короткий период времени. Мы же, говоря о Вселенной, с очевидностью имеем в виду огромную флуктуацию энтропии, вероятность появления которой крайне мала, а длительность, наоборот, чрезвычайно велика. В целом, график энтропии Вселенной очень похож на тот, что изображен на рис. 10.3, а энтропия нашей локальной наблюдаемой части Вселенной соответствует лишь небольшому его участку — рядом с точкой, обозначенной x , где наблюдается процесс возвращения обратно к равновесному состоянию после флуктуации. Если здесь помещается вся история изведанной Вселенной, то нет ничего странного в том, что на своем веку мы наблюдаем второе начало термодинамики в действии. В то же время, если рассматривать сверхдлинные периоды, то окажется, что энтропия всего лишь немного колеблется около максимального значения.

Но, снова возразите вы, не готовые сдаваться без боя, почему мы живем именно на этом конкретном участке кривой, в период, непосредственно следующий за гигантской флуктуацией энтропии? Мы уже согласились с тем, что

подобные флуктуации невероятно редки. Не было бы логичнее оказаться в каком-то более типичном, среднестатистическом периоде истории Вселенной, где все, по сути, находится в равновесии?

Разумеется, Больцман предвидел это ваше возражение. И в этот момент он совершает поразительно современный ход — апеллирует к *антропному принципу*. По сути, антропный принцип — это идея о том, что любое разумное описание Вселенной вокруг нас должно учитывать тот факт, что мы существуем. Оно может принимать множество разных форм: от бесполезно слабого «тот факт, что жизнь существует, диктует нам, что законы физики должны быть совместны с существованием жизни» до смехотворно сильного «законы физики должны были принять ту форму, в которой мы их знаем, потому что существование жизни — необходимое условие». Споры вокруг статуса антропного принципа: есть ли в нем смысл? можно ли считать его научным? — разгораются весьма нешуточные, но редко приводят к каким бы то ни было полезным выводам или результатам.

К счастью, нас (и Больцмана) вполне устраивает благоразумная усредненная версия антропного принципа. А именно представьте себе, что реальная Вселенная намного больше (в пространственном измерении, во временном или в обоих) той части, которую мы в состоянии непосредственно наблюдать. Помимо этого, вообразите, что условия в разных фрагментах этой глобальной Вселенной очень сильно различаются. Например, в них наблюдается разная плотность вещества, а может быть, доходит даже до того, что действуют разные локальные физические законы. Каждую из таких областей можно назвать «Вселенной», а весь набор — «Мультиленной». Разные Вселенные в пределах Мультиленной могут быть физически связаны, а могут не иметь точек соприкосновения; для наших текущих целей это неважно. Наконец, представьте себе, что часть этих областей обладает благоприятными условиями для существования жизни, а часть — нет. (В этом месте всегда неизбежно возникает определенное недопонимание, поскольку в глобальном контексте мы знаем о «жизни» не так уж много.) Тогда — и этот довод выглядит совершенно безукоризненно — как ни крути, мы находимся в одной из тех частей Вселенной, где существование жизни допускается, но не в других, враждебных нам частях. Кажется, что это утверждение не несет смысла, но это не так. Оно иллюстрирует *эффект выбора*, искажающий наш взгляд на Вселенную в целом: мы не видим картины целиком; нашему восприятию доступен только один фрагмент, который вполне может оказаться абсолютно нерепрезентативным.

Больцман апеллирует к такой же точно логике. Он просит нас представить Вселенную, состоящую из некоторого набора частиц, движущихся сквозь аб-

солютное ньютоновское пространство—время, существующее на протяжении вечности. Чего в этом случае следует ожидать?

Тогда во Вселенной, которая в общем везде находится в тепловом равновесии, то есть мертва, то тут, то там должны существовать сравнительно небольшие области (назовем их единичными мирами), которые в течение довольно короткого времени по сравнению с вечностью значительно отклоняются от теплового равновесия, причем одинаково часты такие, в которых вероятность состояния [энтропия] увеличивается, и такие, в которых она уменьшается. Следовательно, для Вселенной оба направления времени неразличимы, так же как в пространстве не существует верха и низа. Но так же, как в определенной точке земной поверхности направление к центру Земли является направлением «вниз», живое существо, находящееся в определенной эпохе такого мира, будет определять направление времени как направление от менее вероятных состояний к более вероятным (первые будут называться «прошлым», вторые — «будущим»), и в соответствии с таким определением для него эта небольшая, изолированная от Вселенной область «сначала» всегда находится в маловероятном состоянии.¹⁵

Это весьма примечательный абзац, и после небольшой корректировки лексикона он абсолютно органично смотрелся бы в любом современном космологическом обсуждении. Больцман полагал, что Вселенная (или, если хотите, Мультиленная), по сути, представляет собой бесконечный контейнер с газом. Большая часть газа равномерно распределена по этому бескрайнему пространству и имеет постоянную температуру, то есть пребывает в тепловом равновесии. Проблема в том, что жить при тепловом равновесии мы не способны — это «мертвое» состояние, как без обиняков выразился Больцман. Но время от времени в этом бескрайнем контейнере возникают случайные флуктуации, и в конце концов одна из них создает нечто похожее на Вселенную, которую мы наблюдаем вокруг себя. (Больцман называет ее «наша галактика», что в то время считалось синонимом «наблюдаемой Вселенной».) А поскольку мы можем существовать исключительно в подобных условиях — в случайных далеких от равновесия флуктуациях, то нет ничего удивительного в том, что мы обнаруживаем себя в одной из них.

И разумеется, в период флуктуации энтропия увеличивается лишь половину времени: вторую половину она уменьшается, переходя от равновесного значения к временному минимальному значению. Однако об «увеличении» или «уменьшении» энтропии можно говорить лишь по отношению к какой-то заранее выбранной временной координате, которая, как мы обсуждали в предыдущей главе, сама по себе не поддается непосредственному наблюдению.

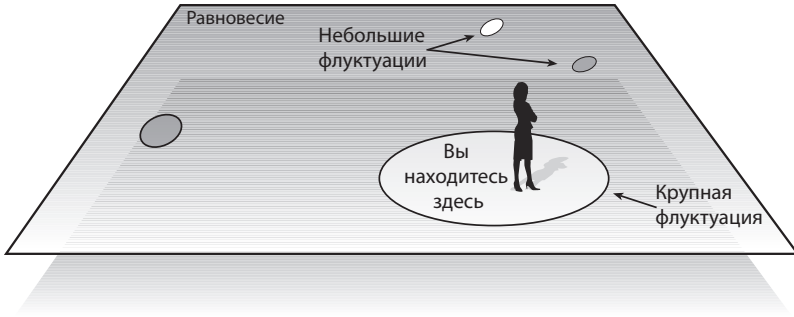


Рис. 10.4. «Мультиленная» Больцмана. Большую часть пространства составляет множество частиц, находящихся в равновесии, но также можно заметить редкие локальные флуктуации к низкоэнтропийным состояниям (обратите внимание на то, что масштаб совершенно не соблюдается). Мы живем в период, последовавший за одной исключительно крупной флуктуацией

Как верно подмечает Больцман, важно лишь то, что текущая Вселенная находится в процессе перехода между низкоэнтропийным состоянием и состоянием теплового равновесия. И пока этот переход происходит, любое живое существо всегда будет считать направление в сторону более низкого значения энтропии «прошлым», а направление к высокой энтропии — «будущим».

Эта картина Вселенной довольно провокационна. Если смотреть крупномасштабно, то вещество практически всегда находится в состоянии крайне разреженного газа при определенной температуре. Но время от времени на протяжении миллиардов лет последовательности случайных событий складываются так, что в результате появляются области аномально низкой энтропии, которые затем возвращаются обратно к равновесию. Вы и я, и вся суетливая деятельность, которую мы наблюдаем вокруг, — это побочные явления, которым повезло оседлать волну энтропии, которая откатывается назад после случайного путешествия в чрезвычайно маловероятное состояние.¹⁶

Так как же выглядит типичная флуктуация в период движения энтропии вниз? Ответ очевиден: в точности как инвертированная во времени типичная эволюция по направлению от низкоэнтропийного состояния к высокоэнтропийному. Вся Вселенная — все это бескрайнее море невероятно разреженного газа — не превратится внезапно, за считанные минуты, в высокоплотное состояние, соответствующее Большому взрыву. То тут, то там, растянутые во времени на миллиарды лет, будут возникать последовательности маловероятных

событий, каждое из которых способно сделать энтропию лишь незначительно меньше. Звезды и галактики могут распадаться, омлеты — превращаться в яйца, предметы, находящиеся в равновесии, — спонтанно демонстрировать значительные перепады температуры. Все эти события абсолютно независимы, каждое из них по отдельности маловероятно, а все вместе они составляют фантастически маловероятную комбинацию. Но если вы на самом деле способны потратить вечность на ожидание, то убедитесь, что даже самые невероятные вещи в конце концов случаются.

Отклонение в древние времена

В действительности Больцман не был первым, кто озвучивал подобные мысли. Не менее Больцмана пониманием мира в терминах атомов были озабочены его предки в античной Греции и Риме. Самым знаменитым последователем теории атомизма считается Демокрит (около 400 года до н. э.), но впервые предложил эту идею, вероятно, его учитель Левкипп. Оба они были материалистами, пытающимися объяснять мир в терминах объектов, подчиняющихся правилам, а не с точки зрения следования некоей глубинной «цели». В частности, они с интересом откликнулись на вызов, брошенный Парменидом, считавшим, что любые перемены — это лишь иллюзия. Теория атомов, в неизменном виде движущихся сквозь пустоту, должна была объяснить возможность движения без формирования понятия о возникновении чего-то из ничего.

Одна из основных сложностей, с которыми сталкивались древние последователи теории атомизма, заключалась в необходимости объяснить, почему мир вокруг так сложен и запутан. Атомы, полагали они, в основном демонстрируют тенденцию к падению вертикально вниз; из них не получилось бы сострять такую уж интересную Вселенную. Лишь греческий мыслитель Эпикур (около 300 года до н. э.) наконец-то предложил для этой головоломки решение в форме идеи, которую он назвал «отклонение» (*clinamen*).¹⁷ В сущности, Эпикур предположил, что в дополнение к базовому стремлению атомов двигаться вдоль прямых линий в их движении присутствует случайный компонент, время от времени бросающий их то в одну сторону, то в другую. Это отдаленно напоминает современную квантовую механику, хотя, разумеется, не стоит увлекаться настолько близкими сравнениями (Эпикур ничего не знал об излучении абсолютно черного тела, атомных спектрах, фотоэлектрическом эффекте и любых других экспериментальных результатах, послуживших причиной развития квантовой механики). Вводя в употребление свое «отклонение», Эпикур, помимо прочего, руководствовался желанием оставить пространство для

свободной воли — по сути, предлагал избавиться от демона Лапласа задолго до того, как зловредное чудовище впервые подняло свою уродливую голову. Однако еще одним мотивом было стремление объяснить, как так получается, что индивидуальные атомы собираются вместе и формируют макроскопические объекты, вместо того чтобы просто падать на Землю.

Римский поэт и философ Лукреций (около 50 года до н. э.) был ярким приверженцем теории атомизма и верным последователем Эпикура; он стал главным вдохновителем поэзии Вергилия. Его поэма «О природе вещей» (*De Rerum Natura*) — величайшее произведение, разъясняющее эпикурейскую философию и применяющее ее к всевозможным аспектам существования, от космологии до повседневной жизни. Среди его основных интересов было развенчивание суеверий; представьте себе Карла Сагана, пишущего строки в латинском гекзаметре. Знаменитый фрагмент «О природе вещей» учит не бояться смерти, которую Лукреций полагает всего лишь промежуточным состоянием в бесконечной игре атомов.

Лукреций применил теорию атомизма, и в частности идею отклонения, к вопросу происхождения Вселенной. Вот как, по его мнению, это случилось:

*Первоначала вещей, разумеется, вовсе невольно
Все остроумно в таком разместились стройном порядке
И о движеньях своих не условились раньше, конечно,
Но многократно свои положения в мире меняя,
От бесконечных времен постоянным толчкам подвергаясь,
Всякие виды пройдя сочетаний и разных движений,
В расположенья они, наконец, попадают, из коих
Вся совокупность вещей получилась в теперешнем виде.¹⁸*

Первые строки следует читать с определенной долей сарказма. Лукреций высмеивает идею о том, что атомы каким-то образом могли сговориться и создать космос; на самом деле они просто-напросто хаотично летают туда-сюда. Однако, несмотря на случайный характер движения, мы тем не менее увидим зарождение Вселенной, если потратим на ожидание достаточно много времени.

Схожесть со сценарием Больцмана по-настоящему поражает. Тем не менее не следует забывать и приписывать античным философам понимание современных научных взглядов. Они жили в иные времена, по-иному смотрели на жизнь и работали исходя из иных предпосылок, отличных от тех, с которыми приходится иметь дело нам сегодня. И все же схожесть сценариев сотворения, предложенных Лукрецием и Больцманом, — не просто совпадение. В обоих случаях стояла задача объяснить возникновение очевидно чрезвычайно слож-

ного окружающего мира, не ссылаясь на общий замысел, а отталкиваясь исключительно от случайного движения атомов. Неудивительно, что они пришли к практически идентичным выводам. А идею о том, что наша наблюдаемая Вселенная — это случайная флуктуация в вечном космосе, абсолютно справедливо будет называть «сценарием Больцмана—Лукреция» происхождения Вселенной.

Однако может ли реальный мир действительно быть таким? Правда ли, что мы живем в вечной Вселенной, которая большую часть времени пребывает в равновесии и лишь изредка демонстрирует отклонения, выглядящие как мир вокруг нас? Здесь нам приходится полагаться на математический формализм, разработанный Больцманом и его коллегами, к которому у Лукреция доступа не было.

Собирая яйцо из осколков

Проблема сценария Больцмана—Лукреция не в том, что невозможно создать Вселенную подобным образом; в контексте ньютоновского пространства—времени (с бессмертными атомами, сталкивающимися друг с другом и периодически порождающими случайные флуктуации, уменьшающие значение энтропии), если подождать достаточно долго, область именно того размера и формы, которыми обладает наша Вселенная, совершенно точно однажды появится.

Проблема в том, что числа не складываются. Определенно, возможна флуктуация в нечто, что выглядит как наша Вселенная. Но при этом возможны и другие флуктуации во множество других конфигураций. И эти другие конфигурации выигрывают за счет очевидного численного перевеса.

Вместо того чтобы пытаться уложить в голове идею о невообразимо огромном наборе частиц, случайным образом складывающихся в нечто вроде окружающей нас Вселенной (или хотя бы галактики), давайте немного упростим сюжет и рассмотрим один из наших любимых примеров, показывающих действие энтропии, — яйцо. Целое, неразбитое яйцо довольно упорядоченно и обладает очень низкой энтропией. Если же мы разобьем яйцо, то энтропия возрастет, а если в дополнение к этому мы взобьем его ингредиенты, то энтропия увеличится еще больше. Состоянием с максимальной энтропией будет суп из отдельных молекул; детали конфигурации будут зависеть от температуры, наличия гравитационного поля и т. д., но все это не важно для наших текущих целей. Смысл в том, что конечное состояние не будет иметь ничего общего с неразбитым яйцом.

Представьте себе, что мы берем такое яйцо и запечатываем его в абсолютно непроницаемый контейнер, способный просуществовать целую вечность, не будучи потревоженным остальной Вселенной. Для удобства мы помещаем яйцо-в-контейнере в межзвездное пространство, вдали от любых гравитационных или внешних сил, и воображаем, что на протяжении вечности оно спокойно парит, не подвергаясь никакому внешнему воздействию. Что будет происходить внутри контейнера?

Даже если изначально мы положили в контейнер неразбитое яйцо, в конце концов оно разобьется — просто вследствие случайных перемещений его молекул. Какое-то время оно проведет в форме неподвижного разбитого яйца, разделенного на желток, белок и скорлупу. Но если мы подождем достаточно долго, то дальнейшие случайные перемещения постепенно приведут к разрушению и смешиванию желтка и белка и даже скорлупы, и в итоге у нас получится истинно высокоэнтропийное состояние единообразных молекул яйца. Это равновесие, и оно продлится необычайно долгое время.

Однако если мы еще подождем, то те же случайные перемещения, которые изначально заставили яйцо разбиться, продолжают передвигать молекулы, образуя состояния с более низкой энтропией. Например, все молекулы могут скопиться у одной стенки контейнера. И по прошествии очень большого времени случайные перемещения приведут к воссозданию объекта, выглядящего в точности как разбитое яйцо (скорлупа, желток и белок) или даже как неразбитое яйцо! Это заявление кажется абсурдным, но оно непосредственно следует из теоремы о возвращении Пуанкаре и полностью удовлетворяет идею о случайных флуктуациях на протяжении невероятно продолжительных периодов времени.

По большей части процесс формирования яйца посредством случайных перемещений составляющих его молекул будет выглядеть как обратная перемотка во времени процесса превращения целого яйца в высокоэнтропийную однородную массу: сначала мы увидим, как из массы формируется разбитое яйцо, а потом осколки разбитого яйца случайным образом собираются так, что в результате получается целое яйцо. Это всего лишь следствие симметрии относительно обращения времени; наиболее распространенные варианты эволюции из высокой энтропии в низкую выглядят как отражения во времени наиболее распространенных вариантов эволюции из низкой энтропии в высокую.

Однако это и есть камень преткновения. Предположим, что такое яйцо, запечатанное в непроницаемый контейнер, существует, и мы заглядываем внутрь

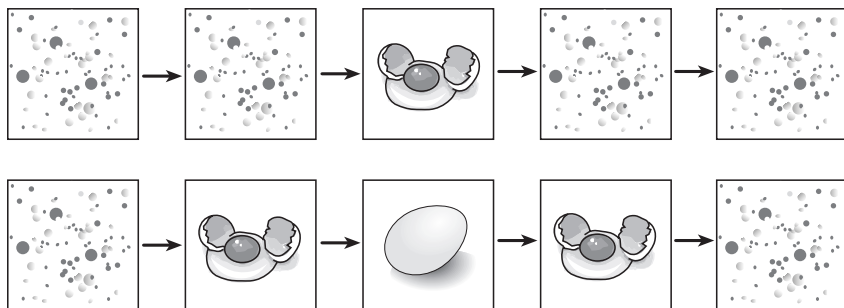


Рис. 10.5. Яйцо, навечно запечатанное в непроницаемый контейнер. Большую часть времени в контейнере будут находиться молекулы яйца в высокоэнтропийном равновесном состоянии. Изредка они будут переходить в конфигурацию с небольшой энтропией, напоминающую разбитое яйцо, как в верхнем ряду. Еще реже эта система будет опускаться до нижней отметки энтропии и образовывать неразбитое яйцо, а затем опять возвращаться к высокоэнтропийному состоянию, как в нижнем ряду

контейнера по прошествии абсурдно долгого времени — намного больше времени возврата, в течение которого яйцо было предоставлено само себе. Наиболее вероятно, что перед нашими глазами предстанет картина, очень близкая к равновесному состоянию: однородная смесь из молекул яйца. Но предположим также, что нам необычайно повезло и в контейнере обнаруживается нечто, напоминающее разбитое яйцо: состояние со средней энтропией, в котором осколки скорлупы и желток плавают в лужице белка. Другими словами, мы видим яйцо в том виде, каким оно должно быть, если совсем недавно оно было целым и по каким-то причинам внезапно разбилось.

Имеем ли мы право, видя такое разбитое яйцо, уверенно делать вывод о том, что совсем недавно в контейнере находилось яйцо в целом, нетронутом состоянии? Вовсе нет. Вспомните обсуждение в конце главы 8. Если дана конфигурация со средней энтропией и при этом отсутствуют какие-либо знания о микроскопическом состоянии или предположения вроде гипотезы о прошлом (которая, очевидно, неприменима в контексте этого древнего запечатанного контейнера), можно сделать только один вывод: с подавляющей вероятностью это состояние стало следствием высокоэнтропийного прошлого и также с подавляющей вероятностью оно развивается в сторону высокоэнтропийного будущего. Иными словами, у разбитого яйца не больше шансов стать *результатом* эволюции целого яйца, чем эволюционировать далее в целое яйцо. Таким образом, это вообще очень маловероятно.

Мозг Больцмана

Пример с яйцом в контейнере иллюстрирует фундаментальную проблему сценария Больцмана—Лукреция: невозможно апеллировать к гипотезе о прошлом, заявляющей о существовании низкоэнтропийного состояния в прошлом, потому что Вселенная (или яйцо) просто проходит циклически через все возможные для нее конфигурации, делая это с предсказуемой частотой. Во Вселенной, существующей вечно, нет такого понятия, как «начальное состояние».

Идея о том, что Вселенная большую часть времени пребывает в термодинамическом равновесии, но мы все же можем апеллировать к антропному принципу, чтобы объяснить, почему наше локальное окружение не находится в равновесии, позволяет сделать уверенное предсказание — и это предсказание, тем не менее, уверенно опровергается реальными данными. Это предсказание заключается всего лишь в том, что *мы должны находиться как можно ближе к состоянию равновесия*, при условии, что у нас (при каком-то допустимом определении того, кто такие «мы»), в принципе, должна быть возможность существовать. Флуктуации случаются, но крупные флуктуации (такие, как образование неразбитого яйца) происходят куда реже, чем мелкие (такие, как образование разбитого яйца). Это хорошо видно на рис. 10.3, где кривая показывает множество мелких флуктуаций и всего лишь пару больших. А Вселенная, которую мы наблюдаем вокруг себя, не может не быть поистине гигантской флуктуацией.¹⁹

Мы могли бы еще точнее описать, как выглядела бы Вселенная, если бы она представляла собой вечную систему, колеблющуюся вокруг равновесия. Для объяснения, почему мы не обнаруживаем себя в одной из более обыденных для нее равновесных фаз, Больцман обращался к антропному принципу (хотя и не называл его этими словами): в равновесии жизнь существовать не может. Очевидно, что нам необходимо найти во Вселенной наиболее типичные условия, являющиеся при этом благоприятными для жизни. Или же, если быть немного точнее, нам следует искать условия, благоприятные не просто для жизни, но для определенного вида разумной и сознательной жизни, к которому мы себя причисляем.

Может быть, это и есть искомый ответ? Возможно, могли бы рассуждать мы, для появления такой продвинутой научной цивилизации, как наша, требуется «система поддержки» в форме целой Вселенной, наполненной звездами и галактиками и к тому же рожденной в определенных начальных условиях, характеризующихся сверхнизкой энтропией? Возможно, это могло

бы объяснить, почему вокруг себя мы наблюдаем такую расточительную Вселенную.

Но нет. Вот как надо играть в эту игру. Вы называете мне конкретный объект, необходимость существования которого во Вселенной объясняется антропными причинами: Солнечная система, планета, определенная экосистема, тип сложной жизни, комната, в которой вы сейчас находитесь, — все что угодно. А затем мы спрашиваем: «С учетом этого требования, каково наиболее вероятное состояние *оставшейся* части Вселенной в сценарии Больцмана—Луcreция в дополнение к конкретному объекту, про который мы спрашиваем?»

Ответ всегда будет одним и тем же: наиболее вероятное состояние оставшейся части Вселенной — равновесие. Если мы спросим: «По какому пути бесконечный контейнер с газом, находящийся в равновесии, с наибольшей вероятностью может перейти в состояние, включающее тыквенный пирог?», то ответом будет: «Через флуктуацию в состояние, содержащее тыквенный пирог, одиноко плавающий в контейнере с газом, однородным везде, кроме этого пирога». Добавление чего угодно к этой картине как в пространстве, так и во времени — печи, пекаря, ранее существовавшей грядки с тыквами — всего лишь делает сценарий менее вероятным, так как для его воплощения энтропии пришлось бы упасть еще ниже. Получается, что самый простой способ получить в этом контексте тыквенный пирог — подождать, пока он сам по себе постепенно не сформируется из окружающего хаоса из-за флуктуаций.²⁰

Артур Эддингтон в своей лекции 1931 года рассматривал абсолютно допустимый антропный критерий:

Вселенная, содержащая физиков-математиков [при таких предположениях], в любую заданную дату будет находиться в состоянии максимальной дезорганизации, не противоречащей существованию подобных существ.²¹

Эддингтон предполагает, что для создания качественной Вселенной обязательно требуется физик-математик. К сожалению, если Вселенная — это подверженный вечным колебаниям набор молекул, то чаще всего в ней будут встречаться физики-математики, одиноко существующие сами по себе в окружении хаоса.

Доведем эти рассуждения до логического конца. Если нам требуется всего лишь одна планета, то мы, определенно, не испытываем необходимости в сотнях миллиардов галактик с сотней миллиардов звезд в каждой. И если нам нужен один человек, то нет никакого смысла в целой планете. А если речь идет на самом деле об одном-единственном разуме, способном размышлять о мире, то

отпадает необходимость даже в целом человеке — достаточно всего лишь его или ее мозга.

Таким образом, доведя данный сценарий до абсурда, мы заключаем, что подавляющее большинство разумов в этой Мультиленной будут представлять собой одинокие, не связанные ни с какими телами мозга, которые постепенно, за счет флуктуаций, появляются из окружающего хаоса и так же неторопливо растворяются в нем. Подобные печальные создания с легкой руки Андреаса Альбрехта и Лоренцо Сорбо получили название «больцмановские мозги».²² Вы и я — не больцмановские мозги. Нас можно было бы назвать «обычными наблюдателями», которые не вылупились самостоятельно из окружающего равновесия, а постепенно эволюционировали из существовавшего ранее состояния с очень низкой энтропией. Таким образом, гипотеза о том, что наша Вселенная — это случайная флуктуация из состояния равновесия в вечном пространстве—времени, похоже, опровергнута.

Нам ничто не мешало спокойно следовать этой линии рассуждений, когда речь шла всего лишь о яйце, но стоит начать сравнивать количество бестелесных мозгов с количеством обычных наблюдателей, и мы сразу же дергаем стоп-кран. Тем не менее и в том и в другом случае логика одна и та же, если (и это очень важное «если»!) мы рассматриваем вечную Вселенную, полную совершающих случайные колебания частиц. В такой Вселенной мы знаем, какие типы флуктуаций случаются и как часто это происходит; чем сильнее изменяется энтропия, тем менее вероятна соответствующая флуктуация. Неважно, как много обычных наблюдателей существует сегодня в нашей Вселенной — их число совершенно ничтожно по сравнению с тем, сколько больцмановских мозгов появится в будущем. Любой наблюдатель — это, по сути, набор частиц в определенном состоянии, и данное состояние будет встречаться бесконечно часто. А ситуации, когда этот набор частиц будет окружен высокоэнтропийным хаосом, будут возникать намного чаще, чем ситуации, когда ему удастся выступить в роли одной из составляющих частей «обычной» Вселенной.

Теперь, просто чтобы ничего не упустить: а вы *точно* уверены, что вы не больцмановский мозг? Вероятно, сейчас вы возразите, что прекрасно чувствуете остальные части своего тела, видите другие объекты вокруг себя и, если уж на то пошло, у вас есть воспоминания о низкоэнтропийном прошлом: все эти вещи несовместимы с идеей о том, что вы в действительности — бестелесный мозг, недавно выделившийся из окружающих молекул. Однако проблема в том, что на самом деле любые подобные утверждения о предполагаемом состоянии внешнего мира — это утверждения о состоянии вашего мозга. Ваши чувства, ваше зрительное восприятие, ваши воспоминания — все это определяется

состоянием мозга. Мы вполне можем вообразить, что мозг, обладающий в точности такими же ощущениями, взял и выделился из окружающего хаоса. И, как мы уже говорили выше, вероятность того, что в результате какой-то флуктуации появится одинокий мозг, гораздо выше вероятности появления такого же мозга, но в составе гигантской Вселенной. В сценарии Больцмана—Лукреция у нас нет возможности обратиться за помощью к гипотезе о прошлом, поэтому весьма высока вероятность того, что все наши воспоминания фальшивы.

Тем не менее можно с легким сердцем отметить эту возможность, всего лишь подойдя со всей строгостью к заявлению, которое мы пытаемся сделать. Неправильно говорить: «Я знаю, что я не больцмановский мозг, следовательно, Вселенная не может быть случайной флуктуацией». Правильно говорить: «Если бы я был больцмановским мозгом, то существовало бы надежное предсказание: все остальные составляющие Вселенной должны находиться в равновесии. Но это не так. Следовательно, Вселенная не может быть случайной флуктуацией». Если же придерживаться скептического настроения, то мы можем дополнительно задаться вопросом: а вдруг не только наше текущее ментальное состояние, но и все дополнительные сенсорные данные, которые мы, очевидно, аккумулируем, представляют собой всего лишь какую-то случайную флуктуацию, а вовсе не точное описание нашего реального окружения? Строго говоря, такое тоже вполне вероятно, но это весьма шаткое заявление с когнитивной точки зрения по причинам, которые мы обсуждали в предыдущей главе. В этом случае просто не существует осмысленных понятий жизни, и мышления, и действия, поэтому нет никаких причин считать его истинным. Лучше принимать окружающую нас Вселенную такой, какой она (по большей части) кажется.

Эту идею в своем фирменном простом и доступном стиле изложил Ричард Фейнман в знаменитых *Фейнмановских лекциях по физике*:

... из гипотезы, что мир — это флуктуация, следует, что когда мы взглянем на часть мира, прежде нами не виденную, мы должны обнаружить в ней смесь, беспорядок, — в отличие от известного нам прежде мира. Если весь наш порядок есть флуктуация, выброс, мы не смеем надеяться на порядок где-либо сверх того, где он уже обнаружен...

Из этого мы заключаем, что Вселенная — не флуктуация и что наш порядок — это память о тех временах, когда все только начиналось. Мы не говорим, что нам понятна логика этого. По каким-то причинам Вселенная когда-то имела очень малую для своего энергосодержания энтропию, и с той поры энтропия возросла. Это путь по направлению в будущее. В этом начало всех необратимостей. Именно это порождает процессы роста и распада. Именно из-за этого мы вспоминаем не будущее, а прошлое, вспоминаем события,

которые ближе к тому моменту в истории мира, когда было больше порядка, чем сейчас. Именно поэтому мы не способны вспомнить события того времени, когда больше беспорядка, чем сейчас, — мы называем это время будущим.²³

Кто мы такие в Мультиенной?

Нам осталось разделаться с последней лазейкой, и дверь в сценарий Больцмана—Лукреция будет окончательно запечатана. Для начала мы соглашаемся со следствиями из традиционной статистической механики: небольшие флуктуации энтропии случаются намного чаще крупных, а подавляющее большинство разумных наблюдателей во Вселенной, бесконечно колеблющейся вокруг равновесия, будут обнаруживать себя в полном одиночестве в высокоэнтропийном окружении, а не эволюционирующими естественным образом из более ранней конфигурации, обладавшей невероятно низкой энтропией.

Кто-то может спросить: ну и что? Почему меня должно волновать то, что большинство наблюдателей (при любом возможном определении «наблюдателя») так же одиноки, как монструозные флуктуации на высокоэнтропийной сцене? Меня волнует исключительно то, кто я такой, а не то, на что похоже большинство наблюдателей. И раз на извечном жизненном пути мира в целом (каким бы он ни был) существует тот единственный экземпляр Вселенной, который я вижу вокруг себя, я могу смело заявлять: наблюдаемая картина соответствует данным.

Другими словами, использование аргументации, основанной на больцмановском мозге, соответствует явному предположению о том, что мы каким-то образом стали «типичными наблюдателями» во Вселенной и, следовательно, должны строить прогнозы исходя из вопроса, какая картина предстанет перед взором большинства наблюдателей.²⁴ Звучит довольно безобидно, даже скромно. Но если приглядеться получше, станет очевидно, что эта цепочка рассуждений ведет к куда более серьезным заключениям, чем мы в состоянии обосновать.

Представьте себе, что у нас есть две теории Вселенной, идентичные по всем показателям, за исключением того, что, согласно первой, некая похожая на Землю планета, вращающаяся вокруг звезды Тау Кита, служит домом для расы из десяти триллионов разумных ящероподобных созданий, в то время как другая предсказывает, что в системе Тау Кита не существует вообще никакой разумной жизни. Большинство из нас не будут возражать, что мы не обладаем в настоящее время достаточной информацией, чтобы согласиться с одной или другой теорией. Но если мы действительно являемся типичными наблюдате-

лями во Вселенной, то из первой теории решительно следует, что, скорее всего, мы и есть те самые ящеры на планете, вращающейся вокруг Тау Кита, а вовсе не люди здесь, на Земле, просто потому, что ящеров намного больше, чем людей. Однако это предсказание неверно; то есть мы, очевидно, исключили саму возможность существования такого числа наблюдателей, даже не прикладывая усилий к сбору реальных данных о том, что в действительности творится в системе Тау Кита.

Предположение о нашей с вами типичности может показаться простой демонстрацией нашей скромности, но на самом деле из него вытекает чрезвычайно сильное заявление о том, что должно происходить в оставшейся части Вселенной. Не просто «мы являемся типичными наблюдателями», но «типичные наблюдатели должны быть похожи на нас». В такой формулировке это выглядит куда серьезнее, чем мы вправе предполагать (в литературе это известно под названием «проблемы самонадеянного философа»). Таким образом, наверное, вообще не следует заниматься сравнением числа разных типов наблюдателей во Вселенной; мы должны лишь спрашивать, предсказывает ли данная теория существование наблюдателей, подобных нам, *хоть где-либо*. И если такие наблюдатели существуют, то можно соглашаться, что теория соответствует данным. Если бы этот путь мышления был верным, то у нас не было бы причин отбрасывать сценарий Больцмана—Лукреция. Несмотря на то что большинство наблюдателей останутся одинокими во Вселенной, некоторые обнаружат себя в таких областях, как наша, а значит, теория продемонстрирует полное совпадение с практическим опытом.²⁵

Проблема такого минималистского подхода в том, что он предлагает не слишком много, а слишком мало инструментов для предсказания событий, которые могут или не могут случиться во Вселенной. Статистическая механика полагается на принцип безразличия — предположение о том, что все микросостояния, соответствующие нашему текущему макросостоянию, одинаково вероятны, по крайней мере если речь идет о предсказании будущего. По сути, это и есть предположение о типичности: наше микросостояние, скорее всего, представляет собой типичную составляющую нашего макросостояния. Если у нас нет возможности делать подобные предположения, то любые виды статистической аргументации нам также недоступны. Мы не можем утверждать, что кубик льда растает в стакане теплой воды, потому что в вечной Вселенной время от времени встречаются периоды, когда происходит ровно противоположное. Похоже, в своем беспокойстве о типичности мы зашли слишком далеко.

Вместо этого нам следует ставить себе целью некое разумное среднее. Претензия на то, чтобы называть себя типичными среди множества наблюдателей

во Вселенной, слишком дерзка, так как содержит очень сильное заявление о состоянии множества фрагментов Вселенной, которых мы даже никогда не видели. Тем не менее мы можем смело заявлять, что мы — типичные представители наблюдателей, *в точности подобных нам*, то есть наблюдателей с такой же, как у нас, базовой физиологией и тем же набором воспоминаний, а также аналогичным, в первом приближении, опытом жизни во Вселенной.²⁶ Такое предположение не позволяет делать никакие необоснованные выводы о возможном существовании других видов разумных существ где-то еще во Вселенной. Но его более чем достаточно, чтобы опровергнуть сценарий Больцмана—Лукреция. Если Вселенная колеблется вокруг теплового равновесия на протяжении вечности, то появляться в полном одиночестве из окружающего хаоса будет не просто большинство наблюдателей; точно так же от хаоса будет отпочковываться подмножество наблюдателей, обладающих в точности такими же характеристиками, как у меня или у вас, в том числе с нашими предполагаемыми воспоминаниями о прошлом. Подобные воспоминания будут в большинстве случаев ложными, и флуктуация в описываемые ими условия очень маловероятна, но более вероятна, чем флуктуация, порождающая целую Вселенную. Даже этого минимально необходимого условия для выполнения статистических рассуждений: мы выбраны случайным образом из множества всех наблюдателей, в точности идентичных нам, — более чем достаточно, чтобы отмести сценарий Больцмана—Лукреция.

Наблюдаемая нами Вселенная не флуктуация, вернее, она как минимум не может быть статистической флуктуацией в вечной Вселенной, которая большую часть времени проводит в равновесии. Итак, мы поняли, чем наша Вселенная не является. Что же она тогда такое *на самом деле*, нам еще предстоит выяснить.

Финал

Вечером 5 сентября 1906 года Людвиг Больцман взял кусок шнура, привязал его к карнизу в гостиничном номере в Италии, куда он приехал на отдых с семьей, и повесился. Тело было обнаружено его дочерью Эммой, когда она тем вечером вернулась в гостиницу. Больцману было шестьдесят два года.

Причины самоубийства Больцмана по сей день остаются неясными. Некоторые предполагают, что он был подавлен вследствие непопулярности его идей, связанных с атомной теорией. Тем не менее, хотя многие немецкие ученые того времени к атомной теории действительно относились скептически, кинетическая теория превратилась в общемировой стандарт, и статус Больцмана как крупнейшего ученого не ставился под сомнение ни в Австрии, ни в Герма-

нии. Больцман страдал от проблем со здоровьем и был склонен к приступам депрессии; до этого он уже совершал попытки самоубийства.

Однако его депрессия носила перемежающийся характер; всего лишь за несколько месяцев до смерти он написал и разослал друзьям увлекательный и полный энтузиазма отчет о совершенной годом ранее поездке в Америку с целью прочесть лекцию в Калифорнийском университете в Беркли. Больцман называл Калифорнию «Эльдорадо», но находил американскую воду непригодной для питья, поэтому пил только пиво и вино. Это вызывало определенные сложности, так как в то время в Америке было очень сильно движение трезвенников, и в Беркли, в частности, было не купить алкогольных напитков. В своем отчете Больцман напоминает множество попыток тайком пронести вино в разные заведения, где оно было запрещено.²⁷ Мы, вероятно, так никогда и не узнаем, какая комбинация слабого здоровья, депрессии и научных противоречий подтолкнула его сделать последний шаг.

Что касается вопроса существования атомов и их пригодности для понимания свойств макроскопических объектов, то все оставшиеся сомнения в правоте Больцмана были развеяны вскоре после его смерти. В одной из своих работ, сделанных в его «чудесном» 1905 году, Альберт Эйнштейн объясняет броуновское движение (кажущиеся случайными перемещения крохотных частиц, находящихся в воздухе) в терминах столкновений с отдельными атомами; этому труду удалось одержать победу над скептицизмом, оставшимся в кругах физиков.

Разумеется, нам еще предстоит дать ответы на множество вопросов о природе энтропии и втором начале термодинамики. Когда речь заходит об объяснении низкой энтропии ранней Вселенной, мы не можем сказать «Больцман был прав», так как он предложил целый набор разнообразных возможностей, так и не выбрав среди них единственный, по его мнению, верный вариант. Однако он определил направления дальнейших дискуссий и споров, и мы все еще скрещиваем копыта над вопросами, над которыми он ломал голову более века назад.

Примечания

¹ Ницше Ф. Веселая наука. — М.: Фолио, 2013 (*Nietzsche, F. W. Die Fröhliche Wissenschaft*). Со всеми этими демонами — демоном Паскаля, демоном Максвелла и демоном Ницше — начинает создаваться впечатление, будто мы с вами читаем не научное произведение, а «Ад» «Божественной комедии» Данте. Ранее в «Веселой науке» Ницше затрагивает физику в более явной форме, хотя и в несколько ином контексте: «Мы же сами стремимся стать тем, что мы в действительности из себя представляем, — новыми,

обособленными, несравнимыми законодателями для самих себя, творцами самих себя! И к тому же мы должны лучше других открывать и учить тому, что является законным, необходимым в этом мире: мы должны быть *физиками* для того, чтобы стать в этом смысле творцами, — в то время как до сих пор все ценности и идеалы воздвигались или при пренебрежении физикой, или в противоречии с ней. А потому: да здравствует физика! И еще больше: да здравствует та сила, которая принуждает нас обратиться к ней, — наше чистосердечие!»

- ² Подчеркну также, что если бы каждый цикл был идеальной копией всех предыдущих, то у вас не сохранялось бы никаких воспоминаний об опыте проживания любой из предыдущих версий жизни (поскольку у вас не было таких воспоминаний ранее, следовательно, они не могли появиться в точной копии). Не совсем понятно, в чем заключалось бы отличие, если бы цикл повторялся только один раз.
- ³ Подробнее об этой истории см. книгу *Galison, P. Einstein's Clocks, Poincaré's Maps: Empires of Time*. New York: W.W. Norton, 2003. Работа Пуанкаре: *Poincaré, H. Sur les problème des trois corps et les équations de la dynamique // Acta Mathematica*, 1890, 13, p. 1–270. Перевод избранных отрывков в Brush (2003, vol. 2). *On the Three-Body Problem and the Equations of Dynamics*, p. 194–202.
- ⁴ Вторая тонкость состоит в том, что, хотя система гарантированно вернется к начальной конфигурации, никто не гарантирует, что она побывает во *всех* возможных конфигурациях. Идея о том, что достаточно сложная система может побывать во всех возможных состояниях, эквивалентна идее об эргодичности системы, о чем мы говорили в главе 8 в контексте обоснования подхода Больцмана к статистической механике. Для некоторых систем это действительно так, но не для всех, и даже не для каждой интересной системы.
- ⁵ Это моя книга, так что Плутон все еще считается.
- ⁶ Грубо говоря, время возврата равно экспоненте максимальной энтропии системы в единицах типичного времени, необходимого системе для перехода в следующее состояние. (Мы подразумеваем, что существует фиксированное определение того, как сильно два состояния должны различаться, чтобы их можно было считать разными.) Помните, что энтропия равна логарифму числа состояний, а экспонента снимает логарифм. Другими словами, время возврата всего лишь пропорционально полному количеству состояний, в которых может находиться система, что вполне имеет смысл, если система проводит в каждом допустимых состояний приблизительно одинаковое время.
- ⁷ *Больцман Л. Избранные труды*. М.: Наука, 1984 (*Poincaré, H. Le mécanisme et l'expérience // Revue de Metaphysique et de Morale*, 1893, 4. Перевод в Brush (2003, vol. 2) под названием *Mechanics and Experience*).
- ⁸ *Zermelo, E. Über einen Satz der Dynamik und die mechanische Warmtheorie // Annalen der Physik* 1896, 57, S. 485. Перевод в Brush (2003) под названием *On a Theorem of Dynamics and the Mechanical Theory of Heat*, 382.
- ⁹ *Больцман Л. Избранные труды*. М.: Наука, 1984 (*Boltzmann, L. Entgegnung auf die wärmetheoretischen Betrachtungen des Herrn. E. Zermelo [ответ на замечания Цермело о теории теплоты] // Annalen der Physik*, 1896, 57, S. 773).
- ¹⁰ *Zermelo, E. Über mechanische Erklärungen irreversibler Vorgänge // Annalen der Physik*, 1896, 59, S. 793. Перевод в Brush (2003) под названием *On the Mechanical Explanation of Irreversible Processes*, 403; *Boltzmann, L. Zu Hrnn. Zermelo's Abhandlung 'Über die mechanische*

Erklärung irreversibler Vorgänge' [ответ на статью Цермело On the Mechanical Explanation of Irreversible Processes] // *Annalen der Physik*, 1897, 60, S. 392.

¹¹ Boltzmann, L. Zu Hrn. Zermelo's Abhandlung 'Über die mechanische Erklärung irreversibler Vorgänge' [ответ на статью Цермело On the Mechanical Explanation of Irreversible Processes] // *Annalen der Physik*, 1897, 60, S. 392.

¹² «По меньшей мере» три способа — потому что человеческий разум весьма изобретателен. Но все же вариантов не так много; еще одним могла бы служить идея о том, что фундаментальные законы физики по своей природе необратимы.

¹³ Больцман Л. Избранные труды. М.: Наука, 1984 (*Boltzmann, L. Entgegnung auf die wärmetheoretischen Betrachtungen des Hrn. E. Zermelo* [ответ на замечания Цермело о теории теплоты] // *Annalen der Physik*, 1896, 57, S. 773).

¹⁴ Мы полагаем, что теорема о возвращении верна по своему духу, а не по букве. Для того чтобы доказать теорему о возвращении, необходимо рассматривать ограниченное движение частиц, — возможно, это планеты, движущиеся по замкнутым орбитам вокруг Солнца, или молекулы газа, заключенные в непроницаемый контейнер. Ни один из этих случаев, разумеется, не соответствует реальной Вселенной, но никто и не говорит, что это может быть правдой. Если бы Вселенная состояла из конечного числа частиц, движущихся внутри бесконечного пространства, то мы бы ожидали, что часть из них будет просто навсегда улетать от нас и никаких возвращений не будет. Однако если мы имеем дело с бесконечным числом частиц в бесконечном пространстве, то это дает нам возможность оценить фиксированную конечную среднюю плотность — число частиц на (к примеру) кубический световой год. В этом случае флуктуации в той форме, как показано выше, непременно будут происходить, — а они во всех отношениях похожи на возвращения Пуанкаре.

¹⁵ Больцман Л. Избранные труды. М.: Наука, 1984 (*Boltzmann, L. Zu Hrn. Zermelo's Abhandlung 'Über die mechanische Erklärung irreversibler Vorgänge'* [ответ на статью Цермело On the Mechanical Explanation of Irreversible Processes] // *Annalen der Physik*, 1897, 60, S. 392). Весьма похожее предположение он сделал в одной из более ранних статей (1895), приписав авторство своему «давнему ассистенту доктору Шутцу». Неясно, впрочем, следует считать это щедрым приглашением разделить полагающуюся славу или предусмотрительным перекаладыванием вины на чужие плечи.

¹⁶ Обратите внимание на то, что рассуждения Больцмана в действительности выходят за рамки непосредственных выводов из теоремы о возвращении. Теперь центральная идея заключается не в том, что любое конкретное низкоэнтропийное начальное состояние будет бесконечно много раз повторено в будущем, — хотя это также верно, а в том, что в форме случайных флуктуаций будут проявляться аномально низкоэнтропийные состояния всевозможных видов.

¹⁷ Имя Эпикура связывают с эпикурейством — философским учением, предшествовавшим утилитаризму. В представлении обывателей «эпикурейство» неизменно ассоциируется с гедонизмом и плотскими удовольствиями, особенно завязанными на еду и напитки. И хотя сам Эпикур полагал удовольствие величайшим добром, его понятие об «удовольствии» было ближе к «уютно свернуться в кресле с хорошей книгой», чем «буйствовать на вечеринке ночь напролет» или «объедаться до отказа».

¹⁸ Большая часть оригинальных произведений, написанных последователями теории атомизма, была утеряна; в частности, Эпикур был автором тридцатисемитомного трактата

о природе. Но единственные его сочинения, сохранившиеся до наших дней, — это три письма, воспроизведенные в «О жизни, учениях и изречениях знаменитых философов» Диогена Лаэртского. Атеистический подтекст их материалистического подхода не всегда находил понимание у последующих поколений.

- ¹⁹ Точное количественное понимание вероятностей различных типов флуктуаций было достигнуто лишь сравнительно недавно в форме так называемой флуктуационной теоремы (Evans, D. J., Searles, D. J. *The Fluctuation Theorem // Advances in Physics*, 2002, 51, p. 1529–1589). Но центральная идея была уяснена уже довольно давно. Вероятность того, что энтропия системы испытает случайный скачок вниз, пропорциональна экспоненте изменения энтропии со знаком «минус». Это всего лишь затейливый способ сказать: небольшие флуктуации случаются часто, а крупные флуктуации чрезвычайно редки.
- ²⁰ Вы можете возразить: *но ведь чрезвычайно маловероятно, чтобы бесформенный объем молекул газа в равновесии испытал такую флуктуацию, при которой образовался бы тыквенный пирог, в то время как совсем нетрудно вообразить появление тыквенного пирога в мире, где есть пекарь и остальные условия.* Это правда. Но как бы ни была редка флуктуация с появлением пирога самого по себе, гораздо более редкой является такая флуктуация, в которой бы заодно и пекарь, и тыквенная грядка. Большинство пирогов, появляющихся на свет при таких предположениях, — в вечной Вселенной, колеблющейся вокруг равновесия, — обречены в этой Вселенной на одиночество. Тот факт, что знакомый нам мир работает совсем не так, — это лишь подтверждение того, что что-то в этих предположениях неверно.
- ²¹ Eddington, A. S. *Nature*, 1931, 127, p. 3203. Переиздание в работе Danielson, D. R. (ed.). *The Book of the Cosmos: Imagining the Universe from Heraclitus to Hawking*. Cambridge: Perseus Books, 2000. 406 p. Обратите внимание на то, что в действительности здесь главную роль играет не вероятность значительного падения энтропии в целой Вселенной, а вопрос об условиях: «Учитывая, что одно подмножество Вселенной испытало падение энтропии, чего нам следует ожидать от оставшейся части?». При условии, что рассматриваемое подмножество слабо связано со всем остальным, ответ вполне ожидаем, и с ним соглашается Эддингтон: энтропия оставшейся части Вселенной, скорее всего, останется такой же высокой, как и до этого. Обсуждения (на сложном математическом уровне) в контексте классической статистической механики см. в работах Dembo, A., Zeitouni, O. *Large Deviations Techniques and Applications*. New York: Springer-Verlag, 1998; Ellis, R. S. *Entropy, Large Deviations, and Statistical Mechanics*. New York: Springer-Verlag, 2005. Связанные вопросы в контексте квантовой механики рассматриваются в работе Linden, N., Popescu, S., Short, A. J., Winter, A. *Quantum Mechanical Evolution Towards Thermal Equilibrium*, 2008. <http://arxiv.org/abs/0812.2385>.
- ²² Albrecht, A., Sorbo, L. *Can the Universe Afford Inflation? // Physical Review*, 2004, D 70, 63528.
- ²³ Feynman, R. P., Leighton, R., Sands, M. *The Feynman Lectures on Physics*. New York: Addison Wesley Longman, 1970.
- ²⁴ Это обсуждение вдохновлено следующим источником: Hartle, J. B., Srednicki, M. *Are We Typical? // Physical Review*, 2007, D 7, 123523. См. также: Olum, K. D. *The Doomsday Argument and the Number of Possible Observers // Philosophical Quarterly*, 2002, 52, p. 164–184; Neal, R. M. *Puzzles of Anthropic Reasoning Resolved Using Full Non-Indexical Conditioning*, 2006. <http://arxiv.org/abs/math/0608592>; Page, D. N. *Typicality Derived // Physical Review*, 2008, D 78, 023514; Garriga, J., Vilenkin, A. *Prediction and Explanation in the*

Multiverse // *Physical Review*, 2008, D 7, 043526; Bousoff, R., Freivogel, B., Yang, I.-S. Boltzmann Babies in the Proper Time Measure // *Physical Review*, 2008, D 7, 103514.

²⁵ Когда мы начинаем сравнивать разные типы наблюдателей в очень большой Вселенной, сразу же возникает пара тесно связанных вопросов. Один из них — это «аргумент об имитации» (Bostrom, N. Are You Living in a Computer Simulation? // *Philosophical Quarterly*, 2003, 53, p. 243–255), утверждающий, что развитая цивилизация без труда может построить мощнейший компьютер, имитирующий огромное количество разумных существ, и, следовательно, с большой вероятностью мы живем внутри компьютерной модели. Второй вопрос — это «аргумент о Судном дне» (Leslie, J. Is the End of the World Nigh? // *Philosophical Quarterly*, 1990, 40, p. 65–72; Gott, J. R. Implications of the Copernican Principle for Our Future Prospects // *Nature*, 1993, 363, p. 315–319), согласно которому человеческая раса вряд ли просуществует долго, поскольку если так случится, те из нас, кто живет (сейчас) при зарождении человеческой цивилизации, будут очень нетипичными наблюдателями. Это весьма провокационные аргументы, а степень их убедительности я предлагаю оценить читателю самостоятельно.

²⁶ См. Neal, R. M. Puzzles of Anthropic Reasoning Resolved Using Full Non-Indexical Conditioning, 2006, <http://arxiv.org/abs/math/0608592>, где данный подход называется полной неиндексной постановкой условий (Full Non-indexical Conditioning). Под «постановкой условий» подразумевается, что мы делаем предсказания исходя из ответа на вопрос, как будет выглядеть оставшаяся часть Вселенной в случае, когда выполняются определенные условия (например, условие о том, что мы — наблюдатели с определенными свойствами). «Полная» означает, что мы используем все данные, имеющиеся в нашем распоряжении, а не только такие грубые свойства, как «мы — наблюдатели». А «неиндексный» означает, что мы учитываем все реализации, в которых условия выполняются, а не только одну конкретную, обозначенную «мы».

²⁷ Описание путешествий Больцмана было переиздано в книге Cercignani, C. Ludwig Boltzmann: The Man Who Trusted Atoms. Oxford: Oxford University Press, 1998. 231 p. Больше подробностей о его жизни и смерти, в дополнение к предыдущей работе, вы найдете в книге Lindley, D. Boltzmann's Atom: The Great Debate That Launched a Revolution in Physics. New York: Free Press, 2001.

Глава 11

Квантовое время

Лишь в общем мнении существует сладкое, в мнении — кислое, в мнении — теплое, в мнении — холодное, в мнении — цвет; в действительности же существуют только атомы и пустота.

*Демокрит*¹

Многие из тех, кто в университете прослушал начальный курс физики, могут не согласиться с заявлением о том, что ньютоновскую механику мы понимаем на интуитивном уровне. Единственная ассоциация, которую вызывает у них этот предмет, — это безумная карусель блоков, векторов и наклонных плоскостей, и им никогда бы даже в голову не пришло назвать его «интуитивно понятным».

Однако хотя сам процесс выполнения расчетов в рамках ньютоновской механики — решение домашнего задания или отправка астронавтов на Луну — может быть невыносимо сложным, лежащие в его основе понятия на самом деле довольно просты. Мир сделан из осязаемых вещей, которые мы можем видеть и распознавать: бильярдных шаров, планет, подъемных блоков. Эти вещи оказывают воздействие или сталкиваются друг с другом, и под влиянием подобных воздействий направление и скорость их движения меняются. Если бы демону Лапласа были известны положения и импульсы всех частиц во Вселенной, он мог бы абсолютно точно предсказывать прошлое и будущее. Мы знаем, что это за пределами наших возможностей, однако вполне в наших силах вообразить, что нам известны положения и импульсы нескольких бильярдных шаров на лишенном трения столе, и, по крайней мере в принципе, мы можем представить выполнение соответствующих математических расчетов. После этого дело остается за экстраполяцией и отгадкой, и мы сможем объять всю Вселенную.

Физики, желающие подчеркнуть, что это не просто набор каких-то законов, сформулированных Ньютоном, называют ньютоновскую механику «классической» механикой. Классическая механика — это способ мышления о глубинной структуре мира. Разные типы объектов — бейсбольные мячи, молекулы газа, электромагнитные волны — подчиняются разным правилам, но все эти правила по своей структуре однотипны. Суть сходства в том, что у любого

объекта есть определенного рода «положение» и определенного рода «импульс», и на основе этой информации можно предсказывать, что будет происходить дальше.

Подобная структура повторяется во множестве контекстов: собственная теория гравитации Ньютона, разработанная Максвеллом теория XIX века об электричестве и магнетизме и общая теория относительности Эйнштейна вписываются в рамки этого шаблона. Классическую механику нельзя назвать еще одной теорией; это парадигма, способ концептуализации сути физической теории, продемонстрировавший поразительный масштаб успеха при применении на эмпирическом уровне. После публикации Ньютоном в 1687 году его шедевра *Philosophiæ Naturalis Principia Mathematica* («Математические начала натуральной философии») стало практически невозможно вообразить, что физикой можно заниматься как-то по-другому. Мир сделан из тел, характеризующихся положениями и импульсами, которые перемещаются под воздействием определенных наборов сил; задачей физики было классифицировать эти тела по типам и выяснить, что за силы на них действуют. На этом ее работа должна была быть закончена.

Тем не менее мы с вами уже знаем, что не все так просто и классическая механика неверна. В первые десятилетия XX века физикам, пытающимся разобраться в поведении материи в микроскопических масштабах, пришлось постепенно смириться с мыслью о том, что старые правила придется объявить недействительными и заменить чем-то еще. Этим чем-то еще стала квантовая механика — возможно, величайший триумф человеческого разума и воображения за всю историю. Квантовая механика предлагает картину мира, радикально отличающуюся от картины, создаваемой классической механикой, и ученые никогда всерьез не задумались бы о ней, если бы экспериментальные данные не исключали любые другие варианты. Сегодня квантовая механика наслаждается статусом, который с гордостью носила классическая механика на заре XX века: она с успехом прошла множество эмпирических проверок, и большинство исследователей согласны, что окончательные законы физики должны быть квантово-механическими по природе.

Однако, несмотря на такой триумф, квантовая механика остается чрезвычайно загадочным предметом. Физики полностью доверяют квантовой механике в смысле практического применения: они строят теории, делают предсказания и экспериментально проверяют теоретические результаты, не встречая на этом пути никаких двусмысленностей или неопределенностей. Тем не менее мы до сих пор не можем быть до конца уверены, знаем ли мы, *что такое* в действительности квантовая механика. Есть одно солидное направление интеллекту-

альной деятельности, на которое тратят свои силы и время немало талантливых ученых и философов. Это направление известно под названием «интерпретация квантовой механики». Столетие назад не было никакой «интерпретации классической механики» — классическая механика достаточно проста и понятна, для того чтобы ее интерпретация не требовала особых усилий. Но что касается квантовой механики, нам пока неясно, как же правильно думать и говорить о ней.

Эта озабоченность интерпретациями порождается единственным базовым отличием между квантовой механикой и классической механикой, одновременно и кажущимся банальным, и имеющим поистине сокрушительные последствия.

Согласно квантовой механике, то, что мы способны наблюдать в окружающем мире, представляет собой лишь крохотное подмножество того, что на самом деле существует.

Попытки объяснить данный принцип зачастую всего лишь размыывают его до полной неузнаваемости. «Это как тот ваш друг с чудесной улыбкой, которого как ни сфотографируешь — улыбка куда-то пропадает». В действительности квантовая механика намного содержательнее. В классическом мире могут возникать сложности с тем, чтобы точно измерить какую-то величину; необходимо соблюдать крайнюю осторожность, чтобы не потревожить изучаемую систему. Однако ничто в классической физике не запрещает нам проявлять такую осторожность. В квантовой механике, с другой стороны, существует непреодолимое препятствие, из-за которого полные и при этом неразрушающие наблюдения физической системы нам недоступны. Это попросту в общем случае невозможно. Что именно происходит, когда вы пытаетесь пронаблюдать за каким-то объектом или системой, и что можно считать фактическим «измерением» — вот основные вопросы. Эта загадка носит крайне полезное название «проблемы измерения» (с тем же успехом «проблемой с машиной» можно было бы назвать ситуацию, когда автомобиль падает с утеса и, пролетая несколько сотен футов, разбивается о скалы на мелкие кусочки). В успешных физических теориях не должно существовать подобных неопределенностей; четкие определения — это главное, что нас в них интересует. Квантовая механика, несмотря на ее несомненную успешность, пока что такого уровня ясности не достигла.

Тем не менее это вовсе не означает, что наука пошла вразнос или что загадками квантовой механики можно оправдывать любые свои убеждения. В частности, квантовая механика не утверждает, что вы способны менять реальность, просто думая о ней, или что современная физика всего лишь заново открыла мудрость древних буддистов.² Правила существуют, и мы знаем, как

они действуют в условиях, представляющих интерес для нашей повседневной жизни. Однако нам хотелось бы понимать, как эти правила работают в любых ситуациях, какие только можно себе представить.

Большинство современных физиков расправляются с проблемами интерпретации квантовой механики с помощью проверенной веками стратегии «отрицания». Они знают, как правила работают в интересующих их случаях, они могут заставить квантовую механику работать в определенных обстоятельствах и добиться поразительного согласия с экспериментальными данными, и им совершенно не хочется забивать себе голову досадными вопросами о том, что это все означает и можно ли назвать эту теорию абсолютно корректной. Подобная стратегия по большей части вполне отвечает нашим целям в этой книге. Проблема стрелы времени стояла перед Больцманом и его коллегами еще до изобретения квантовой механики, и мы также можем долго и продуктивно рассуждать об энтропии и космологии, не беспокоясь о деталях квантовой механики.

И все же в определенный момент нам придется взглянуть проблеме в лицо. В конце концов, стрела времени — это фундаментальная загадка, и весьма вероятно, что квантовая механика сыграет решающую роль в поиске ответа на нее. Однако есть нечто, представляющее для нас еще больший интерес: тот самый процесс измерения, являющийся средоточием всей интерпретационной неразберихи, обладает примечательным свойством, а именно *необратимостью*. Единственный в толпе общепризнанных и всем известных законов физики, процесс квантового измерения определяет стрелу времени. Однажды выполнив его, вы уже не сможете отменить содеянное. В этом и кроется загадка.

Возможно, эта загадочная необратимость по своей природе аналогична загадочной термодинамической необратимости, описываемой вторым началом: ее создают приближения и отбрасывание информации, тогда как сами по себе фундаментальные физические процессы обратимы. В этой главе я буду отставивать данную точку зрения. Тем не менее среди экспертов единого мнения по этому вопросу до сих пор нет. Единственное, что не вызывает сомнений, так это необходимость всерьез заниматься проблемой измерений, если нас интересует стрела времени.

Квантовая кошка

Благодаря мысленным экспериментам Эрвина Шрёдингера в научной среде надежно укоренилась традиция при обсуждении квантовой механики ставить опыты на кошках.³ Кот Шрёдингера был призван иллюстрировать сложности, связанные с проблемой измерения, однако прежде чем углубляться в тонкости,

мы потратим немного времени на изучение основ теории. И в наших мысленных экспериментах ни одно животное не пострадает.

Представьте себе, что у вашей кошки Китти два любимых места в доме: на диване и под столом в гостиной. В реальном мире существует бесконечно много положений, которые может занять такой физический объект, как кошка; точно существует бесконечно много значений ее импульса, даже если ваша кошка обычно перемещается по квартире довольно неспешно. Для того чтобы добраться до сути квантовой механики, мы будем все очень сильно упрощать. Так что вообразите, что мы можем полностью описать состояние Китти, как принято в классической механике, просто указав, находится она на диване или под столом. Мы отбрасываем всю информацию о ее скорости, не принимаем во внимание, на какой именно части дивана она лежит, и вообще не учитываем никакие другие положения, не подпадающие под определение «дивана» и «стола». С классической точки зрения мы упрощаем Китти до системы с двумя состояниями. (Системы с двумя состояниями существуют в реальном мире; например, спин электрона или фотона может быть направлен либо вверх, либо вниз. Квантовое состояние системы с двумя состояниями описывается «кубитом» (квантовым битом).)

И здесь мы встречаемся с первым крупным отличием квантовой механики от классической механики: в квантовой механике *нет такого понятия*, как «местоположение кошки». Классическая механика допускает, что нам не известно, где находится Китти, поэтому мы вправе делать заявления вроде: «Думаю, с вероятностью 75 % она сидит под столом». Однако это всего лишь заявление о нашей неосведомленности, а не о состоянии мира; тот факт, что кошка пребывает в одном из возможных местоположений, неоспорим, и это никак не зависит от того, известно нам об этом или нет.

В квантовой механике не бывает неоспоримых фактов, свидетельствующих о пребывании Китти (или чего угодно еще) в каком-то конкретном месте. Просто-напросто пространство состояний в квантовой механике так не работает. Вместо этого для указания состояний используется штука, известная под названием *волновой функции*. И волновая функция не дает результатов вроде: «кошка лежит на диване» или «кошка лежит под столом». Она способна сообщать лишь вещи вроде: «если мы поищем, то с вероятностью 75 % обнаружим кошку под столом, а с вероятностью 25 % обнаружим ее на диване».

Отличие «неполного знания» от «фундаментальной квантовой неопределенности» состоит в том, чтобы покопаться в нем подольше. Если волновая функция утверждает, что с 75-процентной вероятностью мы найдем кошку под столом, а с 25-процентной — на диване, то значит ли это, что с вероятностью

75 % кошка *находится* под столом, а с вероятностью 25 % она *находится* на диване? Нет, такого понятия, как «кошка находится там-то», не существует. Ее квантовое состояние описывается *суперпозицией* двух разных положений, с которыми мы могли бы работать в классической механике. Суть даже не в том, что оба утверждения одновременно истинны, а в том, что единственно «истинного» местоположения, в котором пребывает кошка, попросту нет. Волновая функция — это лучшее описание реальности кошки, какое только мы в состоянии построить.

Понятно, что согласиться с подобными утверждениями, впервые столкнувшись с ними, очень сложно. И если уж откровенно, наш мир совершенно не кажется нам таким. Когда мы смотрим вокруг, мы видим кошек и планеты и даже электроны, занимающие определенные положения, а не в суперпозициях различных положений, описываемых волновыми функциями. Но в этом и кроется секрет волшебства квантовой механики: то, что мы видим, вовсе не обязательно совпадает с реальностью. Волновая функция действительно существует, но мы не в состоянии ее увидеть; мы видим вещи так, словно они находятся в определенных заурядных классических конфигурациях.

Однако это совершенно не означает, что мы не можем полагаться на классическую физику в таких делах, как игра в баскетбол или запуск спутников на орбиту. В квантовой механике не существует «классического предела», в котором объекты ведут себя так, как если бы Ньютон всегда был прав, и этот предел включает в себя весь наш каждодневный опыт. Мы никогда не обнаруживаем объекты макроскопических размеров, такие как кошки, в суперпозициях в форме «75 % здесь, 25 % там»; для них всегда верно «99,9999999 процента (или больше) здесь, 0,0000001 процента (или намного меньше) там». Классическая механика — это приблизительное описание работы макроскопического мира, и это очень хорошее приближение. Реальный мир живет по правилам квантовой механики, однако классической механики более чем достаточно для повседневной жизни. Лишь начав рассматривать атомы и элементарные частицы, мы в полной мере сталкиваемся со следствиями квантовой механики и понимаем, что теперь без нее никуда.

Как работают волновые функции

Вы можете задаваться вопросом: а откуда мы знаем, что написанное выше — правда? В конце концов, какая разница между «существует 75-процентная вероятность увидеть кошку под столом» и «существует 75-процентная вероятность того, что кошка находится под столом». Трудно вообразить экспери-

мент, который мог бы провести различие между этими вероятностями; в конце концов, единственный способ узнать, где кошка, — посмотреть в ее любимых местах. Однако существует критически важное явление, благодаря которому суть различия становится очевидной. Это *квантовая интерференция*. Чтобы понять, что это значит, придется запастись терпением и углубиться в детали того, как в действительности работают волновые функции.

В классической механике, где для описания состояния частицы указывают ее положение и импульс, об этом состоянии можно думать как о наборе чисел. Для одной частицы в обычном трехмерном пространстве необходимо указать шесть чисел: положение в каждом из трех направлений и импульс в каждом из трех направлений. В квантовой механике состояние описывается волновой функцией, которую также можно представлять себе как набор чисел. Задача этих чисел — сообщать нам для любого наблюдения или измерения, которое нам только вздумается выполнить, какова вероятность того, что мы получим определенный результат. Таким образом, казалось бы, совершенно естественно полагать, что необходимые нам числа — это самые обыкновенные вероятности: вероятность того, что мы увидим Китти на диване, вероятность того, что мы увидим Китти под столом, и т. д.

Выясняется, однако, что это работает совсем не так. Волновые функции на самом деле схожи с волнами: типичная волновая функция колеблется в пространстве и времени подобно волне на поверхности пруда. Это не совсем очевидно в нашем простом примере, предусматривающем только два возможных результата наблюдений: «на диване» и «под столом». Но если рассмотреть наблюдения с непрерывным множеством возможных исходов, например наблюдение за положением реальной кошки в реальной комнате, то многое сразу же прояснится. Волновая функция похожа на волну на поверхности пруда; единственная разница в том, что это волна в пространстве всех возможных результатов наблюдения: например, всех возможных положений в комнате.

Когда мы видим реальную волну, то замечаем, что относительно поверхности пруда в спокойном состоянии высота воды в волне в разных местах разная. Где-то она выше уровня спокойной воды, а где-то она опускается ниже. Для того чтобы описать волну математически, мы могли бы с каждой точкой пруда связать *амплитуду* — уровень воды относительно поверхности непо потревоженной водной глади. В одних местах амплитуда будет положительной, в других — отрицательной. Волновые функции в квантовой механике работают точно так же. С каждым возможным результатом наблюдения волновая функция связывает число, которое мы называем амплитудой и которое может

быть положительным или отрицательным. Полная волновая функция состоит из определенной амплитуды для каждого возможного результата наблюдения; это и есть числа, описывающие состояние в квантовой механике аналогично положениям и импульсам, которые описывают состояние в классической механике. Существует амплитуда, соответствующая пребыванию Китти под столом, и еще одна амплитуда, соответствующая нахождению ее на диване.

При таких условиях у нас остается только одна нерешенная проблема: мы говорим о вероятностях, а вероятность наступления какого-то события никогда не может быть отрицательным числом. Таким образом, нельзя утверждать, что амплитуда, связанная с определенным результатом наблюдения, дает вероятность наступления этого результата; вместо этого должен существовать способ вычисления вероятности, основанный на известном значении амплитуды. К счастью, расчет очень прост! Для того чтобы получить вероятность, нужно взять амплитуду и возвести ее в квадрат:

$$(\text{вероятность увидеть } X) = (\text{амплитуда, связанная с } X)^2.$$

Таким образом, если волновая функция Китти связывает амплитуду 0,5 с возможностью увидеть кошку на диване, вероятность на самом деле увидеть ее там равняется $(0,5)^2 = 0,25$, или 25 %. Принципиально важно то, что значение амплитуды могло бы быть отрицательным, то есть $-0,5$, и мы все равно получили бы тот же самый ответ: $(-0,5)^2 = 0,25$. Это может казаться бессмысленным излишеством — две разные амплитуды соответствуют одной и той же физической ситуации, однако выясняется, что наличие положительных и отрицательных значений играет ключевую роль в эволюции состояний в квантовой механике.⁴

Интерференция

Теперь, когда нам известно, что волновые функции могут связывать отрицательные амплитуды с возможными результатами наблюдений, можно вернуться к вопросу, почему мы вообще заговорили о волновых функциях и суперпозициях, вместо того чтобы просто приписать вероятности разным исходам. Причина кроется в интерференции, и эти отрицательные значения необходимы для того, чтобы разобраться, откуда она берется. Мы можем сложить две (отличные от нуля) амплитуды и получить нуль, что было бы невозможно, если бы амплитуды никогда не принимали отрицательные значения.

Для того чтобы понять, как это работает, давайте немного усложним нашу модель кошачьей динамики. Представьте себе, что мы видим, как Китти выходит

из спальни на втором этаже. Благодаря нашим предыдущим наблюдениям за ее перемещениями по дому мы собрали достаточно много сведений о том, как действует эта квантовая кошка. Мы знаем, что, стоит ей спуститься на первый этаж, она неминуемо окажется либо на диване, либо под столом и нигде больше (то есть ее конечное состояние представляет собой волновую функцию, описывающую суперпозицию пребывания на диване и пребывания под столом). Однако предположим также, что нам известно о существовании двух возможных путей, ведущих от кровати на втором этаже до одного из мест отдыха на первом этаже: Китти сделает остановку либо у миски с кормом, чтобы подкрепиться, либо у когтеточки, чтобы поточить когти. В реальном мире для описания всех этих возможностей достаточно классической механики, но в нашем идеализированном мире мысленного эксперимента мы считаем, что квантовые эффекты играют важную роль.

Теперь посмотрим, какие результаты в действительности дает наше наблюдение. Мы проведем эксперимент двумя разными способами. Во-первых, увидев Китти на первом этаже, мы будем тихонечко следовать за ней, для того чтобы увидеть, по какому маршруту она пойдет: мимо миски с кормом или мимо когтеточки. Вообще-то у нее есть волновая функция, описывающая суперпозицию обеих возможностей, но когда мы проводим фактический эксперимент, мы всегда получаем конкретный результат. Мы ведем себя тише воды ниже травы, и кошка нас совсем не замечает; если хотите, можете даже вообразить, что мы оснастили весь дом шпионскими камерами или лазерными датчиками. Совершенно не важно, с помощью какой технологии мы выясняем, подходит Китти к миске или к когтеточке; главное, что мы пронаблюдали это действие.

Мы обнаруживаем, что Китти останавливается у миски ровно в половине случаев и точно так же в половине случаев делает остановку у когтеточки (для того чтобы максимально упростить условия, мы предполагаем, что на своем пути к месту отдыха она посещает либо одно место, либо другое, но никогда оба). Ни одно наблюдение, разумеется, само по себе не выявляет волновую функцию; оно позволяет лишь сказать, что в этот конкретный раз мы увидели кошку либо у когтеточки, либо у миски. Но представьте себе, что мы повторяем этот эксперимент очень много раз, и это дает нам возможность делать обоснованные выводы относительно вероятностей этих двух событий.

Однако мы не останавливаемся на этом. Мы позволяем Китти продолжить путь либо на диван, либо под стол, и после того как она устраивается на отдых, мы снова смотрим, какое же место она выбрала. Этот эксперимент мы также повторяем достаточное количество раз, для того чтобы определить вероят-

ности. Теперь мы обнаруживаем, что совершенно неважно, останавливалась она у когтеточки или у миски с кормом; в обоих ситуациях мы видим, что ровно в половине случаев она в итоге приходит на диван, а в половине — под стол, и выбор итогового места отдыха абсолютно не зависит от того, шла она к нему через миску с едой или когтеточку. Очевидно, промежуточный шаг на этом маршруте не играет особой роли; вне зависимости от того, где кошка делает остановку в пути, волновая функция в конце дает равные вероятности для дивана и для стола.

А теперь начинается самое интересное. На этот раз мы вообще не будем смотреть, какой промежуточный шаг Китти делает на своем пути к дивану или столу; нам неинтересно, останавливается она у когтеточки или у миски с кормом. Мы просто ждем, когда она устроится на диване или под столом, а затем проверяем, где она, восстанавливая итоговые вероятности, полученные из волновой функции. Какого результата следует ожидать?

В мире, где царит классическая механика, мы знаем, что должны увидеть. Когда мы шпионили за кошкой, мы были очень осторожны, чтобы наше наблюдение не повлияло на ее действия, и в половине случаев мы обнаруживали ее на диване, а в половине — под столом, независимо от того, по какому маршруту она двигалась. Очевидно, что даже если мы не видим, чем она занимается по пути, это не должно играть никакой роли: в любом случае на последнем шаге у нас есть два исхода с равными вероятностями. Таким образом, даже не наблюдая за промежуточным этапом, мы все равно должны получать одинаковые значения вероятности.

Однако все совсем не так. Это не то, что мы видим в нашем идеализированном мире мысленного эксперимента, где кошка — это настоящий квантовый объект. Когда мы решаем не смотреть, останавливается Китти по пути у миски с едой или у когтеточки, оказывается, что в 100 % случаев в конце она устраивается на отдых на диване! Мы никогда не обнаруживаем ее под столом, то есть финальная волновая функция связывает с этим возможным результатом нулевую амплитуду. Очевидно, что если все это правда, то именно наличие шпионских камер кардинальным образом изменило волновую функцию кошки. Возможные варианты перечислены в таблице ниже.

По какому маршруту идет Китти	Итоговые вероятности
Мимо когтеточки	50 % диван, 50 % стол
Мимо миски с кормом	50 % диван, 50 % стол
Мы не смотрим	100 % диван, 0 % стол

И это вовсе не исключительно мысленный эксперимент; такой опыт действительно проводился. Не на настоящих кошках, которые, несомненно, относятся к макроскопическим объектам и хорошо описываются в классическом пределе, а на отдельных фотонах в ходе эксперимента, известного под названием «эксперимент с двойной щелью». Есть две щели, через которые может пролететь фотон, и если мы не наблюдаем, через какую щель он пролетает, то получаем одну волновую функцию, а если наблюдаем, то совершенно другую, независимо от того, насколько осторожным и ненавязчивым был контроль.

Вот как это все объясняется. Представим себе, что мы решили проследить, где Китти делает остановку — у миски или у когтеточки, и видим, что она остановилась у когтеточки. Завершив свои дела у когтеточки, она эволюционирует в суперпозицию, где пребывание на диване и пребывание под столом равновероятны. В частности, вследствие особенностей начального состояния Китти и определенных аспектов квантовой кошачьей динамики итоговая волновая функция связывает равные положительные амплитуды с «диваном» и «столом». Теперь рассмотрим другой вариант промежуточного этапа, когда мы видим, что кошка останавливается у миски с едой. В данном случае итоговая волновая функция связывает отрицательную амплитуду со столом, а положительную с диваном — это равные, хотя и противоположные по знаку значения, и, следовательно, соответствующие вероятности абсолютно одинаковы.⁵

Однако если мы не наблюдаем за кошкой и не видим ее на промежуточном этапе — у когтеточки или миски, тогда (в соответствии с природой нашего эксперимента) на этом промежуточном шаге она находится в суперпозиции двух возможностей. В такой ситуации правила квантовой механики предписывают нам сложить два возможных вклада в итоговую волновую функцию: один для маршрута, где Китти останавливается у когтеточки, и второй для маршрута, включающего миску с едой. В обоих случаях амплитуды, соответствующие завершению маршрута на диване, имели положительные значения; таким образом, они усиливают друг друга. Но амплитуды для маршрутов, заканчивающихся под столом, были противоположными по знаку в зависимости от промежуточного шага. То есть при сложении они сокращают друг друга. По отдельности маршруты с любым из двух возможных промежуточных шагов давали нам ненулевую вероятность того, что в конце пути Китти устроится на отдых под столом, но когда одновременно допустимы оба пути (потому что мы не смотрим, по какому она решила пойти), амплитуды интерферируют.

Вот почему волновые функции должны включать отрицательные значения и вот откуда мы знаем, что волновые функции — это «реальные» вещи, а не просто какие-то бухгалтерские инструменты для отслеживания вероятностей.

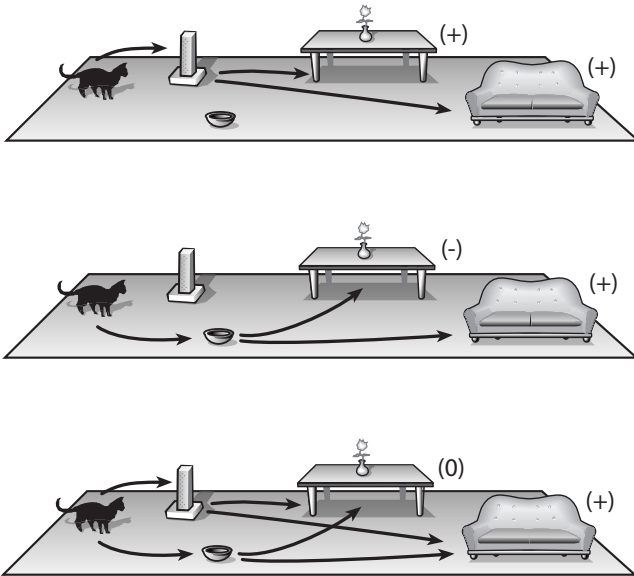


Рис. 11.1. Альтернативные пути эволюции волновой функции Китти. На верхней картинке мы видим, что она остановилась у когтеточки, после чего пойдет либо под стол, либо на диван — у обеих этих возможностей положительные амплитуды. На картинке в центре мы видим, что она подошла к миске с кормом, а оттуда также может отправиться либо под стол, либо на диван, но на этот раз со столом связана отрицательная амплитуда (хотя вероятность все так же больше нуля). Нижняя картинка соответствует ситуации, когда мы не отслеживаем промежуточный шаг ее маршрута, поэтому складываем амплитуды двух допустимых возможностей. В результате мы получаем нулевую амплитуду для стола (так как положительный и отрицательный вклады сокращают друг друга) и положительную амплитуду для дивана

Мы рассмотрели явный случай, когда все вероятности положительны, но итоговая волновая функция получает вклады от двух разных промежуточных шагов, которые сокращают друг друга.

Давайте остановимся на секунду и насладимся тем, насколько глубокомысленно все это выглядит с нашей традиционной точки зрения, зараженной предубеждениями классической механики. Для каждой конкретной реализации эксперимента нам кажется логичным задать вопрос: так где же Китти сделала остановку — у миски с кормом или у когтеточки? Единственный допустимый ответ на этот вопрос — нигде. Она не останавливалась ни там, ни там. Она находилась в суперпозиции обеих возможностей, и нам это известно, потому

что обе возможности оказали значительное влияние на амплитуду окончательного ответа.

Реальные кошки — это суетливые макроскопические объекты, состоящие из очень большого числа молекул, и их волновые функции обычно резко локализуются вокруг того, что очень напоминает наше классическое понятие «положения в пространстве». Но на микроскопическом уровне все эти разговоры о волновых функциях, суперпозициях и интерференции становятся до предела наглядными. Квантовая механика поначалу кажется чем-то жутко непонятным, но это самая суть того, как работают механизмы Природы.

Коллапс волновой функции

Во всех подобных обсуждениях есть одна вещь, очень часто сбивающая людей с толку и заставляющая — хотя и из лучших побуждений — пойти по ложному следу. Это ключевая роль, выпавшая на долю наблюдений. Когда мы наблюдали за тем, какой выбор кошка делала на пересечении дорожек, ведущих к когтеточке и миске, то получали один ответ для конечного состояния, когда же не делали никаких наблюдений, то совершенно иной. Но физика не должна так работать! Мир должен эволюционировать согласно законам Природы, и неважно, наблюдаем мы за этим процессом или нет. Да и вообще, что можно считать «наблюдением»? Что, если мы установим везде камеры наблюдения, но никогда не будем просматривать пленки? Будет ли это считаться наблюдением? (Да, будет.) И что именно происходит, когда мы наблюдаем за экспериментом?

Это очень важные вопросы, ответы на которые не совсем очевидны. В научном сообществе физиков не существует единого мнения ни относительно того, что можно считать наблюдением (или «измерением») в квантовой механике, ни относительно того, что происходит, когда наблюдение осуществляется. Это так называемая проблема измерения, попытки решить которую — основное занятие множества людей, проводящих время в размышлениях об интерпретации квантовой механики. Подобных интерпретаций существует уже немало, но мы с вами обсудим только две из них: более или менее стандартную картину, известную под названием «копенгагенская интерпретация», и взгляд, кажущийся (мне) заслуживающим большего уважения и лучше отражающим реальное положение вещей, который носит пугающее название «многомировая интерпретация». Давайте сперва познакомимся с копенгагенской интерпретацией.⁶

Такое название эта интерпретация носит потому, что Нильс Бор, ученый, который во многих отношениях может считаться крестным отцом квантовой

механики, помогал в ее разработке в своем институте в Копенгагене в 1920-е годы. Настоящая история этой точки зрения сложна, и точно известно, что огромный вклад в ее развитие внес Вернер Гейзенберг, еще один пионер квантовой механики. Но нас сейчас интересует не столько история, сколько статус копенгагенской интерпретации как некоего эталона, как он подается во всевозможных учебниках. Каждому физика приходится сначала познакомиться с этой точкой зрения, и лишь затем ему выпадает возможность рассмотреть альтернативы (или отказаться от их рассмотрения — бывает по-разному).

Копенгагенская интерпретация квантовой механики настолько же проста в формулировке, насколько сложна в понимании: когда квантовая система подвергается измерению, ее волновая функция *коллапсирует*⁷. То есть волновая функция мгновенно изменяется, превращаясь из описания суперпозиции различных возможных результатов наблюдения в совершенно другую волновую функцию, которая отвечает 100-процентной вероятности результата, который был получен при фактическом измерении, и 0-процентной вероятности каких-либо других результатов. Такой тип волновой функции, полностью сконцентрированной на единственном возможном результате наблюдения, называется «собственным состоянием». Стоит системе перейти в собственное состояние, и, продолжая выполнять те же наблюдения, вы будете получать тот же самый ответ (если только что-то не выбьет систему из собственного состояния в другую суперпозицию). Невозможно точно сказать, в какое собственное состояние система перейдет в момент наблюдения; это процесс, стохастический по своей природе, и максимум, что мы можем сделать, — это присвоить вероятности разным результатам.

Применим эту идею к нашей истории с Китти. Согласно копенгагенской интерпретации, наше решение пронаблюдать, остановится она у миски с кормом или у когтеточки, оказывает решающее влияние на волновую функцию, как бы незаметно мы ни старались следить за кошкой. Когда мы не смотрим, Китти находится в суперпозиции двух возможностей с равными амплитудами; после того как она доходит до дивана или стола, мы складываем составляющие, соответствующие каждому из промежуточных шагов, и обнаруживаем, что происходит интерференция. Но когда мы решаем пронаблюдать за тем, какую она выберет дорогу, это заставляет ее волновую функцию сколлапсировать. Предположим, мы увидели, что Китти останавливается у когтеточки; как только это наблюдение было выполнено, состояние кошки перестало быть суперпозицией: она на 100 % находилась у когтеточки и на 0 % у миски. То же самое произошло бы, если бы мы увидели ее у миски с кормом, но с противоположными амплитудами. В любом случае возможностей для интерференции не

остается, и ее волновая функция так или иначе эволюционирует в состояние, обеспечивающее равные вероятности оказаться в конце путешествия на диване и под столом.⁸

В связи с этим у нас есть хорошая новость и плохая. Хорошая новость заключается в том, что это соответствует экспериментальным данным. Если считать, что волновые функции коллапсируют каждый раз, когда мы выполняем наблюдение, какую бы ненавязчивую стратегию наблюдения мы ни выбрали, превращаясь в собственные состояния, связывающие 100-процентную вероятность с увиденным нами результатом, то мы можем с уверенностью заявлять, что способны объяснить любые квантовые явления, известные физикам.

Плохая же новость такова: в этом нет смысла. Что можно считать «наблюдением»? Может ли сама кошка совершить наблюдение? А неживой объект? Определенно, мы не хотим верить в то, что такое явление, как *сознание*, каким-то образом может играть ключевую роль в фундаментальных законах физики? (Не хотим и не будем!) И действительно ли предполагаемый коллапс происходит мгновенно, — или все же постепенно, но просто очень быстро?

Необратимость

По сути, больше всего в копенгагенской интерпретации квантовой механики нас беспокоит то, что «наблюдение» здесь рассматривается как совершенно особый тип природного явления, требующий отдельного закона природы. В классической механике все происходящее вокруг нас может быть объяснено с помощью систем, эволюционирующих согласно законам Ньютона. Однако если мы учитываем коллапс волновой функции как он описан выше, в квантовой механике система эволюционирует согласно правилам двух совершенно разных типов.

1. Когда мы не смотрим, волновая функция эволюционирует гладко и предсказуемо. Роль, которую в классической механике играют ньютоновские законы, в квантовой механике отводится *уравнению Шрёдингера*, действующему по абсолютно аналогичному сценарию. Зная состояние системы в любой момент времени, мы можем применить уравнение Шрёдингера, для того чтобы достоверно спрогнозировать ее развитие как по направлению в будущее, так и по направлению в прошлое. Эволюция сохраняет информацию и полностью обратима.
2. Когда мы выполняем наблюдение, волновая функция коллапсирует. Коллапс происходит не гладко, он непредсказуем, и информация при этом не со-

храняется. Значение амплитуды (в квадрате), присвоенное каждому конкретному результату, сообщает нам вероятность того, что волновая функция перейдет в состояние, полностью сконцентрированное на этом результате. Две разные волновые функции могут запросто сколлапсировать в одно и то же состояние при условии, что наблюдение осуществляется; следовательно, коллапс волновой функции необратим.

Безумие! Но это работает. В копенгагенской интерпретации мы берем понятия, кажущиеся простым приближением к некоей глубинной базисной истине, — проводя различие между «системой», представляющей собой истинно квантовый механизм, и «наблюдателем», не выходящим за рамки классической механики, — и воображаем, будто эти категории играют критическую роль в фундаментальной структуре реальности. Большинство физиков, даже те, кто ежедневно применяет квантовую механику в своих исследованиях, прекрасно понимают друг друга, разговаривая на языке копенгагенской интерпретации, и совершенно не беспокоятся о неловких вопросах, которые она поднимает. Другие, особенно те, кто серьезно задумывается об основах квантовой механики, убеждены, что нам необходимо нечто более совершенное. К сожалению, единого мнения относительно того, как могло бы выглядеть это более совершенное толкование, пока не выработано.

Для многих людей самое проблемное свойство квантовой механики — это как раз крах безупречной предсказуемости (Эйнштейн один из них; именно с этим связано его знаменитое высказывание о том, что «Бог не играет в кости со Вселенной»). Если копенгагенская интерпретация верна, то в квантовом мире не может существовать такого явления, как демон Лапласа; во всяком случае, пока этот мир включает наблюдателей. Акт наблюдения привносит в эволюцию мира элемент истинной случайности. Не *полностью* случайный (волновая функция может обеспечивать очень высокую вероятность увидеть один какой-то результат и очень низкую — любые другие). Но *непреодолимо* случайный, в том смысле, что не существует такой утерянной информации, которая, попади она к нам в руки, позволила бы точно прогнозировать результаты.⁹ Великолепие и слава классической механики — это отчасти следствие ее железобетонной надежности: даже если демон Лапласа в действительности не существует, мы знаем, что, в принципе, он может существовать. Квантовая механика разрушает эту надежду. Людям потребовалось немало времени для того, чтобы привыкнуть к мысли о вероятности как о еще одной неотъемлемой фундаментальной характеристике законов физики, и многим это понятие по сей день причиняет огромный душевный дискомфорт.

Один из вопросов, которые мы задавали о стреле времени, — каким образом нам примирить между собой необратимость макроскопических систем, описываемых статистической механикой, с несомненной обратимостью микроскопических законов физики. Однако сейчас, когда мы узнали о квантовой механике, создается впечатление, что микроскопические законы физики вполне могут оказаться необратимыми. Коллапс волновой функции — это процесс, привносящий собственную стрелу времени в физические законы: волновые функции коллапсируют, но расколлапсировать они не в состоянии. Если мы наблюдаем за Китти и видим, что она на диване, то сразу же после выполнения этого измерения мы понимаем, что она пребывает в собственном состоянии (100 % на диване). Но нам неизвестно, в каком состоянии она была до того, как мы провели измерение. Очевидно, что это информация была уничтожена. Мы знаем лишь, что для того, чтобы кошка оказалась на диване, волновая функция когда-то должна была иметь ненулевую амплитуду, — но мы не можем сказать, каково было значение амплитуды, а также какие амплитуды соответствовали другим возможным исходам, если таковые были.

Итак, коллапс волновой функции — если это действительно верная интерпретация квантовой механики — определяет собственную стрелу времени. Можно ли на ее основании как-то объяснить «главную» стрелу времени — термодинамическую стрелу, присутствующую во втором начале термодинамики, которую мы обвинили во всевозможных макроскопических отличиях прошлого от будущего?

Вероятно, нет. Несмотря на то что необратимость — ключевая характеристика стрелы времени, не все необратимости одинаковы. И совершенно непонятно, как один тот факт, что волновые функции коллапсируют, может объяснить гипотезу о прошлом. Вспомните, о чем мы говорили: нетрудно понять, почему энтропия увеличивается; трудно понять, почему она вообще когда-то была низкой. Коллапс волновой функции не предлагает никакой помощи в понимании этого вопроса.

С другой стороны, квантовая механика наверняка сыграет определенную роль в окончательном объяснении стрелы времени, даже если внутренняя необратимость коллапса волновой функции сама по себе напрямую проблему не решает. В конце концов, мы верим, что законы физики по своей сути квантовомеханические. Именно квантовая механика устанавливает правила и диктует нам, что разрешено, а что запрещено в нашем мире. Абсолютно естественно ожидать, что эти правила включатся в действие, когда мы, наконец-то, начнем понимать, почему у нашей Вселенной была такая низкая энтропия сразу после Большого взрыва. Нам пока неизвестно наверняка, куда приведет нас это

путешествие, но мы достаточно сообразительны, для того чтобы предсказать, какие инструменты точно пригодятся нам в дороге.

Неопределенность

В своем обсуждении волновых функций мы обходили молчанием одно критически важное свойство. Мы сказали, что волновые функции связывают амплитуду со всеми возможными результатами любого наблюдения, которое только нам вздумается провести. В нашем мысленном эксперименте мы ограничились только одним типом наблюдения — проверкой местоположения кошки — и только двумя возможными результатами в каждый из интересующих нас моментов времени. У реальной же кошки, или элементарной частицы, или яйца, или любого другого объекта бесконечное число возможных положений, и соответствующая волновая функция в каждом случае связывает амплитуду с любой из этих возможностей.

Еще важнее то, что мы можем измерять и другие вещи помимо положения. Вспомнив свой опыт с классической механикой, мы можем предложить пронаблюдать за импульсом, а не за положением кошки. И это также вполне допустимо; состояние кошки описывается волновой функцией, которая присваивает амплитуду каждому возможному значению импульса, которое мы можем получить в процессе измерения. Когда мы выполняем такое измерение и получаем ответ, волновая функция коллапсирует в «собственное состояние импульса», соответствующее ненулевой амплитуде только для одного определенного значения импульса, — того самого, что мы только что фактически измерили.

Однако, можете подумать вы, если это верно, то что мешает нам поместить кошку в состояние, в котором и ее положение и импульс определяются абсолютно точно, то есть в обыкновенное классическое состояние? Другими словами, почему мы не можем взять кошку с произвольной волновой функцией, измерить ее положение, для того чтобы оно приняло одно определенное значение, а затем измерить ее импульс, чтобы он также сколлапсировал в определенное значение? В таком случае мы получим полностью определенное классическое состояние и все неопределенности будут отсутствовать.

Это невозможно, а причина в том, что не существует волновых функций, одновременно сконцентрированных и вокруг одного-единственного значения положения, и вокруг одного-единственного значения импульса. Действительно, попытка найти такое состояние обречена на провал: если волновая функция сконцентрирована около определенного значения положения, то амплитуды будут максимально рассредоточены по всем возможным значениям импульса.

И наоборот: если волновая функция сконцентрирована около определенного импульса, она рассредоточена по всем возможным положениям. Получается, что когда мы наблюдаем за положением объекта, мы теряем любую информацию о его импульсе, и наоборот.¹⁰ (Если же мы измеряем положение лишь приблизительно, а не точно, то мы можем сохранить некоторые сведения об импульсе; именно это происходит при макроскопических измерениях, выполняемых в реальном мире.)

В этом заключается истинный смысл принципа неопределенности Гейзенберга. В квантовой механике можно «точно знать» положение частицы — более того, частица может находиться в собственном состоянии, то есть может быть известно, что вероятность обнаружить ее в определенном положении равна 100 %. Точно так же можно «точно знать» импульс частицы. Но невозможно одновременно обладать информацией и о положении, и об импульсе. Таким образом, измеряя величины, которыми система описывается в классической механике, — одновременно и положение и импульс, — мы никогда не можем заранее знать, каким будет результат. Это и есть принцип неопределенности.

Принцип неопределенности подразумевает, что волновая функция должна быть рассредоточена по возможным значениям либо положения, либо импульса, либо (и чаще всего бывает именно так) обеих этих величин. Неважно, какую систему мы рассматриваем, — проявление квантовой непредсказуемости при попытке измерить ее свойства неизбежно. Две измеряемые величины дополняют друг друга: когда волновая функция сконцентрирована вокруг положения, она рассредоточена по импульсу, и наоборот. Реальные макроскопические системы, хорошо поддающиеся описанию в классическом пределе квантовой механики, находятся в компромиссных состояниях, характеризующихся небольшими неопределенностями как положений, так и импульсов. Для достаточно больших систем эта неопределенность относительно мала, поэтому мы ее совершенно не замечаем.

Помните, что в действительности таких вещей, как «положение объекта» или «импульс объекта», не существует — только волновая функция, назначающая определенные амплитуды возможным результатам наблюдения. Тем не менее очень часто мы поддаемся соблазну перейти на язык *квантовых флуктуаций* — мы говорим, что не можем связать объект с одним конкретным положением, потому что принцип неопределенности заставляет его немного флуктуировать вокруг. Это неизбежный лингвистический огрех, но мы не слишком уж чопорны и будем иногда позволять себе эту слабость, помня, однако, что эта формулировка не способна в точности отразить действительность. Смысл

не в том, что существуют положение и импульс и каждая из этих величин немного колеблется, а в том, что существует волновая функция, которая не может быть одновременно локализована и в положении, и в импульсе.

В следующих главах мы познакомимся с приложениями квантовой механики в намного более величественных системах, чем отдельные частицы или даже отдельные кошки: с квантовой теорией поля, а также с квантовой гравитацией. Тем не менее базовый каркас квантовой механики в любом случае останется неизменным. Квантовая теория поля — это союз квантовой механики со специальной теорией относительности, описывающий частицы, которые мы видим вокруг себя, — как наблюдаемые свойства более глубокой фундаментальной структуры — квантовых полей. Принцип неопределенности не позволит нам точно определить положение и импульс каждой частицы и даже точное число частиц. Он же служит первоисточником «виртуальных частиц», которые появляются и исчезают даже в пустом пространстве, и в конечном итоге приводит к хокинговскому излучению черных дыр.

А квантовая гравитация — это штука, которую мы *вообще не понимаем*. Общая теория относительности предлагает чрезвычайно успешное описание гравитации в том виде, как мы ее воспринимаем по ее воздействию на окружающий мир, но эта теория построена на классическом фундаменте. Гравитация — это искривление пространства—времени, и, в принципе, в наших силах измерить искривление пространства—времени с любой степенью точности. Практически никто не сомневается, что это всего лишь приближение к более полной теории квантовой гравитации, в которой само пространство—время описывается волновой функцией, связывающей разные амплитуды с разными значениями искривления. Возможно даже, что целые вселенные появляются и исчезают в точности как виртуальные частицы. Но в попытках сконструировать полную теорию квантовой гравитации мы натываемся на трудно преодолимые препятствия — как технические, так и философские. Преодоление этих препятствий — ежедневный труд большого числа физиков.

Волновая функция Вселенной

Существует один довольно прямолинейный способ расправляться с концептуальными вопросами, связанными с коллапсом волновой функции: просто отрицайте, что это происходит, и настаивайте на том, что обычной непрерывной эволюции волновой функции достаточно для объяснения всего, что нам известно о мире. Этот подход — великолепный в своей простоте и приводящий к серьезным следствиям — носит название многомировой интерпретации

квантовой механики и является основным конкурентом копенгагенской интерпретации. Для того чтобы понять, как он работает, необходимо совершить погружение, вероятно, в самое трудное для понимания свойство квантовой механики — запутывание.

Когда мы впервые ввели понятие волновой функции, мы рассматривали очень минималистическую физическую систему, состоящую из одного объекта (кошки). Определенно, нам хотелось бы вырваться из этих рамок и начать рассматривать системы из множества частей, например кошки и собаки. В классической механике это не представляет проблемы; если состояние одного объекта описывается его положением и импульсом, то состояние двух объектов — это всего лишь состояние обоих объектов по отдельности, то есть два положения и два импульса. Сразу же возникает вполне естественное желание заявить, что правильное квантово-механическое описание кошки и собаки будет представлять собой две волновые функции: одна для кошки и одна для собаки.

Однако так это не работает. В квантовой механике, сколько бы индивидуальных объектов ни составляли интересующую нас систему, *волновая функция всегда только одна*. Даже если мы рассматриваем всю Вселенную и все, что есть внутри нее, волновая функция все равно одна — иногда ее излишне высокопарно называют «волновой функцией Вселенной». Люди порой опасаются использовать подобные обороты из боязни проявить излишнюю претенциозность, но, по сути, так работает квантовая механика — ни больше, ни меньше. (А некоторым, наоборот, претенциозность нравится.)

Давайте посмотрим, как все это реализуется в системе, состоящей из кошки и пса — Китти и Дога. Как и раньше, мы считаем, что Китти можно найти только в двух местах: на диване или под столом. Также представим, что Дога тоже можно пронаблюдать только в двух местах: в гостиной или в саду. Согласно первоначальному (хоть и ошибочному) предположению о том, что у каждого объекта есть своя собственная волновая функция, местоположение Китти описывается как суперпозиция вариантов «под столом» и «на диване», а местоположение Дога отдельно описывается как суперпозиция «в гостиной» и «в саду».

Однако на самом деле квантовая механика диктует, что нам следует рассмотреть все возможные альтернативы для системы целиком — кошка плюс собака — и назначить амплитуды каждому из возможных результатов. В нашей объединенной системе у вопроса: «Что мы видим, когда проверяем местоположения кошки и собаки?» — четыре возможных ответа. Их можно обобщить следующим образом:

(стол, гостиная)

(стол, сад)

(диван, гостиная)

(диван, сад)

Здесь первое слово сообщает нам местонахождение Китти, а второе — где мы видим Дога. Согласно квантовой механике, волновая функция Вселенной привязывает к каждой из этих четырех возможностей свою амплитуду, значение которой необходимо возвести в квадрат, для того чтобы узнать вероятность увидеть именно эту альтернативу.

Возможно, вы задаетесь вопросом, в чем разница между привязкой амплитуд к местоположениям кошки и собаки по отдельности и привязкой амплитуд к перечисленным выше парам местоположений. Ответ кроется в *запутанности*: свойства любого конкретного подмножества целого могут быть сильно скоррелированы со свойствами других подмножеств.

Запутывание

Представим себе, что волновая функция системы, состоящей из кошки и собаки, связывает нулевую амплитуду как с результатом (стол, сад), так и с результатом (диван, гостиная). Схематически это означает, что состояние системы имеет вид

$$(стол, гостиная) + (диван, сад).$$

Таким образом, ненулевая амплитуда связана с ситуацией, когда кошка находится под столом, а собака — в гостиной, и еще одна ненулевая амплитуда относится к ситуации, когда кошка находится на диване, а собака — в саду. Кроме этих двух возможностей, никакие другие варианты в данном состоянии недопустимы. Предположим, что у них равные амплитуды.

Теперь зададим вопрос: что мы ожидаем увидеть, если ищем только Китти? Наблюдение коллапсирует волновую функцию в одну из двух возможностей — (стол, гостиная) или (диван, сад) — с равной вероятностью, 50 % каждая. Если нам вообще все равно, чем занимается Дог, то мы могли бы сказать, что существуют равные вероятности увидеть Китти под столом и на диване. В этом смысле справедливо говорить, что до того, как мы начинаем поиск, у нас нет ни малейшего представления о том, где нам в итоге посчастливится найти Китти.

Теперь давайте представим себе, что вместо Китти мы ищем Дога. И снова существует 50-процентная вероятность получения каждого из двух возможных результатов: (*стол, гостиная*) и (*диван, сад*). Таким образом, если нас не интересует, чем занимается Китти, справедливо говорить, что до того, как мы начинаем поиск, у нас нет ни малейшего представления о том, где нам в итоге посчастливится найти Дога.

Однако вот в чем соль: хотя до начала наблюдения мы не имеем никакого представления о том, где окажется Дог, но если мы решаем проверить, где находится Китти, то как только это измерение сделано, мы получаем точную информацию, где проводит время Дог, несмотря на то что вообще этим не интересовались! Это магия запутывания. Предположим, мы увидели Китти на диване. Это означает, что волновая функция, учитывая ее вид, сколлапсировала в волновую функцию (*диван, сад*). Следовательно, мы можем утверждать (предполагая, что не ошиблись в определении первоначальной волновой функции), что, заглянув в сад, мы обязательно найдем Дога там. Мы сколлапсировали волновую функцию Дога, даже не взглянув на него. Или, если точнее, мы сколлапсировали волновую функцию Вселенной, которая важна для определения местоположения Дога, вообще напрямую с ним не взаимодействуя.

Не знаю, удивил ли вас такой результат. Надеюсь, я достаточно понятно и убедительно рассказал о сути волновых функций, для того чтобы феномен запутанности не показался вам чем-то выдающимся. Так и должно быть; это неотъемлемая часть инструментария квантовой механики, и множество хитроумных экспериментов подтвердили его достоверность в реальном мире. Тем не менее запутанность может привести к следствиям, которые — если воспринимать их буквально — кажутся несовместимыми как минимум с духом теории относительности, если не с буквой закона. Подчеркну еще раз: между квантовой механикой и специальной теорией относительности (общая теория относительности, где в игру вступает гравитация, — это совсем другая история) нет никаких явных несоответствий. Однако некое напряжение между ними существует, и это заставляет людей нервничать. В частности, создается впечатление, что некоторые события происходят со скоростью быстрее скорости света. Но если копнуть поглубже и попытаться понять, что же это за «события» и что означает «происходят», то окажется, что в действительности ничего плохого не происходит: ничто не движется быстрее света, и никакая конкретная информация не передается за пределами чье-либо светового конуса. И все же это вызывает какое-то подспудное раздражение.

ЭПР-парадокс

Вернемся снова к нашей паре, кошке с собакой, и представим, что они пребывают в описанном выше квантовом состоянии, то есть суперпозиции (*стол, гостиная*) и (*диван, сад*). Но на этот раз вообразим, что если Дог оказывается в саду, он не остается просто сидеть там, а куда-то убегает. Кроме того, он любит приключения и живет в будущем, где полеты на ракете и космическая колония на Марсе — обычное дело. Дог — в том варианте, где его путь начинается в саду, а не в гостиной, — убегает в космопорт, прячется на космическом корабле и летит на Марс, и абсолютно никто его все это время не замечает. Лишь когда он вылезает из корабля и прыгает на руки своему старому другу Билли, который после окончания университета вступил в Космический корпус и отправился с миссией на Красную планету, состояние Дога фактически кто-то наблюдает, коллапсируя, таким образом, волновую функцию.

Другими словами, мы представляем, что волновая функция, описывающая систему кошка/собака, непрерывно эволюционировала согласно уравнению Шрёдингера из

$$(\text{стол, гостиная}) + (\text{диван, сад})$$

в

$$(\text{стол, гостиная}) + (\text{диван, Марс}).$$

Ничего невозможного в этом нет — возможно, звучит это слегка неправдоподобно, но если никто не выполнял наблюдений в течение всего периода эволюции, то в результате мы получаем волновую функцию именно в такой суперпозиции.

Однако следствия такой ситуации весьма удивительны. Когда ничего не подозревающий Билли видит Дога, выпрыгивающего из космического корабля на Марсе, он выполняет измерение и коллапсирует волновую функцию. Если он заранее знает, как выглядит волновая функция — то самое запутанное состояние, описывающее местоположения и кошки и собаки, то он немедленно понимает, что Китти находится на диване, а не под столом. Волновая функция сколлапсировала до возможности (*диван, Марс*). Мы не только узнаем состояние Китти, никак не взаимодействуя с ней, — мы узнаем его моментально, несмотря на то что даже при движении со скоростью света путешествие с Марса на Землю занимает по меньшей мере несколько минут.

Это свойство запутанности — тот факт, что состояние Вселенной, как его описывает квантовая волновая функция, «моментально» меняется в пространстве, хотя специальная теория относительности учит нас, что не существует

уникального определения того, что означает «моментально», — выводит из себя множество людей. Определенно, это раздражало Альберта Эйнштейна, который в 1935 году объединился с Борисом Подольским и Натаном Розеном, для того чтобы написать статью и акцентировать внимание на этой странной ситуации, известной сегодня под названием «ЭПР-парадокса». ¹¹ Однако в действительности это вовсе не «парадокс»; он может бросать вызов нашему интуитивному пониманию реальности, но не экспериментальным или теоретическим требованиям.

Важное свойство мгновенного коллапса волновой функции, рассредоточенной на огромные расстояния, заключается в том, что это явление невозможно использовать для передачи какой-либо информации со скоростью, превышающей скорость света. Нам не дает покоя то, что до того, как Билли увидел собаку, Китти здесь, на Земле, не занимала какое-то определенное положение: с вероятностью 50 % мы могли увидеть ее или на диване, а с вероятностью 50% — под столом. Однако как только Билли увидел Дога, мы со 100-процентной вероятностью наблюдаем кошку на диване. Ну и что? На самом деле мы не знаем, выполнил ли Билли наблюдение; насколько нам известно, если мы поищем Дога, то имеем шанс обнаружить его в гостиной. Для того чтобы внезапное открытие Билли что-то изменило в нашей картине мира, ему пришлось бы прийти и рассказать нам эту историю или хотя бы отправить радиограмму. Так или иначе, он должен связаться с нами с помощью традиционных инструментов, работающих медленнее скорости света.

Запутанность двух находящихся на большом расстоянии друг от друга подсистем кажется нам чем-то непостижимым, потому что она нарушает наше интуитивное понимание «локальности»: объекты должны быть в состоянии влиять напрямую лишь на близлежащие объекты, но не на те, которые находятся на произвольно большом расстоянии. Волновые функции работают не так; существует одна волновая функция, описывающая всю Вселенную разом, и на этом история заканчивается. Наблюдаемый нами мир тем временем все так же соблюдает определенный тип локальности: даже если волновая функция моментально коллапсирует во всем пространстве, мы не в состоянии воспользоваться этим свойством для того, чтобы отправить сигналы со скоростью, превышающей скорость света. Другими словами, вещи, с которыми вы сталкиваетесь в своей жизни и которые влияют на вашу жизнь, по-прежнему должны находиться прямо рядом с вами, а не где-то далеко.

С другой стороны, не следует ожидать, что даже такое слабое определение локальности может считаться подлинно священным принципом. В следующей главе мы немного поговорим о квантовой гравитации, когда волновая функция

применяется к разным конфигурациям самого пространства—времени. В этом контексте идея вроде «объекты могут воздействовать друг на друга, только если они находятся поблизости» вообще перестает нести какой-либо смысл. Пространство—время перестает быть абсолютным, оно может находиться в разных конфигурациях, с каждой из которых связана своя амплитуда, поэтому само понятие «расстояния между объектами» слегка размывается. Нам еще только предстоит полностью осознать подобные идеи, но в окончательной теории всего на свете нелокальность, скорее всего, будет играть грандиозную роль.

Много миров, много умов

Главный соперник копенгагенского представления квантовой механики — так называемая многомировая интерпретация. «Множественные миры» — пугающее и вводящее в заблуждение название идеи, которая сама по себе довольно проста. Она заключается в том, что такого явления, как «коллапс волновой функции», не существует. Эволюция состояний в квантовой механике работает точно так же, как в классической механике; она подчиняется детерминистическому правилу — уравнению Шрёдингера, позволяющему предсказывать будущее и прошлое любого конкретного состояния с идеальной точностью. Вот и все.

Проблема с этим заявлением в том, что нам кажется, будто мы постоянно *видим* коллапс волновых функций или, по крайней мере, наблюдаем следствия таких процессов. Мы можем представить Китти в квантовом состоянии, в котором одинаковые амплитуды связаны с возможностью обнаружить ее на диване и под столом; затем мы идем искать ее и видим нашу кошку под столом. Если мы сразу же после этого взглянем еще раз, то увидим ее под столом в 100 % случаев; исходное наблюдение (в привычном понимании того, как следует рассуждать о подобных вещах) сколлапсировало волновую функцию в собственное состояние, связанное со столом. Следствия такого способа мышления легко проверяются на опыте, что успешно доказано множеством реальных экспериментов.

Ответ сторонников многомировой интерпретации таков: вы просто-напросто неправильно мыслите. В частности, вы ошибочно идентифицируете *себя* в волновой функции Вселенной. В конце концов, вы часть физического мира, и, следовательно, на вас также распространяются правила квантовой механики. Невозможно отделиться от нее, объявив себя неким объективным классическим инструментом наблюдения; следовательно, в волновой функции мы также должны учитывать собственное состояние.

Итак, в этой новой истории мы не должны исходить из волновой функции, описывающей Китти как суперпозицию (*дивана*) и (*стола*); следует включить в описание и собственную конфигурацию. В частности, здесь важна такая характеристика нашего описания, которая показывает, выполнили ли мы уже наблюдение Китти и знаем ли о ее местоположении. Мы можем быть в одном из трех возможных состояний: мы увидели кошку на диване, мы увидели кошку под столом или же мы еще не смотрели, где кошка. В самом начале волновая функция Вселенной (или, по крайней мере, та ее часть, которую мы здесь описываем) назначает Китти равные амплитуды для состояний «на диване» и «под столом», в то время как мы однозначно находимся в состоянии «еще не смотрели». Схематически это можно изобразить так:

(*диван, мы еще не смотрели*) + (*стол, мы еще не смотрели*).

Теперь мы проверяем местоположение кошки. В копенгагенской интерпретации мы бы сказали, что волновая функция коллапсирует. Но в многомировой интерпретации мы говорим, что наше собственное состояние переплетается с состоянием Китти, и объединенная система эволюционирует в суперпозицию:

(*диван, мы видим кошку на диване*) + (*стол, мы видим кошку под столом*).

Коллапса не происходит; волновая функция эволюционирует гладко, и процесс «наблюдения» не привносит никаких особенностей. Более того, вся эта процедура обратима: зная конечное состояние, с помощью уравнения Шрёдингера мы можем однозначно восстановить исходное состояние. Никакой внутренней квантово-механической стрелы времени в этой интерпретации нет. По многим причинам это намного более элегантная и приемлемая картина мира, чем та, которую предлагает нам копенгагенская интерпретация.

Проблема тем не менее должна быть очевидна: в конечном состоянии мы находимся в суперпозиции двух разных результатов. Сложность в том, что мы, разумеется, не *чувствуем* себя так, будто находимся в подобной суперпозиции. Если мы фактически измерили систему, которая пребывала в квантовой суперпозиции, по выполнении наблюдения мы всегда *уверены*, что увидели какой-то конкретный результат. Другими словами, недостаток многомировой интерпретации в том, что она не соответствует нашим впечатлениям от реального мира.

Однако не будем торопиться с выводами. Кто такие «мы», о которых мы здесь рассуждаем? Многомировая интерпретация утверждает, что волновая функция Вселенной эволюционирует в суперпозицию, показанную выше, содержащую амплитуду того, что мы видим кошку на диване, и амплитуду того,

что мы видим ее под столом. Вот в чем соль: те «мы», которые видят, воспринимают и верят, — это не озвученная выше суперпозиция. То есть «мы» — это одна из альтернатив, та или иная. Таким образом, теперь у нас есть два разных «мы»: те мы, которые увидели Китти на диване, и вторые мы, которые увидели ее под столом, и оба экземпляра честно существуют в волновой функции. У них общие предыдущие воспоминания и опыт — до того, как они измерили местоположение кошки, они по всем параметрам были одним и тем же человеком — но теперь они разделились на две разные «ветви волновой функции», и никакие взаимодействия между ними впредь невозможны.

Это те самые «множественные миры», на которых основывается интерпретация, хотя очевидно, что название немного дезориентирует. Иногда выдвигается возражение, суть которого в том, что многомировая интерпретация просто-напросто слишком экстравагантна и ее невозможно принимать всерьез: все это бесконечное разнообразие «параллельных реальностей», нужных только для того, чтобы избавиться от коллапса волновой функции. Но это смешно. До того как мы выполнили наблюдение, Вселенная описывалась одной волновой функцией, которая связывала определенную амплитуду с каждым возможным результатом наблюдения; после наблюдения Вселенная описывается одной волновой функцией, связывающей определенную амплитуду с каждым возможным результатом наблюдения. До и после волновая функция Вселенной — это всего лишь конкретная точка в пространстве состояний, описывающих Вселенную, и это пространство состояний не увеличивается и не уменьшается. Никакие новые «миры» не создаются; волновая функция содержит один и тот же объем информации (в конце концов, в этой интерпретации ее эволюция обратима). Она просто эволюционировала так, что теперь различных подмножеств волновой функции, описывающей индивидуальных разумных существ, таких как мы, стало больше. Многомировая интерпретация квантовой механики может быть правильной или неправильной, но опровергать ее, предьявляя возражения в стиле: «Да ну, слишком много миров!» — абсолютно недопустимо.

Автор первой формулировки многомировой интерпретации — это не Бор, не Гейзенберг, не Шрёдингер и не один из других ученых, которые почитались как столпы науки на заре квантовой механики. Она была предложена в 1957 году Хью Эвереттом III, аспирантом, работавшим совместно с Джоном Уилером в Принстоне.¹² В то время (и на протяжении десятилетий спустя) преобладающей точкой зрения была копенгагенская интерпретация, поэтому Уилер сделал самый очевидный шаг: он отправил Эверетта в командировку в Копенгаген, для того чтобы тот обсудил свою новаторскую идею с Нильсом Бором

и другими. Но поездка не увенчалась успехом: Бор был абсолютно не впечатлен, да и остальные члены физического сообщества не продемонстрировали особого интереса к идеям Эверетта. Он оставил научную работу ради должности в министерстве обороны, а позднее основал собственную компьютерную фирму. В 1970 году физик-теоретик Брайс Девитт (один из пионеров, помимо Уилера, применения квантовой механики к гравитации) подхватил знамя многомировой интерпретации и помог популяризовать ее среди физиков. Эверетту довелось при жизни увидеть возрождение интереса к его идеям в физическом сообществе, но к активным исследованиям он так и не вернулся; он скоропостижно скончался от сердечного приступа в 1982 году, в возрасте пятидесяти одного года.

Декогеренция

Несмотря на все ее преимущества, многомировая интерпретация квантовой механики — далеко не готовый продукт. Многие вопросы еще остаются без ответа: от глубоких и концептуальных: почему разумные наблюдатели идентифицируются с отдельными ветвями волновой функции, а не с суперпозициями — до исключительно технических: как в этом формализме оправдать правило о том, что «вероятности равны квадратам амплитуд»? Это реальные вопросы, ответы на которые совсем не очевидны, и это одна из причин, почему многомировая интерпретация пока не получила всеобщего одобрения и поддержки. Однако за последние несколько десятилетий был достигнут большой прогресс, особенно в вопросах, связанных с таким исконно квантово-механическим явлением, как *декогеренция*. Многие ученые (хотя и не все, и до достижения единства мнений пока еще далеко) выражают надежду на то, что это явление поможет нам разобраться, почему *кажется*, что волновые функции коллапсируют, хотя в многомировой интерпретации явно утверждается, что этот коллапс мнимый.

Декогеренция возникает, когда состояние какого-то крошечного фрагмента Вселенной — например, вашего мозга — так сильно перепутывается с частями глобального окружения, что больше не испытывает интерференции — явление, которое, в сущности, и определяет свойство «квантовости». Для того чтобы понять, как это работает, вернемся к примеру с запутанным состоянием Китти и Дога. Существуют две альтернативы с равными амплитудами: кошка находится под столом, а собака — в гостиной и кошка находится на диване, а собака — в саду:

(стол, гостиная) + (диван, сад).

Мы уже видели, как в ситуации, когда кто-то наблюдает состояние Дога, волновая функция (на копенгагенском языке) коллапсирует, оставляя Китти в некотором конкретном состоянии.

Но давайте теперь проделаем другой фокус: представьте себе, что никто не проверяет состояние Дога, все просто игнорируют его. По сути, мы отбрасываем любую информацию о запутанности между Китти и Догом и просто спрашиваем себя: каково состояние у Китти самой по себе?

Можно было бы предположить, что в данном случае ответом будет суперпозиция в форме (стол)+(диван), как раньше, до привнесения в ситуацию собачьих сложностей. Но это не совсем верно. Проблема в том, что интерференция — явление, благодаря которому мы, если уж на то пошло, убедились в том, что квантовые амплитуды необходимо принимать всерьез, — теперь невозможна.

В нашем исходном примере, где мы впервые познакомились с интерференцией, у амплитуды Китти, соответствующей нахождению под столом, было две составляющие: одна из варианта, где кошка останавливается у миски с кормом, а вторая — из варианта, где она останавливается у когтеточки. При этом критически важно было то, что эти две составляющие, которые в конечном итоге отменяли друг друга, вели к одному и тому же итоговому результату («Китти находится под столом»). Две составляющие конечной волновой функции интерферируют только в том случае, если они действительно приводят к одной и той же альтернативе для всего во Вселенной; если же они способствуют разным альтернативам, то интерференция между ними невозможна, даже если различия относятся ко всему прочему во Вселенной, за исключением самой Китти.

Таким образом, если состояние Китти запутано с состоянием Дога, интерференция между альтернативами, меняющими состояние Китти, невозможна без соответствующих изменений состояния Дога. Никакой добавок к волновой функции не может интерферировать с альтернативой «Китти находится под столом», потому что данная альтернатива — не полное описание того, что мы можем увидеть. Интерференция возможна только с альтернативами «Китти находится под столом, а Дог — в гостиной», которые действительно представлены в волновой функции.¹³

Следовательно, если Китти запутана с внешним миром, но нам неизвестны детали этого запутывания, неправильно считать ее состояние квантовой суперпозицией. На самом деле следует рассматривать его как обычное классическое распределение различных альтернатив. Как только мы отбрасываем любую информацию о том, с чем запутана наша кошка, состояние Китти перестает

быть истинной суперпозицией; в любых мыслимых экспериментах Китти находится либо в одном состоянии, либо в другом, даже если мы не знаем, в каком конкретно. Интерференция невозможна.

Это декогеренция. В классической механике каждый объект находится в определенном положении, даже если нам неизвестно, каково в точности его положение, и все, что мы можем сделать, — это приписать вероятности различным альтернативам. Волшебство квантовой механики состоит в том, что такого понятия, как «где находится объект», больше не существует; объекты пребывают в одновременной суперпозиции возможных альтернатив, и мы знаем, что это должно быть правдой, потому что это подтверждается экспериментами, демонстрирующими реальность интерференции. Однако если квантовое состояние, описывающее объект, запутано с чем-то еще во внешнем мире, интерференция становится невозможной, и мы возвращаемся к традиционному классическому взгляду на вещи. С нашей точки зрения объект находится в том состоянии или в ином, и кроме как присвоить вероятности различным альтернативам, мы ничего больше сделать не можем: вероятности отражают наше неведение, а не глубинную реальность. Если квантовое состояние какого-то конкретного подмножества Вселенной представляет истинную суперпозицию, не запутанную с окружающим миром, мы говорим, что оно «когерентно»; если суперпозиция нарушена из-за запутывания с чем-то еще за пределами рассматриваемого подмножества, мы говорим, что она становится «декогерентной». (Вот почему в многомировой интерпретации установка камер слежения считается актом наблюдения; между состоянием кошки и состоянием камер появляется запутанность.)

Коллапс волновой функции и стрела времени

Очевидно, что в многомировой интерпретации декогеренция играет критически важную роль в процессе предполагаемого коллапса волновых функций. Суть не в том, что в «разумности» или в «наблюдателях» есть что-то особенное (за исключением того, что это сложные макроскопические объекты). А в том, что любой сложный макроскопический объект неизбежно взаимодействует (и следовательно, запутывается) с внешним миром, и попытаться отследить точный вид этого запутывания — дело абсолютно безнадежное. Крохотную микроскопическую систему, например отдельный электрон, можно изолировать и поместить в истинно квантовую суперпозицию, не запутанную с состояниями других частиц. Однако для такой сложной системы, как человек (или скрытая камера наблюдения, если уж на то пошло), это попросту невозможно.

В этом случае наша простая картина, где состояние нашего сознания запутывается с состоянием Китти, становится чрезмерным упрощением. На самом деле главную роль в этой истории играет наша запутанность с внешним миром. Представим, что вначале Китти находится в истинно квантовой суперпозиции, не запутанная ни с чем в окружающем мире; но мы, будучи чрезвычайно сложными созданиями, тесно запутаны с окружающим миром массой разнообразных способов, которые при всем желании не смогли бы перечислить. Волновая функция Вселенной связывает разные амплитуды с альтернативными конфигурациями сложной системы, состоящей из Китти, нас и внешнего мира. После того как мы проверяем местоположение Китти, волновая функция эволюционирует в такую форму:

$$\begin{aligned} & (\text{диван, мы видим ее на диване, мир}_1) + \\ & + (\text{стол, мы видим ее под столом, мир}_2), \end{aligned}$$

где третья составляющая описывает (неизвестную) конфигурацию внешнего мира, разную для каждого из этих двух случаев.

Поскольку мы ничего не знаем об этом состоянии, то просто игнорируем запутанность с окружающим миром, но сохраняем знание о местоположении Китти и о нашем сознании. Очевидно, что две эти вещи тесно связаны: если кошка на диване, то мы уверены, что видели ее на диване, и так далее. Однако отбрасывание сведений о конфигурации внешнего мира означает, что мы более не находимся в реальной квантовой суперпозиции. Вместо этого у нас на руках оказываются две во всех отношениях классические альтернативы: Китти находится на диване и мы видели ее на диване или же она находится под столом и мы видели ее под столом.

Именно это мы имеем в виду, когда говорим о разветвлении волновой функции в разные «миры». Какая-то небольшая система в истинно квантовой суперпозиции наблюдается макроскопическим измерительным инструментом, но данный инструмент запутан с внешним миром; если мы игнорируем состояние внешнего мира, то у нас на руках остаются две классические альтернативы. С точки зрения любой из этих классических альтернатив волновая функция «схлопнулась», но с гипотетической более масштабной точки зрения, где мы сохранили всю информацию в волновой функции Вселенной, никаких внезапных изменений состояния не произошло — всего лишь гладкая эволюция в соответствии с уравнением Шрёдингера.

Все эти фокусы с отбрасыванием информации могут вызывать у вас смутную тревогу, но согласитесь, что это звучит знакомо. То, чем мы здесь занимались, — это в действительности простое огрубление, то же самое, которое мы приме-

няли при обсуждении статистической (классической) механики для определения макросостояний, соответствующих различным микросостояниям. Информация о нашей запутанности с беспорядочной внешней средой аналогична информации о положении и импульсе каждой молекулы в контейнере с газом: нам она не нужна, и на практике отслеживать ее невозможно, поэтому мы создаем феноменологическое описание, основываясь исключительно на макроскопических переменных.

В этом смысле необратимость, проявляющаяся при коллапсе волновой функции, можно считать прямым аналогом необратимости традиционной термодинамики. Базовые законы все так же обратимы, но в беспорядочном реальном мире мы постоянно отбрасываем огромное количество информации, и в результате нам кажется, что мы наблюдаем необратимое поведение даже в макроскопических масштабах. Когда мы проверяем местоположение кошки и наше собственное состояние запутывается с ее состоянием, для того чтобы воспроизвести процесс в обратную сторону, нам потребовалось бы знать точное состояние внешнего мира, с которым мы также тесно связаны, однако мы эту информацию отбросили. Это полная аналогия того, что происходит при размешивании ложки молока в чашке кофе; в принципе, мы могли бы обратить процесс, если бы следили за положениями и импульсами каждой молекулы смеси, но на практике мы следим только за макроскопическими переменными, утрачивая обратимость.

В обсуждении декогеренции критическую роль играла наша способность изолировать наблюдаемую систему (Китти или какую-то элементарную частицу) от остального мира в истинно квантовой суперпозиции. Однако очевидно, что это очень специфический тип состояния, похожий на низкоэнтропийные состояния, с которых все начинается, как мы предполагали при рассмотрении второго начала термодинамики. В состоянии общего вида всевозможные варианты запутывания нашей маленькой системы и внешнего окружения будут существовать с самого начала.

Разумеется, ничто из написанного выше не должно вселять в вас уверенность в том, что добавление декогеренции к многомировой интерпретации позволит одним махом разделаться со всеми проблемами толкования квантовой механики. И все же это кажется шагом в правильном направлении; кроме того, подчеркивается важная взаимосвязь между макроскопической стрелой времени, известной нам еще по статистической механике, и другой макроскопической стрелой времени, проявляющейся при коллапсе волновой функции. Возможно, самое главное преимущество декогеренции заключается в том, что она позволяет отбросить такие плохо определенные понятия, как «разумный наблюдатель», из словаря, с помощью которого мы описываем этот мир.

Хорошенько запомнив все это, впредь мы продолжим в своих рассуждениях опираться на тот факт, что фундаментальные законы физики полностью обратимы на микроскопических масштабах. Это не неопровержимое утверждение, но за ним стоит очень сильная аргументация; к тому же оно позволяет нам сохранять объективность при изучении следствий данной конкретной точки зрения. И это приводит нас туда же, откуда все началось: к задаче объяснения очевидного отсутствия обратимости на макроскопических масштабах с помощью выбора особых условий вблизи Большого взрыва. Для того чтобы всерьез приняться за решение этой проблемы, необходимо для начала поговорить о гравитации и эволюции Вселенной.

Примечания

- ¹ Цитата из работы *Von Baeyer, H. C. Information: The New Language of Science. Cambridge, MA: Harvard University Press, 2003, p. 12–13.*
- ² Я не утверждаю, что древние буддисты не обладали мудростью, однако в основе их мудрости лежал не провал классического детерминизма на атомных масштабах; точно так же они не превосходили современную физику ни на каком содержательном уровне, за исключением неизбежных случайных совпадений при выборе слов для обсуждения глобальных космических понятий. (Однажды мне довелось прослушать лекцию, в которой утверждалось, что базовые идеи первичного ядерного синтеза были изложены еще в Торе; если размыть определения достаточно сильно, то пугающие сходства можно обнаружить где угодно.) Игнорировать настоящие различия между их целями и методами и нашими в попытке сплести осязаемые связи из поверхностных аналогий было бы абсолютным неуважением по отношению как к древним философам, так и к современным физикам.
- ³ Совсем недавно для этой цели начали вербовать собак. См. *Orzel, C. How to Teach Physics to Your Dog. New York: Scribner, 2009.*
- ⁴ Мы все еще продолжаем обходить молчанием один технический момент: истина в действительности на один шаг сложнее, чем можно было бы понять из предыдущего описания, однако это не та сложность, без которой нам не достичь наших текущих целей. На самом деле квантовые амплитуды — это *комплексные числа*, и это означает, что в состав каждого значения амплитуды входят два числа: вещественное и мнимое (мнимое число — это то, что вы получаете, когда извлекаете квадратный корень из отрицательного вещественного числа; то есть «мнимая двойка» — это квадратный корень из минус четырех, и т. д.). Комплексные числа принимают форму $a + bi$, где a и b — это вещественные числа, а i — квадратный корень из минус единицы. Если амплитуда, связанная с определенной возможностью, равна $a + bi$, то соответствующая вероятность равна просто $a^2 + b^2$, что гарантированно больше нуля или равно нулю. Вам придется поверить мне на слово: этот дополнительный инструментарий чрезвычайно важен для работы квантовой механики. Если же вы не готовы довериться мне, то приступайте к изучению математических подробностей теории (если честно, то мне сложно представить менее оправдывающий себя способ потратить собственное время).

- ⁵ Тот факт, что любая конкретная последовательность событий приписывает положительные или отрицательные амплитуды двум возможностям, — это всего лишь предположение, которое мы делаем в целях нашего мысленного эксперимента, а не глубинная характеристика правил квантовой механики. В любой задаче из реального мира точные значения амплитуды определяются деталями рассматриваемой системы, но мы пока что не углубляемся в технические подробности настолько сильно. Обратите также внимание на то, что конкретные амплитуды в наших примерах принимают значение $0,7071$ со знаком «плюс» или «минус» — это числа, дающие при возведении в квадрат значение $0,5$.
- ⁶ В 1997 году на симпозиуме, собравшем авторитетных исследователей, занимающихся вопросами квантовой механики, Макс Тегмарк провел заведомо антинаучный опрос, попросив участников назвать интерпретации квантовой механики, которым они отдают предпочтение (*Tegmark, M. The Interpretation of Quantum Mechanics: Many Worlds or Many Words? // Fortschritte der Physik*, 1998, 46, S. 855–862). Копенгагенская интерпретация заняла первое место, набрав тринадцать голосов, тогда как многомировая пришла второй с восемью голосами. Оставшиеся девять голосов распределились между несколькими другими альтернативами. Любопытнее всего то, что восемнадцать голосов было отдано за пункт «ничто из перечисленного/не определится». И это эксперты.
- ⁷ Здесь и далее речь идет о так называемых *идеализированных измерениях*. Реальные измерения не абсолютно точны и оказывают более сложное влияние на волновую функцию системы. — *Примеч. науч. ред.*
- ⁸ А что же произойдет, если мы повесим камеры наблюдения, но не станем просматривать пленки? Совершенно не важно, смотрим мы запись или нет; камера все так же считается наблюдением, поэтому шанс увидеть кошку под столом будет. В копенгагенской интерпретации мы бы сказали, что «камера представляет собой классический измерительный прибор, воздействие которого приводит к коллапсу волновой функции». В многомировой интерпретации, как мы вскоре узнаем, объяснение звучит так: «волновая функция камеры запутывается с волновой функцией кошки, поэтому альтернативные истории декогерируют».
- ⁹ Многие люди предлагали изменить правила квантовой механики таким образом, чтобы это было не так; было предложено несколько так называемых теорий со скрытыми переменными, которые не вписывались в стандартную концепцию квантовой механики. В 1964 году физик-теоретик Джон Белл доказал важную теорему: никакая локальная теория со скрытыми переменными не в состоянии воспроизвести предсказания квантовой механики. Это не остановило людей от исследования нелокальных теорий — таких, в которых отдаленные события могут мгновенно воздействовать друг на друга. Но мода на подобные теории не получила распространения; большинство современных физиков полагают, что квантовая механика просто-напросто верна, даже если пока нам непонятно, как ее интерпретировать.
- ¹⁰ Мы даже можем сделать несколько более сильное заявление. В классической механике состояние определяется положением и скоростью, так что можно предположить, что квантовая волновая функция связывает вероятности со всеми возможными сочетаниями положений и скоростей. Однако в действительности это работает не так. Укажите амплитуду для каждого возможного положения, и работа на этом будет закончена: вы полностью и целиком определите квантовое состояние. Но что же произошло со скоростью? Оказывается, можно записать ту же волновую функцию в терминах амплитуд для каждой

возможной скорости, полностью исключив из описания положение. Это не два разных состояния; просто два разных способа описания в точности одного и того же состояния. На самом деле существует даже стандартный способ преобразования между этими двумя представлениями, известный под названием преобразования Фурье. Зная амплитуды для всех возможных положений, вы можете выполнить преобразование Фурье, для того чтобы определить амплитуды всех возможных скоростей, и наоборот. В частности, если волновая функция находится в собственном состоянии, сконцентрированная вокруг одного конкретного значения положения (или скорости), то ее преобразование Фурье будет полностью рассредоточено по всем возможным скоростям (или положениям).

¹¹ *Einstein, A., Podolsky, B., Rosen, N. Can Quantum-Mechanical Description of Physical Reality Be Considered Complete? // Physical Review, 1935, 47, p. 777–780.*

¹² *Everett, H. Relative State Formulation of Quantum Mechanics // Reviews of Modern Physics, 1957, 29, p. 454–462.* Обсуждение с разных точек зрения см. в работах: *Deutsch, D. The Fabric of Reality: The Science of Parallel Universes—And Its Implications. New York: Allen Lane, 1997; Albert, D. Z. Quantum Mechanics and Experience. Cambridge, MA: Harvard University Press, 1992; Ouellette, J. The Physics of the Buffyverse. New York: Penguin, 2007.*

¹³ Обратите внимание на то, насколько важную роль играет в этой истории запутывание. Если бы запутанности не было, то внешний мир все так же существовал бы, но альтернативы, доступные Китти, абсолютно не зависели бы от происходящего во внешнем мире. В этом случае можно было бы совершенно спокойно приписать волновую функцию одной только Китти. Вот и отлично; благодаря этому мы можем применять формальный подход квантовой механики к индивидуальным атомам и прочим простым изолированным системам. Произвольные объекты не обязательно всегда запутаны с чем-нибудь еще; будь это так, было бы невозможно получить сколько-нибудь полную информацию ни о какой конкретной подсистеме нашего мира.

Часть IV

Из кухни в Мультиленную

Глава 12

Черные дыры: конец времени

Мой старый друг Время скоро погрузится
в тень.

*Энн Секстон. Г-же Смерть, стоящей
у открытой двери*

Стивен Хокинг — один из самых несгибаемых людей на Земле. В 1963 году, во время работы над докторской диссертацией в Кембриджском университете (Хокингу тогда был 21 год), у него диагностировали заболевание двигательных нейронов. Прогноз был неблагоприятный: Хокингу сказали, что он вряд ли проживет долго. Проведя определенную переоценку ценностей, Хокинг решил не останавливаться, а, наоборот, активизировать свою исследовательскую работу. Результат нам всем известен: будучи на восьмом десятке, Хокинг остается самым влиятельным специалистом по общей теории относительности после Альберта Эйнштейна, а также является всемирно известным популяризатором физики.

Помимо всего прочего, Хокинг — неутомимый путешественник; каждый год он проводит некоторое время в Калифорнии. В 1998 году, когда я был научным сотрудником Института теоретической физики при Калифорнийском университете в Санта-Барбаре, Хокинг посетил институт в рамках своего ежегодного визита. Администратор института, ответственный за его прием, дал мне простое задание — встретить Хокинга в аэропорту.

Как вы можете догадаться, встретить Стивена Хокинга в аэропорту — это не то же самое, что встретить любого другого человека. Во-первых, это не просто

«встреча»: Хокинг арендует специальный фургон для перевозки своей инвалидной коляски, на вождение которого требуется специальная лицензия. Такой лицензии у меня, конечно же, не было, и вождение было доверено аспиранту — ассистенту Хокинга. Моя миссия сводилась к тому, чтобы встретить их в маленьком аэропорту Санта-Барбары и провезти до фургона.

Под «ними» я подразумеваю всю «свиту» Хокинга: аспиранта-ассистента (обычно это аспирант-физик, отвечающий за транспортировку), других аспирантов, членов семьи, а также сопровождающих медсестер. Но дело не ограничилось только проходами до фургона. Хотя аспирант-ассистент был единственным, кто имел право вести фургон, Хокинг настоял, чтобы фургон находился постоянно при нем, а также пожелал пообедать в ресторане до того, как отпустить аспиранта устраиваться в квартире. Это означало, что я должен был следовать за ними на своей машине, а затем исполнить роль «челнока» — забрать ассистента, а потом доставить его обратно. Месторасположение ресторана было известно только самому Хокингу, общение же через его синтезатор речи — довольно долгий процесс; мы пережили несколько напряженных моментов, стоя посреди загруженной трассы, пока Хокинг объяснял, что мы проехали ресторан и нам надо разворачиваться обратно.

Стивен Хокинг сумел достичь очень значимых результатов, работая в невероятных трудных обстоятельствах, и причина его успехов проста: он никогда не идет на компромисс. Он никогда не сокращает расписание своих поездок, не соглашается обедать в другом ресторане, или пить менее качественный чай, или умерить свое своеобразное чувство юмора, или чуть поменьше думать о внутреннем устройстве Вселенной только потому, что он прикован к инвалидной коляске. Такая сила характера помогает ему и в реализации своих научных устремлений, и в обыденной жизни.

В 1973 году Хокинг был выведен из равновесия. Яков Бекенштейн, молодой аспирант Принстонского университета, написал статью, в которой выдвинул невероятное предположение: в черных дырах может содержаться огромная энтропия.¹ К тому времени Хокинг уже считался мировым экспертом по черным

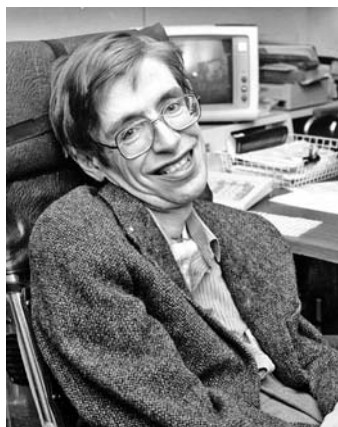


Рис. 12.1. Стивен Хокинг — человек, внесший самый весомый вклад в изучение взаимосвязи между квантовой механикой, гравитацией и энтропией

дырам, и он (по его собственным словам) сильно рассердился на Бекенштейна, который (по мнению Хокинга) неправильно интерпретировал более ранние результаты, полученные самим Хокингом.² Хокинг решил наглядно показать сумасбродность идеи Бекенштейна, начав с того, что если бы черные дыры имели энтропию, то из этого бы следовало, что они должны испускать какое-то излучение, но всем известно, что черные дыры «черны»!

В конце концов, конечно же, Хокинг удивил всех, включая себя самого. Черные дыры действительно имеют энтропию, и при этом они действительно испускают излучение, что можно показать, приняв во внимание определенные квантово-механические тонкости. Как бы ни был упрям человек, законы природы никогда не подчинятся его воле, и Хокинг оказался достаточно мудр, чтобы принять радикальные следствия собственного открытия. В результате он дал ученым-физикам наиважнейший ключ к пониманию связи между квантовой механикой и гравитацией и существенно углубил понимание ими природы энтропии.

Черные дыры — это реальность

У нас есть веские причины полагать, что черные дыры реально существуют. Конечно, мы не в состоянии увидеть их непосредственно — они достаточно «темны», даже несмотря на доказательство Хокингом отсутствия их абсолютной «черноты». Однако мы можем наблюдать то, что происходит в их окрестностях, а пространство вокруг черной дыры обладает достаточно специфическими свойствами, чтобы мы могли с уверенностью утверждать, что наблюдаем именно окрестности черной дыры. Некоторые черные дыры образуются в результате коллапса очень массивных звезд, а такие звезды часто имеют звезд-компаньонов, вращающихся вокруг главной звезды. Потоки газа, испускаемые звездой-компаньоном, могут падать на черную дыру, образуя вокруг нее аккреционный диск, который, в свою очередь, нагревается до гигантских температур и испускает мощное рентгеновское излучение. Спутниковые обсерватории обнаружили множество источников рентгеновского излучения, демонстрирующих все характерные особенности объектов подобного рода, в частности сильные потоки высокоинтенсивного излучения, исходящие из небольшого участка космического пространства. У астрофизиков нет другого удовлетворительного объяснения этих наблюдений, кроме предположения о наличии там черных дыр.

Имеются также убедительные доказательства существования сверхмассивных черных дыр в центрах галактик — их массы в миллионы раз превышают

массу Солнца (хотя эти массы все равно составляют лишь небольшую часть полных масс галактик, которые обычно превышают массу Солнца в сотни миллиардов раз). На ранних стадиях образования галактики эти гигантские черные дыры поглощают все вещество вокруг себя, затягивая его мощнейшими вихрями, которые мы наблюдаем как квазары. По мере прихода галактики к состоянию равновесия эти процессы замедляются, и квазары «выключаются». Ученые почти уверены, в частности, что в центре нашего собственного Млечного Пути скрывается черная дыра массой около четырех миллионов солнечных масс. Даже при отсутствии интенсивного излучения квазаров наблюдения за звездами, находящимися в центре галактики, показывают, что эти звезды вращаются строго по эллиптическим орбитам вокруг некоего невидимого объекта. Можно заключить, что эти звезды находятся в гравитационном поле настолько плотного и массивного объекта, что он не может быть ничем, кроме черной дыры, если, конечно, считать общую теорию относительности применимой.³

У черных дыр нет волос

Как бы ни было интересно заниматься поиском черных дыр во Вселенной, еще интереснее просто размышлять о них.⁴ Черная дыра — это наилучшая лаборатория для проведения мысленных экспериментов в области гравитации. Особо ценное свойство черных дыр — это их «чистота».

Хотя наблюдения убеждают нас в существовании черных дыр, они не дают нам сколько-нибудь подробных сведений об их свойствах; мы не можем близко подойти к черной дыре и потрогать ее. Когда мы уверенно заявляем что-либо о тех или иных свойствах черных дыр, мы неявно исходим из определенных теоретических предположений. К сожалению, ученым еще не удалось построить законченную теорию квантовой гравитации, которая предположительно должна объединить общую теорию относительности с принципами квантовой механики. Так что пока у нас нет единой корректной теории, которая бы могла дать ответы на все наши вопросы раз и навсегда.

В отсутствие полной теории мы обычно исследуем вопросы в рамках одного из трех теоретических подходов.

1. *Классическая общая теория относительности как она сформулирована Эйнштейном.* Это наилучшая полная теория гравитации, имеющаяся на данный момент, и она полностью согласуется со всеми известными экспериментальными данными. Эта теория великолепно работает в том смысле, что она может дать конкретный ответ на любой правильно поставленный вопрос

(даже если наши вычислительные возможности не позволят нам получить точное числовое значение). К сожалению, эта теория не исчерпывающе верна, поскольку она полностью классическая, а не квантово-механическая.

2. *Квантовая механика в искривленном пространстве—времени.* Это подход с «раздвоенной природой». Мы рассматриваем пространство—время, среду, сквозь которую движется материя во Вселенной, как что-то классическое, подчиняющееся законам общей теории относительности. В то же время мы рассматриваем «материю» как что-то квантово-механическое, описываемое в терминах волновых функций. Это вполне оправданный компромиссный подход, который может помочь в решении многих практических задач.
3. *Квантовая гравитация.* Корректная теория квантовой гравитации пока не создана, хотя существует ряд многообещающих подходов, таких как теория струн. Мы не абсолютно беспомощны в данном вопросе: нам кое-что известно о принципах действия гравитации и кое-что — о принципах квантовой механики. Зачастую таких знаний бывает достаточно для получения подходящих приближений к реальной картине квантовой гравитации даже в отсутствие законченной теории.

Среди всех перечисленных подходов лучше всего изучена классическая общая теория относительности, в то время как теория квантовой гравитации изучена хуже остальных; в то же время последняя обеспечивает наилучшее приближение к реальности. Квантовая механика в искривленном пространстве—времени представляет собой «разумную середину» между двумя другими подходами; Хокинг использовал именно ее для решения проблемы излучения черных дыр. Однако нам следует вначале понять, как описывать черные дыры в сравнительно несложных рамках подхода общей теории относительности, прежде чем переходить к разбору более передовых, но более спекулятивных теорий.

В классической общей теории относительности черная дыра представляет собой практически «чистое» гравитационное поле. В абстрактном мысленном эксперименте мы можем представить себе образование черной дыры множеством способов: из шарового скопления газа типа обычной звезды либо из гигантской планеты, состоящей из чистого золота, либо из огромного шарика мороженого. Но когда эти объекты сжимаются до маленького размера с таким сильным гравитационным полем, что ничто уже не может покинуть его, то есть когда этот объект «официально» превращается в черную дыру, становится уже совершенно неважно, из какого материала он изначально состоял. Черная дыра, образовавшаяся из газового шара солнечной массы, неотличима от черной

дыры, образовавшейся из шарика мороженого солнечной массы. Согласно общей теории относительности, черная дыра — это не просто плотно упакованный объем исходного материала. Это чистое гравитационное поле: исходный материал исчез в сингулярности, образовав область сильно искривленного пространства—времени.

Рассматривая гравитационное поле Земли, мы можем представить нашу планету как идеальную сферу определенной массы и размера. Но это всего лишь приближение. Если мы хотим большей точности, то мы должны принять во внимание факт вращения Земли, благодаря которому ее радиус немного больше в районе экватора, чем у полюсов. Если же мы захотим максимально возможной точности, то увидим, что гравитационное поле Земли меняется от точки к точке довольно сложным образом; неровность поверхности, а также отличие плотности суши и моря или различных видов горных пород приводят к небольшим, но измеримым вариациям силы земного тяготения. Эти локальные особенности гравитационного поля Земли действительно содержат существенное количество информации.

Все это не относится к черным дырам. После образования черной дыры любые неровности и неоднородности материала, из которого она образовалась, исчезают. Возможно, существует короткий период времени в процессе образования черной дыры, в течение которого она еще остается не до конца сформированной. Но очень быстро она становится абсолютно гладкой и лишенной каких-либо особенностей. После завершения формирования черной дыры у нее остаются три характеристики, поддающиеся измерению: ее полная масса, скорость ее вращения и ее электрический заряд (суммарный электрический заряд реальных астрофизических черных дыр близок к нулю, но при этом скорость их вращения может быть очень большой). Вот и все. Два скопления вещества с одинаковыми массой, зарядом и угловым моментом, характеризующим вращение, превратившись в черные дыры, становятся совершенно неразличимыми при рассмотрении в рамках классической общей теории относительности. Это довольно интересное предсказание общей теории относительности кратко выражено в остроумном изречении Джона Уилера, человека, давшего черным дырам их название: «У черных дыр нет волос».

Выявленный факт «отсутствия волос» должен привести нас к важному заключению. Очевидно, что если все вышесказанное верно, то процесс образования черной дыры имеет одно очень серьезное следствие, а именно: информация теряется. Мы можем взять два совершенно разных типа начальных условий (одну солнечную массу горячего газа или одну солнечную массу мороженого), и они могут прийти к одному и тому же конечному состоянию (одна

черная дыра солнечной массы). Однако до сих пор мы утверждали, что микроскопические физические законы, одним из которых, по-видимому, является и уравнение Эйнштейна, обладают свойством сохранения информации. Другими словами, образование черной дыры, видимо, является необратимым процессом, несмотря на то что уравнение Эйнштейна определенно обратимо.

Вы правильно забеспокоились! Эта загадка связана со временем. Классическая общая теория относительности предлагает такой выход: мы можем сказать, что информация на самом деле не *исчезла* как таковая, но она *исчезла для нас*, поскольку оказалась за горизонтом событий черной дыры. Вы можете сами решить для себя, выглядит это объяснение удовлетворительным или оно похоже на простую отговорку. В любом случае мы не можем остановиться на этом, поскольку Хокинг нам в конце концов заявит, что черные дыры испаряются, если принять во внимание квантово-механические эффекты. Таким образом, ясно, что мы столкнулись с серьезной проблемой — проблемой, послужившей стимулом для публикации тысячи работ по теоретической физике.⁵

Законы механики черных дыр

Возможно, вы думаете, что раз ничто не способно сбежать из черной дыры, ее общая масса никогда не уменьшается. Но это не совсем верно, что доказывает весьма ловкая идея Роджера Пенроуза. Пенроуз понимал, что у черных дыр могут быть угловой момент и заряд, а также масса, поэтому задал вполне разумный вопрос: можно ли применить эти угловой момент и заряд для выполнения полезной работы? Другими словами, можем ли мы извлекать энергию из черной дыры путем уменьшения ее углового момента и заряда? (Говоря о черных дырах как об одиночных объектах в покое, термины «масса» и «энергия» можно использовать как взаимозаменяемые, не забывая, однако, об известном уравнении $E = mc^2$.)

Ответ — да, по крайней мере на уровне мысленных экспериментов, которыми мы здесь занимаемся. Пенроуз предложил способ, как бросать объекты вплотную к вращающейся черной дыре, а затем извлекать их в изменившемся состоянии, с большей энергией, чем вначале, замедляя, таким образом, вращение черной дыры и уменьшая ее массу. По сути, мы можем превращать угловой момент черной дыры в полезную энергию. Невероятно развитая цивилизация, имеющая доступ к гигантской вращающейся черной дыре, обладала бы колоссальным запасом энергии для реализации любых общественных проектов, какие только им придут в голову. Однако этот запас не был бы неограниченным — с помощью данного процесса возможно извлечение лишь определенной

конечной энергии, так как, в конце концов, черная дыра вообще прекратит вращаться. (В самом оптимистичном сценарии мы могли бы извлечь около 29 % общей энергии черной дыры, исходная скорость вращения которой была очень высокой.)

Итак, Пенроуз показал, что черные дыры — это системы, из которых мы можем извлекать энергию для выполнения полезной работы, по крайней мере до определенной степени. Если у черной дыры нет углового момента, значит, мы использовали всю доступную энергию, и дыра просто остается на своем месте, неподвижная и бесполезная. Эти слова должны показаться вам смутно знакомыми и напомнить о предыдущих обсуждениях термодинамики.

Стивен Хокинг довел работу Пенроуза до конца, продемонстрировав, что, хотя и можно уменьшить массу/энергию вращающейся черной дыры, существует величина, которая всегда либо увеличивается, либо остается неизменной, — площадь горизонта событий, которая, по сути, характеризует размер черной дыры. Площадь горизонта зависит от определенного сочетания массы, углового момента и заряда, и Хокинг обнаружил, что эта конкретная комбинация никогда не уменьшается, что бы мы ни предпринимали. Например, если у нас есть две черные дыры, они могут столкнуться друг с другом и слиться в одну черную дыру, сильно вибрирующую и испускающую гравитационное излучение.⁶ Однако площадь нового горизонта событий всегда больше, чем суммарная площадь двух исходных горизонтов, и — что немедленно следует из открытия Хокинга — одна большая черная дыра никогда не может распасться на две меньшие, так как в этом случае ее площади пришлось бы уменьшить.⁷ Для заданной массы мы получаем горизонт максимальной площади для одиночной, незаряженной, невращающейся черной дыры.

Итак, хотя до какого-то момента мы можем продолжать извлекать полезную энергию из черной дыры, существует определенная величина (площадь горизонта событий), возрастающая в процессе эволюции и достигающая максимального значения в момент, когда вся полезная энергия была извлечена. Интересно. И действительно звучит пугающе похоже на термодинамику.

Однако хватит ходить вокруг да около, давайте проведем явную аналогию.⁸ Хокинг показал, что площадь горизонта событий черной дыры никогда не уменьшается; она либо увеличивается, либо остается постоянной. Это очень похоже на то, как ведет себя энтропия согласно второму началу термодинамики. Первое начало термодинамики обычно кратко формулируется в виде: «энергия сохраняется», но в действительности оно говорит нам о том, каким образом разные формы энергии сочетаются, образуя полную энергию. Очевидно, что для черных дыр действует абсолютно аналогичное правило: общая

масса определяется формулой, включающей составляющие как со стороны углового момента, так и заряда.

Также существует третье начало термодинамики: энтропия достигает минимума при минимальной возможной температуре, равной абсолютному нулю. Но что будет играть роль «температуры» в нашей аналогии в контексте черных дыр? Ответ — *поверхностная гравитация* черной дыры, то есть сила гравитационного притяжения дыры вблизи горизонта событий с точки зрения наблюдателя, находящегося очень далеко. Возможно, вы подумали, что поверхностная гравитация должна быть бесконечной, — не в этом ли сама суть черной дыры? Но выясняется, что в действительности это мера того, насколько сильно пространство—время искривлено рядом с горизонтом событий, причем поверхностная гравитация *ослабевает* по мере того, как сама черная дыра становится все более и более массивной.⁹ А минимального — нулевого! — значения поверхностная гравитация черной дыры достигает тогда, когда вся энергия черной дыры связана с зарядом или спином, а «масса сама по себе» никакой роли не играет.

И наконец, необходимо вспомнить о нулевом начале термодинамики: если две системы находятся в термодинамическом равновесии с третьей системой, то они находятся в термодинамическом равновесии друг с другом. Аналогичное утверждение для черных дыр сформулировать просто: «на горизонте событий стационарной черной дыры значение поверхностной гравитации повсюду одинаково». И это правда.

Итак, между законами термодинамики, как они были сформулированы на протяжении XIX века, и «законами механики черных дыр», как они были сформулированы в 1970-х годах, существует идеальная аналогия. Различные элементы аналогии приведены в следующей таблице.

Термодинамика	↔	Черные дыры
Энергия	↔	Масса
Температура	↔	Поверхностная гравитация
Энтропия	↔	Площадь горизонта

Однако теперь перед нами встал важный вопрос, один из тех, которые в науке чаще всего ведут к великим открытиям: насколько серьезно следует относиться к этой аналогии? Может быть, это всего лишь забавное совпадение? Или она все же отражает какую-то основополагающую глубинную истину?

Это абсолютно разумный вопрос, а вовсе не пустое подведение к предсказуемому ответу. Совпадения иногда случаются. Когда ученые натываются на

любопытную связь между двумя, казалось бы, абсолютно непохожими вещами, такими как термодинамика и черные дыры, это может оказаться для них ключом к важному открытию, а может остаться простой случайностью. Основываясь на собственной интуиции, разные люди высказывают разные мнения относительно того, стоит искать здесь глубинные связи или нет. В конечном итоге мы сможем подойти к проблеме с научной стороны и прийти к обоснованному заключению, но пока что ответ не очевиден.

Гипотеза Бекенштейна об энтропии

Серьезнее всего к аналогии между термодинамикой и механикой черных дыр отнесся Яков Бекенштейн, который был тогда аспирантом Джона Уилера. В то время как все физическое сообщество заинтересованно изучало физику элементарных частиц (это были героические дни 1960-х и 1970-х годов, период становления Стандартной модели), Уилер, в свободное от сочинения емких замечаний время, с энтузиазмом продвигал область квантовой гравитации (и общую теорию относительности в целом). Влияние Уилера чувствовалось не только посредством его идей — совместно с Брайсом Девиттом они впервые обобщили уравнение Шрёдингера из квантовой механики для гравитационной теории, но и через его учеников. Помимо Бекенштейна, под началом Уилера успели получить степень кандидата наук (Ph.D.) немало ученых, которые сегодня являются признанными лидерами в исследовании гравитации, включая Кипа Торна, Чарльза Мизнера, Роберта Уолда и Уильяма Унру, не говоря уж о Хью Эверетте, а также первом студенте Уилера, некоем Ричарде Фейнмане.

Итак, в начале 1970-х годов Принстон был плодотворной средой для исследований черных дыр, и Бекенштейн находился в центре событий. В своей диссертации он сделал простое, но исключительно эффективное предположение: связь между механикой черных дыр и термодинамикой — это не просто аналогия. Это тождество. В частности, Бекенштейн использовал идеи из теории передачи информации, доказывая, что площадь горизонта событий черной дыры не просто *похожа* на энтропию, а в действительности и *есть* энтропия черной дыры.¹⁰

На первый взгляд это предположение кажется несколько неправдоподобным. Больцман уже рассказал нам, что такое энтропия: это мера количества микроскопических состояний системы, неразличимых с макроскопической точки зрения. Казалось бы, выражение «у черных дыр нет волос» подразумевает, что у большой черной дыры мало состояний, ведь она полностью характеризуется значениями массы, заряда и углового момента. Однако здесь на сцену выходит

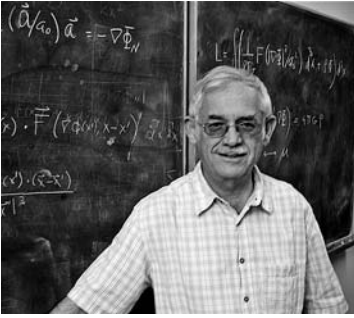


Рис. 12.2. Яков Бекенштейн, ученый, впервые выдвинувший предположение о том, что черные дыры обладают энтропией

ную роль; планковская площадь — это всего лишь квадрат планковской длины. Для черной дыры, масса которой сравнима с массой Солнца, площадь горизонта событий составляет около 10^{77} планковских площадей. Это большое число; энтропия, равная 10^{77} , — это больше, чем обычная энтропия всех звезд, газа и пыли во всей галактике Млечный Путь.

Если не копать слишком глубоко, то найти способ, как справиться с очевидной несостыковкой «безволосой» идеи и бекенштейновского представления об энтропии, совсем нетрудно: можно считать, что классическая общая теория относительности неверна и нам требуется квантовая гравитация для описания громадного количества состояний, существование которых подразумевается энтропией черной дыры. Или, если уменьшить градус заумности, классическая общая теория относительности схожа с термодинамикой, а квантовая гравитация необходима для «статистически-механического» понимания энтропии на микроскопическом уровне, в ситуациях, когда гравитация оказывает огромное влияние. Согласно предположению Бекенштейна, в действительности существует тьма тьмущая различных способов организации пространства—времени на микроскопическом квантовом уровне, приводящих к созданию макроскопической классической черной дыры. Нам остается только выяснить, что это за способы. Оказывается, проще сказать, чем сделать; прошло более 35 лет, а мы до сих пор так до конца и не разобрались в природе этих микросостояний, подразумеваемых формулой энтропии черной дыры. Мы думаем, что черная дыра похожа на контейнер с газом, но нам неизвестно, что там за «атомы» внутри, — мы располагаем лишь несколькими дразнящими намеками.

Бекенштейн и заявляет, что энтропия черной дыры астрофизических размеров ошеломительно велика.

Площадь горизонта событий должна измеряться в каких-то единицах: акрах, гектарах, квадратных сантиметрах — что вам больше нравится. Бекенштейн утверждал, что энтропия черной дыры примерно равна площади горизонта событий, выраженной в единицах планковской площади. Планковская длина, равная 10^{-33} сантиметрам, представляет собой невероятно маленькое расстояние, на котором квантовая гравитация начинает играть заметную роль;

Тем не менее камень преткновения вовсе не в этом. Вспомните, что первоначально второе начало термодинамики было сформулировано Карно и Клаузиусом задолго до рождения Больцмана. Возможно, в вопросе исследования квантовой гравитации прямо сейчас мы находимся на аналогичной стадии прогресса. Вполне может оказаться, что, так же как температура и давление в обычной термодинамике, свойства массы, заряда и углового момента в классической общей теории относительности — это простые макроскопические наблюдаемые величины, не способные определить микросостояние полностью.

В представлении Бекенштейна черные дыры — это не какие-то странные штуковины, держащиеся особняком от остальных физических объектов; это термодинамические системы, такие же, как, например, контейнер с газом. Он предложил «обобщенное второе начало термодинамики», представляющее собой, по сути, обычное второе начало, но с добавлением энтропии черных дыр. Мы можем взять контейнер с газом, обладающий определенной энтропией, бросить его в черную дыру и рассчитать общую энтропию до и после. Мы увидим, что если согласиться с утверждением Бекенштейна о том, что энтропия черной дыры пропорциональна площади горизонта событий, то энтропия увеличится. Очевидно, что такой сценарий должен иметь важные следствия для взаимосвязи энтропии с пространством—временем, стоящие того, чтобы уделить им особое внимание.

Хокинговское излучение

Одновременно с деятельностью группы Уилера в Принстоне активная работа над общей теорией относительности велась в начале 1970-х годов в Великобритании. В частности, Стивен Хокинг и Роджер Пенроуз изобретали и применяли новые математические методы для изучения искривленного пространства—времени. Результатом этих исследований стали знаменитые теоремы о сингулярностях (когда гравитационная сила становится достаточно большой, как в черных дырах или вблизи Большого взрыва, общая теория относительности предсказывает существование сингулярностей), а также сделанный Хокингом вывод о том, что площадь горизонтов событий черных дыр никогда не уменьшается.

Итак, Хокинг пристально следил за работой Бекенштейна, но она его не слишком радовала. Прежде всего, если вы собираетесь принимать аналогию между площадью горизонта событий и энтропией всерьез, то должны не менее серьезно относиться и к прочим составляющим аналогии термодинамика/

механика-черной-дыры. В частности, поверхностная гравитация черной дыры (которая велика для небольших черных дыр с ничтожно малым угловым моментом и зарядом и довольно мала для больших черных дыр или черных дыр со значительным спином или зарядом) должна быть пропорциональна ее температуре. Но это на первый взгляд кажется полнейшим абсурдом. Нагретые до высокой температуры, объекты начинают испускать излучение — как расплавленный металл или горящее пламя. Однако черные дыры не излучают; они черные. «Так-то вот!» — наверняка думал Хокинг на другом берегу Атлантического океана.

Неутомимый путешественник, в 1973 году Хокинг посетил Советский Союз, для того чтобы поговорить о черных дырах. В Москве в то время трудилась, успешно соперничая с группами в Принстоне и Кембридже, группа экспертов по относительности и космологии под руководством Якова Зельдовича. Зельдович и его коллега Александр Старобинский рассказали Хокингу о работе, которую они проделали для того, чтобы понять процесс Пенроуза, — извлечение энергии из вращающейся черной дыры — в контексте квантовой механики. Согласно выводам московской группы, квантовая механика указывает, что вращающаяся черная дыра должна сама спонтанно испускать излучение и терять энергию; нет никакой необходимости в том, чтобы суперпродвинутая цивилизация бросалась в нее какими-то вещами.

Хокинг был заинтригован, но его не вполне убедили конкретные доводы, приведенные Зельдовичем и Старобинским.¹¹ И он поставил целью самостоятельно разобраться в следствиях, к которым приводит квантовая механика в контексте черных дыр. Это не самая простая задача. «Квантовая механика» представляет собой очень обобщенную идею: пространство состояний включает волновые функции, а не положения и импульсы, и невозможно напрямую измерить волновую функцию, не оказав на нее существенного влияния. В рамках этого подхода можно рассматривать самые разные типы квантовых систем — от отдельных частиц до наборов суперструн. Основатели квантовой механики вполне предсказуемо фокусировались на относительно простых системах, состоящих из небольшого числа атомов, двигающихся друг относительно друга довольно медленно. Именно такие системы предлагаются для изучения большинству студентов-физиков при первом знакомстве с квантовой механикой.

Когда частицы набирают высокую энергию и начинают перемещаться со скоростью, близкой к скорости света, мы больше не можем игнорировать уроки теории относительности. Как минимум, энергия двух частиц, которые сталкиваются друг с другом, может быть настолько высокой, что они рожают

несколько новых частиц посредством чуда соотношения $E = mc^2$. Благодаря десятилетиям напряженной работы физиков-теоретиков надлежащий формализм, примиряющий квантовую механику со специальной теорией относительности, был получен в форме квантовой теории поля.

Основная идея квантовой теории поля проста: мир сделан из полей, и когда мы наблюдаем волновые функции этих полей, мы видим частицы. В отличие от частицы, которая существует в какой-то конкретной точке, поле распространяется на все пространство целиком; электрическое поле, магнитное поле, гравитационное поле — все это давно знакомые всем нам примеры. В каждой точке пространства каждое существующее поле обладает определенным значением (которое также может быть нулевым). Согласно квантовой теории поля, полем является абсолютно все: есть поле электронов, различные типы кварковых полей и т. д. Но когда мы смотрим на поле, мы видим частицы. Например, изучая электрическое и магнитное поля, мы видим фотоны — частицы, относящиеся к электромагнетизму. Слабо осциллирующее электромагнитное поле обнаруживается в форме небольшого числа фотонов; сильно осциллирующее электромагнитное поле обнаруживается в виде большого числа фотонов.¹²

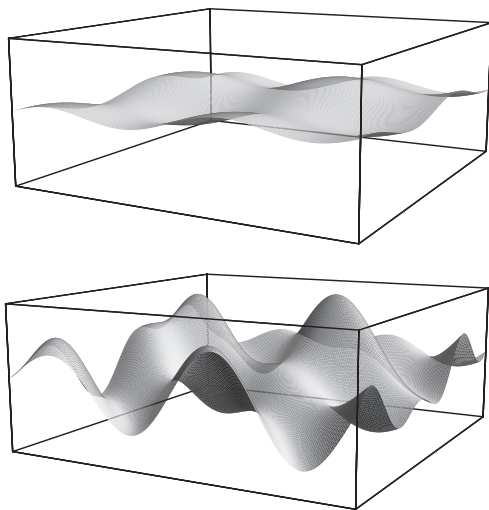


Рис. 12.3. В каждой точке пространства у полей есть значения. Наблюдая квантовое поле, мы видим не само поле, а набор частиц. Слегка осциллирующее поле, такое как показанное на верхнем рисунке, соответствует малому числу частиц; сильно вибрирующее поле, изображенное на нижнем рисунке, соответствуют большому числу частиц

Квантовая теория поля примиряет квантовую механику со специальной теорией относительности. Это совсем не то, что «квантовая гравитация», которая, в свою очередь, примиряет квантовую механику с *общей* теорией относительности, теорией гравитации и искривленного пространства—времени. В квантовой теории поля мы считаем, что пространство—время само по себе классическое, искривлено оно или нет; поля подчиняются правилам квантовой механики, тогда как пространство—время всего лишь играет роль жестко закрепленного, неизменного фона. В случае полнофункциональной квантовой гравитации, наоборот, мы полагаем, что даже у пространства—времени есть волновая функция и оно полностью квантово-механическое. Работа Хокинга была выполнена в контексте квантовой теории поля на фиксированном фоне искривленного пространства—времени.

Теория поля никогда не была специализацией Хокинга. Несмотря на то что она, как и общая теория относительности, в общественном сознании воспринимается как еще одна «современная физическая теория со звучным названием, непостижимая для обычного человека», эти две области сильно отличаются друг от друга, и эксперт в одной из них может слабо разбираться в другой. Так что Хокинг взялся за учебу. Сэр Мартин Рис, один из ведущих мировых астрофизиков-теоретиков, служащий в настоящее время королевским астрономом Британии, был в то время молодым ученым из Кембриджа. Как и Хокинг, он получил кандидатскую степень несколькими годами ранее под руководством Денниса Сиамы. К этому времени тело Хокинга было уже сильно деформировано из-за болезни; когда ему требовался учебник по квантовой теории поля, Рису приходилось открывать книгу и держать ее перед коллегой. Хокинг мог часами безмолвно изучать научные тексты, и Рис задавался вопросом, не превращается ли болезнь в слишком тяжелый груз для Хокинга.¹³

Но ничего подобного. В действительности Хокинг применял формализм теории поля к вопросу излучения черных дыр. Он надеялся вывести формулу, которая позволит воспроизвести результат Зельдовича и Старобинского для вращающихся черных дыр, но все время наткнулся на что-то совершенно невероятное: создавалось впечатление, что, согласно квантовой теории поля, даже из невращающихся черных дыр должно исходить излучение. То есть они должны излучать точно так же, как система в термодинамическом равновесии при какой-то фиксированной температуре, пропорциональной поверхностной гравитации, — в точности как предписывает аналогия между черными дырами и термодинамикой.

К своему удивлению, Хокинг доказал правоту Бекенштейна. Черные дыры действительно ведут себя как обычные термодинамические объекты. Это означает, помимо прочего, что энтропия черной дыры на самом деле пропор-

циональна площади ее горизонта событий; оказалось, что связь между этими двумя величинами — вовсе не простое забавное совпадение. Более того, расчеты Хокинга (в отличие от заявления Бекенштейна) позволили ему установить точный коэффициент пропорциональности: $1/4$. Таким образом, если L_p — планковская длина, а L_p^2 — планковская площадь, то энтропия черной дыры равна $1/4$ площади ее горизонта, измеренного в единицах планковской площади:

$$S_{BH} = \frac{A}{(4L_p^2)}.$$

Нижний индекс ВН можно читать как *Black Hole* — «черная дыра» по-английски либо как *Bekenstein—Hawking* (Бекенштейн—Хокинг) — как вам больше нравится. Эта формула — самый важный ориентир, который у нас есть в деле примирения гравитации и квантовой механики.¹⁴ И если мы хотим понять, почему сразу после Большого взрыва энтропия была очень мала, то нам необходимо разложить по полочкам наши знания об энтропии и гравитации, так что логично начать именно с них.

Испарение

Для того чтобы полностью разобраться, каким образом Хокинг пришел к этому потрясающему результату — пониманию того, что черные дыры излучают, — необходимо провести тщательный математический анализ поведения квантовых полей в искривленном пространстве. Однако существует также популярное объяснение «на пальцах», и оно содержит достаточно ценной истины, чтобы на него могли опираться все люди мира, включая Хокинга. Так почему бы нам не последовать их примеру?

Основная мысль состоит в том, что квантовая теория поля подразумевает существование «виртуальных частиц» в дополнение к старым добрым реальным частицам. Мы мимоходом упомянули об этой идее в главе 3, когда обсуждали энергию вакуума. Казалось бы, самую низкую энергию квантовое поле должно иметь в состоянии, когда оно абсолютно постоянно, то есть просто существует в неизменном виде, не меняясь от точки к точке или от одного момента времени к другому. Если бы речь шла о классическом поле, все так и было бы, но как в квантовой механике невозможно привязать частицу к одному конкретному положению, так и в квантовой теории поля нельзя привязать поле к одной конкретной конфигурации. Значение квантового поля всегда будет содержать какие-то неопределенности и нечеткость — это неотъемлемое его свойство. Это присущее квантовым полям дрожание можно отнести на счет появления

и исчезновения частиц — по одной частице и одной античастице за раз, причем происходит это так стремительно, что мы просто не успеваем их заметить. Такие виртуальные частицы невозможно засечь напрямую; если мы видим частицу, то точно знаем, что это реальная, а не виртуальная частица. Однако виртуальные частицы могут взаимодействовать с реальными (не виртуальными), едва ощути-мо изменяя их свойства, и это воздействие можно пронаблюдать и изучить в мельчайших деталях. Виртуальные частицы действительно существуют.

Одним из важнейших выводов Хокинга было то, что гравитационное поле черной дыры способно превращать виртуальные частицы в реальные. Обычно виртуальные частицы появляются парами: одна частица и одна античастица.¹⁵ Они возникают, существуют на протяжении кратчайшего времени, а затем аннигилируют, пока никто не заметил. Но благодаря наличию горизонта событий черная дыра все меняет. Когда пара из виртуальной частицы и античастицы образуется очень близко к горизонту, одна из частиц может упасть под горизонт, и, очевидно, у нее не останется других вариантов, кроме как продолжать падение в сингулярность. Тем временем другая частица сможет убежать на бесконечность. Горизонт событий разорвал виртуальную пару, проглотив одну из частиц. А убежавшая частица стала частью хокинговского излучения.

Теперь на сцену выходит важнейшее свойство виртуальных частиц: их энергия может быть вообще какой угодно. Общая энергия пары из виртуальной частицы и античастицы в точности равна нулю — это необходимое условие, так как они должны уметь появляться из вакуума и растворяться в нем. Энергия реальных частиц равна произведению массы на квадрат скорости света, когда частица находится в покое, а с началом движения частицы возрастает; следовательно, энергия никогда не может быть отрицательной. Таким образом, если у реальной частицы, убежавшей от черной дыры, положительная энергия, а общая энергия исходной виртуальной пары была нулевой, значит, у частицы, упавшей в черную дыру, энергия *отрицательная*. И когда эта частица падает, общая масса черной дыры уменьшается.

В конце концов, если она не получит какую-то дополнительную энергию из других источников, черная дыра полностью испарится. Оказывается, черные дыры нельзя считать областями, где время обрывается раз и навсегда; это объекты, которые успевают просуществовать в течение какого-то периода времени, прежде чем окончательно исчезнуть. В каком-то смысле хокинговское излучение сделало черные дыры намного более приземленными, чем они казались в классической общей теории относительности.

Хокинговское излучение обладает интересным свойством: чем *меньше* черная дыра, тем она *горячее*. Температура пропорциональна поверхностной

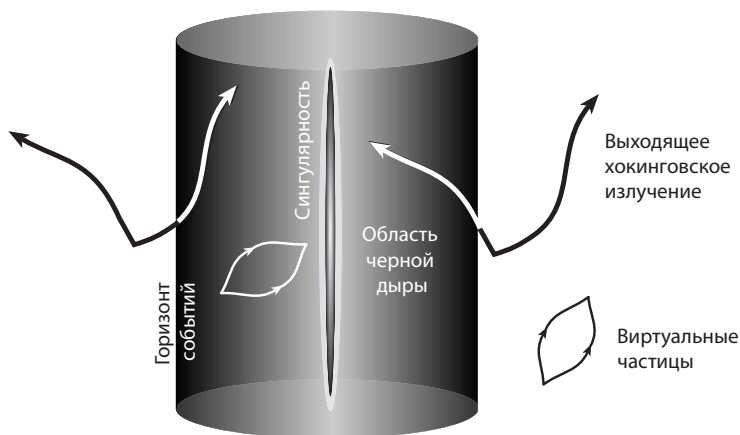


Рис. 12.4. Хокинговское излучение. В квантовой теории поля виртуальные частицы и античастицы постоянно образуются из вакуума и исчезают в вакууме. Однако поблизости от черной дыры одна из пары частиц может провалиться под горизонт событий, а другая — убежать во внешний мир в форме хокинговского излучения

гравитации, которая тем больше, чем менее массивную черную дыру мы рассматриваем. У тех типов астрофизических черных дыр, о которых мы говорим в этой главе (с массой, равной массе Солнца или намного ее превышающей), очень низкие хокинговские температуры; во Вселенной в ее текущем состоянии такие черные дыры вообще не испаряются, так как забирают намного больше энергии у окружающих объектов, чем теряют посредством хокинговского излучения. Ситуация не поменялась бы, даже если бы единственным внешним источником излучения был космический микроволновый фон с температурой около 3 кельвинов. Для того чтобы черная дыра имела температуру выше, чем сегодняшняя температура космического микроволнового фона, ее масса должна составлять менее 10^{14} килограммов — приблизительно столько весит гора Эверест, а это намного меньше, чем у любой известной нам черной дыры.¹⁶ Разумеется, фоновое микроволновое излучение становится все холоднее по мере расширения Вселенной, так что если подождать достаточно долго, черные дыры станут теплее окружающей Вселенной и начнут терять массу. В ходе этого процесса они будут нагреваться и терять массу еще быстрее; процесс выйдет из-под контроля, и как только черные дыры съедятся до критического размера, их быстрый конец наступит в форме эффектных взрывов.

К сожалению, численная величина ожидаемого эффекта не позволяет Стивену Хокингу получить Нобелевскую премию за предсказание существо-

вания излучения из черных дыр. Если говорить о типах черных дыр, известных нам сегодня, то излучение из них слишком ничтожно, чтобы его можно было засечь в обсерватории. Возможно, нам повезет, и когда-нибудь мы обнаружим чрезвычайно маленькую черную дыру, испускающую высокоэнергетическое излучение, но шансы невелики.¹⁷ А Нобелевская премия вручается за эффекты, которые можно реально пронаблюдать уже сейчас, а не просто за отличные идеи. И все же авторы отличных идей не остаются без вознаграждения.

Потеря информации?

Тот факт, что черные дыры испаряются, поднимает важный вопрос: что происходит с информацией, которая участвовала в образовании черной дыры? Мы упоминали о сбивающем с толку следствии принципа «отсутствия волос» у черных дыр в классической общей теории относительности: независимо от того, из чего была образована черная дыра, после завершения процесса ее формирования единственными ее характеристиками являются масса, заряд и угловой момент. В предыдущих главах мы много говорили о том, что по мере развития Вселенной, от одного момента времени к другому, законы физики сохраняют информацию, необходимую для описания состояния. На первый взгляд кажется, что черные дыры уничтожают эту информацию.

Представьте себе, что вы, окончательно расстроившись из-за неспособности современной физики предоставить достойное объяснение стрелы времени, швыряете эту книгу в огонь. Позднее вас начинает глотать мысль о том, что этот импульсивный поступок был большой ошибкой, и вы хотите получить книгу обратно. К сожалению, она уже сгорела дотла. Однако законы физики говорят нам, что вся информация, содержащаяся в книге, в принципе, осталась доступной, как бы ни было трудно ее восстановить на практике. Горящая книга эволюционировала в одну конкретную конфигурацию пепла, света и тепла. Если бы мы могли точно описать полное микросостояние Вселенной после того, как огонь погас, мы, теоретически, могли бы прокрутить стрелки часов в обратную сторону и выяснить, что за книга тогда сгорела: эта, которую вы читаете, или, например, «Краткая история времени» (демону Лапласа было бы известно, какая именно). Конечно же, все это лишь теоретические измышления, потому что по ходу дела энтропия также значительно увеличится, но, в принципе, это вполне реальный сценарий.

Если же вместо того, чтобы швырять книгу в огонь, вы забросите ее в черную дыру, история изменится. Согласно классической общей теории относитель-



Рис. 12.5. Информация (например, книга) падает в черную дыру и должна выйти наружу в форме хокинговского излучения. Но как она может быть одновременно в двух местах?

ности, восстановить информацию будет невозможно; книга упала в черную дыру, и мы ничего не можем сделать, кроме как измерить массу, заряд и угловой момент черной дыры. Другие характеристики нам недоступны. Единственное наше утешение — надежда, что эта информация где-то все же сохранилась, просто нам теперь до нее не добраться.

Однако ситуация предстает в совершенно ином свете, как только в игру вступает хокинговское излучение. Теперь черная дыра не живет вечно; если мы терпеливо подождем, она полностью испарится. И если информация не теряется, то мы должны оказаться в том же случае, как и в примере с огнем; то есть, в принципе, быть способными восстановить содержимое книги, изучая свойства выходящего излучения.

Проблема с подобными ожиданиями возникает, когда мы начинаем анализировать, каким образом виртуальные частицы порождают хокинговское излучение вблизи горизонта событий черной дыры. Исходя из того, что изображено на рис. 12.5, можно подумать, что книга проваливается сквозь горизонт и попадает в сингулярность (или туда, что заменяет сингулярность в теории квантовой гравитации), забирая с собой всю информацию, содержащуюся на страницах. В то же время излучение, которое предположительно переносит ту же информацию, уже покинуло черную дыру. Как одна и та же информация может быть одновременно в двух местах?¹⁸ Расчеты Хокинга показывают, что выходящее излучение совершенно одинаково для всех типов черных дыр, независимо от того, из чего они сделаны. Таким образом, получается, что инфор-

мация попросту уничтожается? Если вспомнить наши предыдущие примеры с шахматными досками, то это аналогично существованию определенного рода пятна, которое случайным образом порождает либо серые, либо белые квадраты вне зависимости от предыдущего состояния.

Эта загадка известна как «парадокс о потере информации в черных дырах». Поскольку экспериментальную информацию о квантовой гравитации очень сложно получить напрямую, размышления о том, как же все-таки разрешить этот парадокс, в последние несколько десятилетий непрерывно занимали умы множества физиков-теоретиков. Физическое сообщество раскололось на две части. Физики, которые, грубо говоря, долго занимались общей теорией относительности (включая Стивена Хокинга), склонялись к тому, что информация действительно теряется и что испарение черной дыры — это пример нарушения привычных правил квантовой механики. В то же время ученые, занимавшиеся физикой элементарных частиц и квантовой теорией поля, скорее были готовы поверить в то, что нам необходимо лучше разобраться в вопросе испарения черных дыр, и тогда мы увидим, что информация все же каким-то образом сохраняется.

В 1997 году Хокинг и его коллега Кип Торн (оба из лагеря общей теории относительности) заключили пари с Джоном Прескиллом, физиком-теоретиком, занимающимся изучением элементарных частиц в Калтехе. Вот текст этого договора:

Исходя из того что Стивен Хокинг и Кип Торн твердо уверены, что информация, поглощаемая черной дырой, навсегда скрывается из внешней Вселенной и никогда, даже после испарения черной дыры, не может быть обнаружена повторно и полностью исчезает, а также принимая во внимание, что Джон Прескилл твердо уверен, что механизм выхода информации при испарении черной дыры должен быть и будет обнаружен в правильной теории квантовой гравитации,

Прескилл предлагает, а Хокинг и Торн принимают предложение заключить пари о следующем:

Когда чистое квантовое начальное состояние претерпевает гравитационный коллапс, формируя черную дыру, конечное состояние по завершении испарения черной дыры всегда будет являться чистым квантовым состоянием.

Проигравший (проигравшие) наградит победителя (победителей) энциклопедией по выбору победителя, откуда тот может извлекать информацию по своему желанию.

Стивен У. Хокинг, Кип С. Торн, Джон П. Прескилл
Пасадена, Калифорния, 6 февраля 1997 г.

В 2004 году Хокинг совершил поступок, о котором кричали заголовки всех газет: он признал свое поражение, согласившись, что при испарении черной дыры информация действительно сохраняется. Интересно также, что Торн со своим поражением так и не согласился (по состоянию на момент написания этой книги); более того, Прескилл с большой неохотой принял свой выигрыш (энциклопедия *Total Baseball: The Ultimate Baseball Encyclopedia*, восьмое издание), так как считал, что вопрос пока что еще не решен до конца.¹⁹

Что же убедило Хокинга, на протяжении тридцати лет утверждавшего, что информация в черных дырах теряется, в том, что в действительности она сохраняется? Ответ основывается на нескольких важных идеях, касающихся пространства—времени и энтропии, поэтому для начала нам необходимо познакомиться с основами.

Сколько состояний поместится в контейнер?

Мы неспроста пытаемся докопаться до самой сути черных дыр в книге, которая, по идее, должна быть посвящена стреле времени: стрела времени связана с увеличением энтропии, а главная причина этого увеличения кроется в низкой энтропии сразу после Большого взрыва — в тот период истории Вселенной, когда гравитация играла принципиально важную роль. Таким образом, нам необходимо знать, как энтропия ведет себя в присутствии гравитации, и неполное понимание квантовой гравитации сдерживает нас, не давая добраться до сути. Единственный намек, которым мы располагаем, — это формула Хокинга для энтропии черной дыры; попробуем воспользоваться этой подсказкой и посмотрим, куда это нас приведет. Действительно, попытки понять энтропию черной дыры и разобраться с парадоксом о потере информации в черных дырах существенно продвинули исследования пространства—времени и пространства состояний в квантовой гравитации.

Рассмотрим такую загадку: сколько энтропии может уместиться в контейнере? Больцману и его современникам этот вопрос показался бы глупым — ведь в коробку можно вместить столько энтропии, сколько душа пожелает. Если у нас есть контейнер, полный молекул газа, то состояние с максимальной энтропией (равновесная конфигурация) будет существовать для любого фиксированного числа молекул — газ будет равномерно распределен по контейнеру при постоянной температуре. При желании мы могли бы впихнуть в этот контейнер еще больше энтропии; все, что нам для этого потребовалось бы, — это добавить больше молекул. Если нас вдруг начнет волновать вопрос о том, что молекулы занимают определенный объем пространства и существует некое

максимальное число молекул, которые могут поместиться в контейнер, то и эту проблему мы сможем без труда решить, взяв контейнер, полный фотонов (частиц света), а не молекула газа. Фотоны можно нагромождать друг на друга бесконечно, и мы сможем уместить в контейнере столько фотонов, сколько нам потребуется. С этой точки зрения ответ вроде бы таков, что в любой конкретный контейнер можно уместить бесконечный (или, по крайней мере, произвольно большой) объем энтропии.

В этой истории, однако, отсутствует критически важный ингредиент: гравитация. Мы вталкиваем в контейнер все больше вещества, и масса содержимого контейнера возрастает.²⁰ В конце концов материю, которую мы засовываем в контейнер, ожидает та же судьба, что и массивную звезду, израсходовавшую свое ядерное топливо: она сколлапсирует под воздействием собственного гравитационного притяжения и превратится в черную дыру. Каждый раз, когда это происходит, энтропия увеличивается — энтропия черной дыры больше, чем энтропия материи, из которой она была сделана (в противном случае второй закон термодинамики не позволил бы черным дырам образовываться).

В отличие от контейнеров с атомами создавать черные дыры одинакового размера, но с разными массами невозможно. Размер черной дыры характеризуется радиусом Шварцшильда, в точности пропорциональным ее массе.²¹ Если вам известна масса, то вы знаете размер; и наоборот, если у вас имеется контейнер фиксированного размера, то вы не сможете запихнуть в него черную дыру тяжелее определенной массы. Но если энтропия черной дыры пропорциональна площади ее горизонта событий, это означает, что *существует максимальный объем энтропии, который может уместиться в области какого-то фиксированного размера, что обеспечивается черной дырой этого размера.*

Это весьма примечательный факт. Он отражает разительное отличие, появляющееся в поведении энтропии, как только влияние гравитации становится существенным. В гипотетическом мире, в котором такой штуки, как гравитация, не существует, мы могли бы втиснуть сколько угодно энтропии в любую заданную область, но в реальном мире гравитация не позволяет нам это сделать.

Значимость этого результата становится очевидной, когда мы обращаемся к больцмановскому пониманию энтропии как (логарифма) числа микросостояний, неразличимых с макроскопической точки зрения. Если существует какой-то конечный максимальный объем энтропии, который может уместиться в области фиксированного размера, значит, данная область допускает лишь конечное число возможных состояний. Это фундаментальное свойство квантовой гравитации, кардинально отличное от свойств теорий, не включающих гравитацию. Посмотрим, куда эта цепочка рассуждений нас приведет.

Голографический принцип

Для того чтобы оценить, насколько серьезный урок преподает нам энтропия черных дыр, необходимо сначала прочувствовать глубину почитаемого многими принципа, который черные дыры со своей энтропией, очевидно, опровергают, — *локальности*. Его основная идея заключается в том, что разные места во Вселенной функционируют более или менее независимо друг от друга. На объект, находящийся в каком-то конкретном месте, может воздействовать его ближайшее окружение, но не то, что находится очень и очень далеко. Предметы, разнесенные на большое расстояние, могут влиять друг на друга косвенным образом, отправляя из одного места в другое какие-то сигналы, например возмущение гравитационного поля или электромагнитную волну (свет). Однако то, что происходит здесь, не оказывает непосредственного влияния на то, что происходит в какой-то другой области Вселенной.

Вспомним снова шахматные доски. На событие, происшедшее в определенный момент времени, влияло событие, происшедшее моментом ранее. Но то, что происходило в определенной точке «пространства» (совокупности клеток в пределах одной строки), никак не было связано с происходящим в любой другой точке пространства в тот же момент времени. В любой конкретной строке у нас могло быть абсолютно любое распределение белых и серых квадратиков. Никаких правил типа «если здесь находится серая клетка, то через двадцать мест направо должна находиться белая» не существовало. Да, по ходу времени клетки «взаимодействовали» друг с другом, но взаимодействие всегда ограничивалось соседними клетками. Схожим образом, в реальном мире объекты сталкиваются друг с другом и воздействуют на другие объекты, находящиеся поблизости, но не где-то далеко. Это локальность.

Локальность приводит к важному следствию для энтропии. Возьмем, как обычно, контейнер с газом и подсчитаем энтропию газа в контейнере. Теперь мысленно поделим контейнер на две части и вычислим энтропию в каждой половине. (Не нужно воображать физический барьер, просто рассматривайте левую и правую половины контейнера по отдельности.) Как связаны между собой полная энтропия контейнера и энтропии двух половин, взятые отдельно?

Ответ таков: энтропию целого контейнера можно получить, просто сложив энтропию одной его половины с энтропией другой его половины. Казалось бы, это непосредственно следует из определения энтропии по Больцману — собственно, поэтому в данном определении и присутствует логарифм. У нас есть определенное количество допустимых микросостояний в одной половине контейнера и определенное количество допустимых микросостояний в другой.

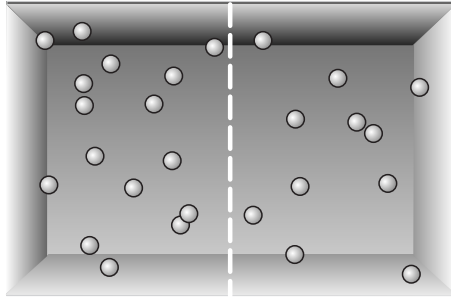


Рис. 12.6. Контейнер с газом, мысленно поделенный на две половины. Полная энтропия содержимого контейнера равна сумме энтропий двух половин содержимого

Общее количество микросостояний рассчитывается так: для каждого возможного микросостояния левой половины мы можем выбрать любое из возможных состояний правой половины. Таким образом, мы получаем общее количество микросостояний путем *умножения* числа микросостояний слева на число микросостояний справа. Но энтропия — это логарифм полученного значения, а логарифм « X умноженного на Y » равен «логарифм X » *плюс* «логарифм Y ».

Итак, энтропия всего контейнера равна простой сумме энтропий двух половин. И это правило будет работать независимо от того, каким образом мы разделим исходный контейнер и на сколько частей; полная энтропия системы всегда равна сумме энтропий подсистем. Это означает, что максимальная возможная для выбранного контейнера энтропия всегда будет пропорциональна его *объему*: чем больше у нас пространства, тем большее значение может принимать энтропия, так что она естественным образом масштабируется с увеличением объема.

Однако обратите внимание на коварное предположение, присутствующее в этом рассуждении: мы подсчитали количество состояний в одной половине контейнера, а затем умножили его на количество состояний в другой половине. Другими словами, предполагалось, что то, что происходило в одной половине контейнера, никак не зависело от происходящего в другой его половине. А это как раз предположение о локальности.

Когда на сцену выходит гравитация, все эти доводы рушатся. Гравитация устанавливает верхний предел на энтропию, которую мы можем впихнуть в контейнер, равный энтропии самой большой черной дыры, способной поместиться в данную тару. Однако энтропия черной дыры не пропорциональна заключенному в ней объему — она пропорциональна *площади* горизонта событий. А площадь может очень сильно отличаться от объема! Если у нас есть

сфера диаметром один метр и мы увеличим ее в размере так, чтобы ее диаметр возрос до двух метров, то внутренний объем сферы возрастет в восемь раз (2^3), тогда как площадь ее поверхности возрастет лишь в четыре раза (2^2).

Вывод прост: квантовая гравитация не подчиняется принципу локальности. В квантовой гравитации происходящее здесь не может быть абсолютно независимым от происходящего там. Максимальное количество вещей, которые могут происходить в какой-то области пространства (число возможных микросостояний в ней), не пропорционально объему этой области; оно пропорционально площади поверхности границы данной области. В реальном мире, который описывает квантовая гравитация, в заданную область получается втиснуть намного меньше информации, чем мы могли бы наивно предполагать, не беря в расчет гравитацию.

Эта догадка получила название *голографического принципа*. Впервые данный принцип был предложен нидерландским ученым, нобелевским лауреатом Герхардом 'т Хоофтом и американским физиком-теоретиком, специалистом в области теории струн Леонардом Сасскиндом, а позднее он был формализован немецко-американским физиком Рафаэлем Буссо (бывшим учеником Стивена Хокинга).²² На первый взгляд голографический принцип может казаться не слишком интересным. Хорошо, число возможных состояний в области пропорционально размеру этой области в квадрате, а не ее размеру в кубе. Но это совсем не тот тип замечаний, которые позволяют привлечь к себе внимание и моментально очаровать незнакомцев на вечеринке.

Вот почему голография важна: этот принцип означает, что пространство— время не фундаментально. Обычно, размышляя о происходящем во Вселенной, мы неявно предполагаем существование чего-то вроде локальности; мы отдельно описываем то, что случилось здесь, и отдельно то, что случилось там, не связывая между собой все возможные положения в пространстве. Голография утверждает, что в принципе так делать нельзя, потому что еле уловимые связи существуют между любыми событиями, происходящими в разных точках пространства, и это здорово ограничивает нашу свободу в описании конфигурации материи в пространстве.

Обычная голограмма создает впечатление объемного изображения за счет отражения света от особой двумерной поверхности. Голографический принцип гласит, что на фундаментальном уровне Вселенная примерно такая же: все, что, по нашему мнению, происходит в трехмерном пространстве, в действительности тайно закодировано на двумерной поверхности, насыщенной информацией. Трехмерное пространство, в котором мы живем и дышим, можно было бы (опять же в принципе) реконструировать, отталкиваясь от намного более

компактного описания. Доступ к этому описанию у нас может быть, а может и отсутствовать. Второй вариант намного более вероятен, но в следующем разделе мы детально рассмотрим пример ситуации, когда эта информация нам доступна.

Возможно, ничто из этого вас не удивляет. Как мы говорили в предыдущей главе, квантовой механике присущ определенный тип нелокальности даже без учета гравитации; состояние Вселенной описывает все частицы скопом, не ссылаясь на каждую конкретную частицу. Таким образом, когда в игру вступает гравитация, вполне естественно предполагать, что состояние Вселенной будет включать все пространство—время сразу. И все же тип нелокальности, подразумеваемый голографическим принципом, отличается от нелокальности квантовой механики как таковой. В квантовой механике можно вообразить такие волновые функции, в которых состояние кошки запутано с состоянием собаки, но точно так же можно вообразить состояния, которые вообще не запутаны между собой, или же состояния, запутанность которых принимает какую-то другую форму. В то же время голографический принцип утверждает, что есть процессы, которые попросту не могут происходить, что информация, необходимая для описания мира, может быть сжата во много раз. Следствия, вытекающие из этой идеи, по сей день до конца не изучены, и можно не сомневаться, что впереди нас ждет еще очень много сюрпризов.

Хокинг сдается

Голографический принцип — очень общая идея; он должен быть частью теории квантовой гравитации, какой бы она ни оказалась, которая в итоге будет признана верной. А нам хотелось бы иметь возможность рассмотреть какой-нибудь конкретный пример, демонстрирующий следствия голографического принципа. Например, мы думаем, что энтропия черной дыры в нашем обычном трехмерном пространстве пропорциональна двумерной площади ее горизонта событий. Значит, в принципе мы могли бы описать все возможные микросостояния этой черной дыры в терминах различных величин, заданных на этой двумерной поверхности. Это цель многих физиков-теоретиков, работающих в области квантовой гравитации, но, к сожалению, пока мы не знаем, как ее достичь.

В 1997 году физик-теоретик Хуан Малдасена, американец аргентинского происхождения, перевернул с ног на голову наше понимание квантовой гравитации, обнаружив явный пример голографии в действии.²³ Он рассматривал гипотетическую Вселенную, совершенно непохожую на нашу: в ней, как ми-

нимум, энергия вакуума была отрицательной (тогда как в нашей она представляется положительной). Поскольку пустое пространство с положительной энергией вакуума называется пространством де Ситтера, пустое пространство с отрицательной энергией вакуума удобно называть «пространством анти-де Ситтера». Кроме того, Малдасена рассматривал пять измерений вместо наших обычных четырех. И наконец, он работал в рамках очень специфической теории гравитации и материи — «супергравитации», представляющей собой суперсимметричную версию общей теории относительности. Суперсимметрия — это гипотетическая симметрия между бозонами (частицами силы) и фермионами (частицами материи), играющая критически важную роль во многих теориях современной физики элементарных частиц; к счастью, подобные детали не так важны для наших текущих целей.

Малдасена обнаружил, что эта теория — супергравитация в пятимерном пространстве анти-де Ситтера — полностью эквивалентна абсолютно другой теории — *четырёхмерной* теории квантового поля, *вообще без гравитационного взаимодействия*. Голография в действии: у всего, что только может произойти в этой конкретной пятимерной теории с гравитацией, есть полный аналог в теории без гравитации и без одного пространственного измерения. Мы говорим, что эти теории «дуальны» по отношению друг к другу, — это означает, что они совершенно не похожи внешне, но описывают одно и то же. Словно у нас есть два разных, но при этом эквивалентных языка, и Малдасена нашел розеттский камень, позволяющий переводить тексты с одного языка на другой и обратно. Между состояниями той частной теории гравитации в пяти измерениях и конкретной негравитирующей теории в четырех измерениях существует взаимно-однозначное соответствие. Зная состояние в одной из них, мы можем перевести его на язык другой, и, подчиняясь уравнениям движения для каждой из рассматриваемых теорий, эти состояния эволюционируют в новые, также соответствующие друг другу согласно тому же словарю (по крайней мере, в принципе; на практике мы можем провести вычисления для простых примеров, но более сложные ситуации пока нам не покоряются). Очевидно, что данное соответствие обязано быть нелокальным; невозможно соотнести отдельные точки в четырехмерном пространстве с точками в пятимерном пространстве. Но можно представить, каким образом состояния в одной теории, определенные в какой-то момент времени, будут соотноситься с состояниями в другой теории.

Если это не убеждает вас, что пространство—время не фундаментально, то даже представить не могу, какие еще доказательства вам требуются. У нас есть явный пример двух разных версий одной и той же теории, описывающих

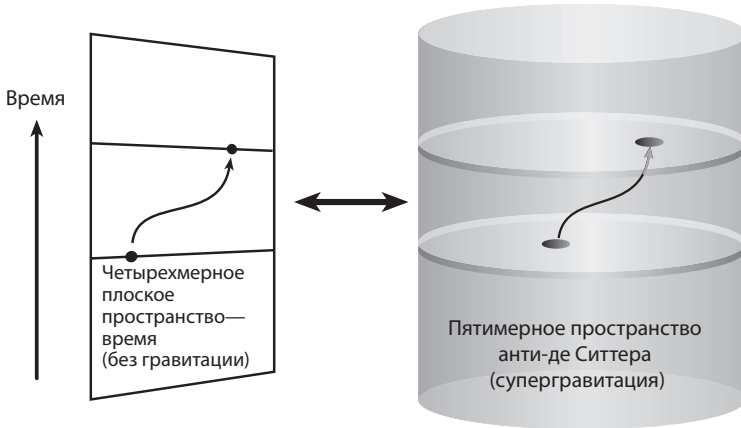


Рис. 12.7. Соответствие Малдасены. Теория гравитации в пятимерном пространстве анти-де Ситтера эквивалентна теории без гравитации в четырехмерном плоском пространстве— времени

пространство— время с разным числом измерений! Ни одна из этих теорий не может считаться «единственно верной»; они полностью эквивалентны друг другу.

Благодаря открытию Малдасены Стивен Хокинг согласился признать свое поражение в споре с Прескиллом и Торном (хотя до этого, по обыкновению, провел все вычисления своим способом, для того чтобы окончательно во всем удостовериться). Вспомните, что главный вопрос заключался в том, уничтожает ли информацию процесс испарения черной дыры (в отличие от эволюции в соответствии с обычными правилами квантовой механики) или же информация, попадающая в черную дыру, каким-то образом уносится хокинговским излучением.

Если Малдасена прав, то мы можем рассмотреть этот вопрос в контексте пятимерного пространства анти-де Ситтера. Это не реальный мир, но детали, отличающие его от реального мира, не связаны с загадкой потери информации; в частности, можно вообразить, что отрицательная космологическая постоянная очень мала и, по сути, не играет никакой роли. Итак, мы создаем черную дыру в пространстве анти-де Ситтера и позволяем ей испаряться. Теряется ли при этом информация? Давайте переведем этот вопрос на язык аналогичной ситуации в четырехмерной теории. В этой теории гравитация отсутствует, и, следовательно, все подчиняется правилам обычной квантовой механики. Однако в четырехмерной негравитационной теории информация попросту не

может теряться, а раз теории эквивалентны, то и в пятимерной теории с гравитацией дела с информацией должны обстоять точно так же. Итак, если мы не упустили какую-то критическую мелочь, информация должна каким-то образом сохраняться в процессе испарения черной дыры.

Это основная причина, почему Хокинг признал поражение в споре и теперь согласен с тем, что черные дыры не разрушают информацию. Но вы видите, что это доказательство, хотя и кажется довольно основательным, все же является косвенным. В частности, оно не предоставляет никакого конкретного физического понимания того, каким образом информация попадает в хокинговское излучение. Очевидно, что это как-то происходит, но каков конкретный механизм — пока неясно. Вот почему Торн со своим проигрышем в споре не согласился, а Прескилл неохотно принял причитающуюся ему энциклопедию. Независимо от того, соглашаемся мы с утверждением о сохранении информации или нет, ясно одно: ученым еще предстоит серьезно поработать, чтобы выяснить, что же именно происходит при испарении черной дыры.

Сюрприз из теории струн

В истории с энтропией черной дыры есть одна глава, напрямую не связанная со стрелой времени, но настолько занимательная, что я просто не могу обойти ее стороной. Мы очень кратко познакомимся с ней — она посвящена природе микросостояний черной дыры в теории струн.

Величайшим триумфом Больцмановской теории энтропии было то, что она оказалась в состоянии объяснить измеримую макроскопическую величину — энтропию — в терминах микроскопических составляющих. Больше всего Больцман интересовался примерами, составными элементами в которых были атомы газа в контейнере или молекулы двух жидкостей, которые мы смешиваем. Но нам хотелось бы думать, что его догадки носят гораздо более общий характер; формула $S = k \lg W$, в соответствии с которой энтропия S пропорциональна логарифму числа перетасовок микросостояний W , должна быть истинна для любых систем. Вопрос только в том, чтобы понять, о каких микросостояниях идет речь и сколько всего существует способов их перетасовать. Другими словами, что есть «атомы» заданной системы?

Судя по всему, из формулы энтропии черной дыры, предложенной Хокингом, следует, что каждой конкретной макроскопической черной дыре соответствует очень большое количество микросостояний. Каковы эти микросостояния? В классической общей теории относительности их природа не очевидна. В конечном итоге это должны быть состояния квантовой гравитации.

Однако здесь нас поджидают как хорошие новости, так и плохие. Плохие новости: мы не настолько хорошо понимаем квантовую гравитацию в реальном мире, поэтому попросту не можем перечислить все возможные микросостояния, соответствующие макроскопической черной дыре. Хорошие же новости заключаются в том, что мы можем использовать формулу Хокинга в качестве подсказки для проверки наших идей о том, как квантовая гравитация могла бы работать. Несмотря на убеждение физиков, что однажды найдется способ примирить гравитацию с квантовой механикой, очень трудно получить непосредственные экспериментальные данные для подобных задач — просто потому, что гравитация представляет собой чрезвычайно слабое взаимодействие. Поэтому любая подсказка, попадающаяся нам на пути, невероятно значима.

Главный кандидат на роль непротиворечивой теории гравитации — это *теория струн*. Идея, лежащая в ее основе, очень проста: согласно данной теории, элементарные составляющие материи — это не точечные частицы. Вместо них следует представлять себе одномерные кусочки «струны» (вы не должны спрашивать, из чего сделаны эти струны; ничего более фундаментального в их составе нет). Возможно, вам эта идея совершенно не кажется перспективной — ну хорошо, у нас струны вместо частиц, и что?

В теории струн весьма интересно то, что она накладывает массу ограничений. На основе идеи об элементарных частицах можно выстроить множество самых разных теорий, но выясняется, что непротиворечивых квантово-механических теорий струн очень мало; на самом деле пока мы полагаем, что она существует всего одна. И эта единственная теория неизбежно привносит определенные ингредиенты: дополнительные измерения пространства, и суперсимметрию, и многомерные браны (объекты, похожие на струны, но обладающие двумя или большим числом измерений). А самое важное то, что эта теория подразумевает существование гравитации. Теория струн первоначально предлагалась как теория ядерных сил, но это не принесло особых результатов, причем по довольно необычной причине — данная теория постоянно предсказывала существование силы, подобной гравитации! Так что ученые-теоретики решили взять этот лимон и приготовить лимонад, начав рассматривать теорию струн как теорию квантовой гравитации.²⁴

Если теория струн — это верная теория квантовой гравитации (мы пока что не можем говорить с уверенностью, но определенные многообещающие признаки уже имеются), то она должна обеспечивать на микроскопическом уровне понимание того, откуда берется энтропия Бекенштейна—Хокинга. Что примечательно, она это делает, по крайней мере для определенных очень специальных типов черных дыр.

Прорыв был совершен в 1996 году Эндрю Строминджером и Камраном Вафа, исследования которых были основаны на более ранних работах Леонарда Сасскинда и Ашока Сена.²⁵ Как и Малдасена, они рассматривали пятимерное пространство — время, но у них не было отрицательной энергии вакуума, и они не фокусировались исключительно на голографии. Вместо этого они решили воспользоваться интересным свойством теории струн — возможностью «подстраивать» силу гравитации. В нашем мире гравитационные силы определяются гравитационной постоянной Ньютона, которая обозначается G . Но в теории струн сила гравитации превращается в переменную — она может меняться от места к месту и от момента к моменту. В гибком и экономически эффективном мире мысленных экспериментов можно вообще взять и рассмотреть определенную конфигурацию вещества с «выключенной» гравитацией (задав G равной нулю), а затем взглянуть на ту же конфигурацию, но уже после того, как гравитация была «включена» (задано очень большое значение G , такое, что гравитация стала играть важную роль).

Итак, Строминджер и Вафа рассматривали конфигурацию струн и бран в пяти измерениях, тщательно подобранную так, чтобы ее можно было изучать как с учетом гравитации, так и без нее. Когда гравитация была включена, выбранная ими конфигурация выглядела как черная дыра, и они знали, что значение энтропии для нее диктовалось формулой Хокинга. Однако когда гравитация была выключена, все это превращалось в эквивалент контейнера с газом, каким он может быть в теории струн. В этом случае ученые могли вычислять значение энтропии довольно традиционными способами (хотя и не без помощи серьезного математического аппарата, приличествующего всем этим струнным вопросам, которые они рассматривали).

Какой же ответ они получили? Энтропии согласованны. Как минимум в этом конкретном примере черную дыру можно плавно превратить в относительно обычный объем вещества, для которого мы точно знаем, как выглядит пространство микросостояний, и энтропия из формулы Больцмана будет совпадать с энтропией из формулы Хокинга с точностью до численного коэффициента.

У нас нет абсолютно общего понимания пространства состояний в квантовой гравитации, поэтому, что касается энтропии, впереди нас ждет еще очень много загадок. Но в конкретном случае, рассмотренном Строминджером и Вафой (и различных схожих ситуациях, изученных впоследствии), пространство состояний, предсказываемое теорией струн, в точности совпадает с ожиданиями из расчетов Хокинга, выполненных в квантовой теории поля в искривленном пространстве — времени.²⁶ Это дает надежду на то, что последующие исследования в этом направлении помогут нам разобраться

и в других загадочных свойствах квантовой гравитации, в том числе позволяя узнать, что произошло в момент Большого взрыва.

Примечания

- ¹ *Bekenstein, J. D.* Black Holes and Entropy // *Physical Review*, 1973, D 7, p. 2333–2346.
- ² *Hawking, S. W.* A Brief History of Time: From the Big Bang to Black Holes. New York: Bantam, 1988, 104 p. Или, словами Денниса Овербая: «В Кембридже гипотезу Бекенштейна подняли на смех. Хокинг был разгневан. Он был уверен, что все это чушь». (*Overbye, D.* Lonely Hearts of the Cosmos. New York: HarperCollins, 1991.)
- ³ По поводу свойств черных дыр звездной массы см. работу *Casares, J.* Observational Evidence for Stellar-Mass Black Holes. Black Holes from Stars to Galaxies—Across the Range of Masses / V. Karas & G. Matt (eds.) / Proc. IAU Symposium #238, p. 3–12. Cambridge: Cambridge University Press, 2007; по поводу сверхмассивных черных дыр в других галактиках см. работу *Kormendy, J., Richstone, D.* Inward Bound — The Search for Supermassive Black Holes in Galactic Nuclei // *Annual Review of Astronomy and Astrophysics*, 1995, 33, p. 581. Черная дыра в центре нашей галактики с источником радиоизлучения известна под названием «объект Стрелец A*»; см. работу *Reid, M. J.* Is There a Supermassive Black Hole at the Center of the Milky Way? (2008). <http://arxiv.org/abs/0808.2624>.
- ⁴ Согласен, для некоторых было бы еще интереснее на них посмотреть.
- ⁵ На самом деле намного больше. По состоянию на январь 2009 года, ссылки на оригинальную работу Хокинга (*Hawking, S. W.* Particle Creation by Black Holes // *Communications in Mathematical Physics*, 1975, 43, p. 199–220; список ошибок и опечаток: там же, 1976, 46, p. 206) содержались в более чем 3000 других научных работ.
- ⁶ Пока что нам еще не удавалось засечь непосредственно сами гравитационные волны, хотя косвенных свидетельств их существования (предполагается, что это следует из потери энергии системой, состоящей из двух нейтронных звезд, известной как «двойной пульсар») Джозефу Тейлору и Расселу Халсу оказалось достаточно, для того чтобы в 1993 году получить Нобелевскую премию. Прямо сейчас несколько гравитационно-волновых обсерваторий работают над прямым обнаружением таких волн, возможно, порожденных слиянием двух черных дыр.
- ⁷ Площадь горизонта событий пропорциональна квадрату массы черной дыры; действительно, если площадь равна A , а масса равна M , то $A = 16\pi G^2 M^2 / c^4$, где G — гравитационная постоянная Ньютона, а c — скорость света.
- ⁸ Аналогия между механикой черных дыр и термодинамикой подробно разобрана в работе *Bardeen, J. M., Carter, B., Hawking, S. W.* The Four Laws of Black Hole Mechanics // *Communications in Mathematical Physics*, 1973, 31, p. 161–70.
- ⁹ Один из способов понять, почему поверхностная гравитация не бесконечна, — серьезно отнестись к замечанию «с точки зрения наблюдателя, находящегося очень далеко». Прямо рядом с черной дырой сила очень велика, но если измерять ее с бесконечно далекого расстояния, она подвергается гравитационному красному смещению, в точности так, как любой убегающий фотон. Сила бесконечно велика, но с точки зрения удаленного наблюдателя красное смещение также бесконечно, и комбинация этих двух эффектов дает конечное значение поверхностной гравитации.

- ¹⁰ Точнее, Бекенштейн предположил, что энтропия пропорциональна площади горизонта событий. Позднее Хокинг определил коэффициент пропорциональности.
- ¹¹ *Hawking, S. W. A Brief History of Time: From the Big Bang to Black Holes.* New York: Bantam, 1988, p. 104–105.
- ¹² Возможно, вы задаетесь вопросом, почему в качестве примеров для обсуждения мы всегда выбираем электромагнитное и гравитационное поля, но не поле электронов или кварковое поле. Причина кроется в различиях между фермионами и бозонами. Фермионы, такие как электроны и кварки, — это частицы материи, отличительным качеством которых является то, что они не могут нагромождаться друг на друга. Бозоны, например фотоны и гравитоны, — это частицы силы, способные скапливаться в любых количествах. Когда мы наблюдаем классическое макроскопическое поле, в действительности мы видим совокупность огромного количества бозонов. Фермионы, такие как электроны и кварки, просто не в состоянии образовывать подобные скопления, поэтому вибрации их полей проявляют себя исключительно в виде индивидуальных частиц.
- ¹³ *Overbye, D. Lonely Hearts of the Cosmos.* New York: HarperCollins, 1991. 109 p.
- ¹⁴ Для справки, планковская длина равна $(\hbar/c^3)^{1/2}$, где G — гравитационная постоянная Ньютона, \hbar — постоянная Планка из квантовой механики, а c — скорость света. (Мы принимаем постоянную Больцмана равной единице.) Таким образом, энтропия может быть выражена как $S = (c^3/4\hbar G)A$. Площадь горизонта событий связана с массой M черной дыры через равенство $A = 8\pi G^2 M^2$. Собрав все это вместе, находим, что энтропия выражается через массу следующим образом: $S = (4\pi G c^3/\hbar)M^2$.
- ¹⁵ Все частицы и античастицы — «частицы», если можно так выразиться. Иногда термин «частица» используют специально, для того чтобы подчеркнуть отличие *частицы* от *античастицы*, но чаще всего этим словом называют любые точечные элементарные объекты. Никто не подвергнет вас критике, если вы скажете, что позитрон — это частица, а электрон — его античастица.
- ¹⁶ Обратите внимание на это уточнение: «известной нам». Космологи допускают возможность того, что какой-то неизвестный процесс, возможно, в самом начале существования Вселенной, мог создать большое количество очень маленьких черных дыр, может быть, даже связанных с темной материей. Если эти черные дыры достаточно мелкие, они не могут быть такими уж черными; они должны испускать все больше и больше хоккингского излучения, а финальные взрывы должны быть достаточно заметными, чтобы мы могли обнаруживать их.
- ¹⁷ Существует интересная умозрительная идея о том, что мы могли бы *создать* черную дыру в ускорителе частиц, а затем наблюдать, как она распадается, испуская хоккингское излучение. При обычных обстоятельствах этот план был бы безнадежно нереалистичным; гравитация — невероятно слабое взаимодействие, и мы никогда не смогли бы построить достаточно мощный ускоритель частиц, чтобы сделать хотя бы микроскопическую черную дыру. Однако некоторые современные сценарии, включающие скрытые измерения пространства—времени, предполагают, что гравитация становится намного сильнее, чем обычно, на коротких расстояниях (см. *Randall, L. Warped Passages: Unraveling the Mysteries of the Universe's Hidden Dimensions.* New York: HarperCollins, 2005). В этом случае перспектива создания и наблюдения маленькой черной дыры переходит из категории безумных в категорию еще умозрительных, но уже не совершенно безумных. Уверен, Хокинг надеется, что однажды это произойдет.

К сожалению, за идею рождения микроскопических черных дыр ухватилась группа паникеров, распространяющих ужасающие предсказания, согласно которым Большой адронный коллайдер, новый ускоритель частиц в лаборатории института CERN в Женеве, неизбежно уничтожит мир. Даже если шансы такого исхода невелики, уничтожение мира — довольно неприятная штука, поэтому надо быть осторожнее, не так ли? Но тщательное исследование всех возможных вариантов развития событий (*Ellis, J., Giudice, G., Mangano, M. L., Tkachev, I., Wiedemann, U. Review of the Safety of LHC Collisions // Journal of Physics*, 2008, G 35, 115004) показало, что БАК не в состоянии сделать ничего такого, что бы уже не происходило множество раз в разных уголках Вселенной; если катастрофа и планируется, то мы должны видеть признаки этого в других астрофизических объектах. Конечно же, всегда есть вероятность того, что все люди, участвующие в этих исследованиях, делают непреднамеренные математические ошибки того или иного сорта. Но возможно всякое. Не исключено, что в следующий раз, открыв банку томатной пасты, вы выпустите на волю мутировавший патогенный микроорганизм, который сотрет жизнь с лица Земли. Не исключено, что за нами наблюдает оценивающим взором раса суперразвитых инопланетных существ, способных разозлиться и разрушить Землю в наказание за то, что мы смирились с необоснованными судебными исками и не включаем БАК. Когда вероятности становятся такими крошечными, как те, о которых мы сейчас ведем речь, можно решиться на рискованный шаг и взять на себя ответственность за собственные жизни.

¹⁸ Идея глубже копнуть в этом направлении может показаться довольно многообещающей — возможно, информация копируется и поэтому одновременно содержится и в книге, падающей в сингулярность, и в излучении, покидающем черную дыру? Однако в квантовой механике был получен результат (известный под названием теоремы о запрете клонирования), согласно которому этого не может быть. Информация не только не уничтожается, она также не может дублироваться.

¹⁹ Прескилл рассказывает историю заключенных им пари на своем веб-сайте: <http://www.theory.caltech.edu/people/preskill/bets.html>. Более глубокое объяснение парадокса о потере информации в черных дырах вы найдете в работе *Susskind, L. The Black Hole War: My Battle with Stephen Hawking to Make the World Safe for Quantum Mechanics*. New York: Little, Brown, 2008.

²⁰ Возможно, вы подумали, что это ограничение можно обойти, снова призвав на помощь фотоны, ведь фотоны — это частицы с нулевой массой. Однако у фотона есть энергия, и энергия его тем больше, чем меньше его длина волны. Поскольку мы имеем дело с контейнером определенного фиксированного размера, у каждого содержащегося там фотона есть минимальная допустимая энергия; в противном случае он просто не сможет находиться внутри. А энергия всех фотонов посредством чуда $E = mc^2$ вносит свой вклад в массу контейнера. (Ни один фотон не обладает массой, но у контейнера с фотонами масса есть, и она определяется как сумма энергий всех фотонов, деленная на квадрат скорости света.)

²¹ Площадь поверхности сферы равна произведению 4π на квадрат ее радиуса. Площадь горизонта событий черной дыры вполне предсказуемо равна произведению 4π на квадрат радиуса Шварцшильда. В действительности это и есть определение радиуса Шварцшильда, так как сильно искривленное пространство — время внутри черной дыры не позволяет дать разумное определение расстояния от сингулярности до горизонта (вспомните, это расстояние во времени!). Таким образом, площадь горизонта событий пропорциональна

квадрату массы черной дыры. Все это относится к черным дырам с нулевым угловым моментом и отсутствием электрического заряда; если дыра вращается или заряжена, формулы становятся немного сложнее.

²² Голографический принцип обсуждается в книге *Susskind, L. The Black Hole War: My Battle with Stephen Hawking to Make the World Safe for Quantum Mechanics*. New York: Little, Brown, 2008; технические детали вы найдете в работе *Bousso, R. The Holographic Principle // Reviews of Modern Physics, 2002, 74, p. 825–874*.

²³ *Maldacena, J. M. The Large N Limit of Superconformal Field Theories and Supergravity // Advances in Theoretical and Mathematical Physics, 1998, 2, p. 231–252*. Название статьи Малдасены «Предел большого N в теориях суперконформного поля и супергравитации» не передает и доли восторга, порождаемого этим результатом. Когда Хуан в 1997 году приехал в Санта-Барбару для проведения семинара, я остался в офисе и продолжал работать, совершенно не заинтригованный названием. Если бы доклад был озаглавлен «Эквивалентность пятимерной теории с гравитацией и четырехмерной теории без гравитации», я бы, вероятно, нашел время, чтобы посетить семинар. Позднее стало понятно, что я пропустил нечто совершенно грандиозное — такие оживленные разговоры звучали после доклада в коридорах, так взволнованно, словно в испугании, орудовали мелом ученые, покрывая формулами доски.

²⁴ В теории струн хорошо то, что она выглядит уникальной; плохо же то, что у нее, похоже, много разных фаз, которые сами по себе кажутся совершенно разными теориями. Так же как вода в зависимости от обстоятельств может принимать форму льда, жидкости или пара, в теории струн само пространство—время может пребывать во множестве разных фаз с разными типами частиц и даже с разным числом различных измерений пространства. И когда мы говорим «множество», это не шутка — ученые называют такие значения, как 10^{500} разных фаз, и с большой вероятностью их число может быть вовсе бесконечным. Таким образом, теоретическая уникальность теории струн не сильно помогает в практическом понимании частиц и взаимодействий, существующих в нашем конкретном мире. Обзор теории струн см. в работах *Greene, B. The Elegant Universe: Superstrings, Hidden Dimensions, and the Quest for the Ultimate Theory*. New York: Vintage, 2000; *Musser, G. The Complete Idiot's Guide to String Theory*. New York: Alpha Books, 2008. Обсуждение (на оптимистической ноте) проблемы множества разных фаз вы найдете в работе *Susskind, L. The Cosmic Landscape: String Theory and the Illusion of Intelligent Design*. New York: Little, Brown, 2006.

²⁵ *Strominger, A., Vafa, C. Microscopic Origin of the Bekenstein—Hawking Entropy // Physics Letters, 1996, B 379, p. 99–104*. Объяснение на популярном уровне см. в книге *Susskind, L. The Black Hole War: My Battle with Stephen Hawking to Make the World Safe for Quantum Mechanics*. New York: Little, Brown, 2008.

²⁶ Хотя работа Строминджера—Вафы подразумевает, что пространство состояний черной дыры в теории струн обладает подходящим размером, чтобы дать объяснение энтропии, в ней не говорится в точности, как эти состояния должны выглядеть при включенной гравитации. Самир Матур и его коллеги предположили, что это должны быть «пушистые клубки» (*fuzzball*) — конфигурации осциллирующих струн, заполняющие объем черной дыры внутри горизонта событий (*Mathur, S. D. The Fuzzball Proposal for Black Holes: An Elementary Review // Fortschritte der Physik, 2005, 53, S. 793–827*).

Глава 13

Жизнь Вселенной

Время — великий учитель. Жаль только, что оно убивает своих учеников.

Тектор Берлиоз

Как *должна* выглядеть Вселенная?

Наверное, это не самый осмысленный вопрос. Вселенная — сущность уникальная; по самой своей природе она не похожа ни на какие другие вещи, обычно занимающие наши мысли и существующие *во* Вселенной. Объекты в пределах Вселенной объединяются в группы, имеющие общие свойства. Наблюдая за этими свойствами, мы получаем представление о том, чего можно ожидать от объектов. Согласно нашим ожиданиям, у всех кошек должно быть по четыре лапы, мороженое должно быть сладким, а сверхмассивные черные дыры должны скрываться в центре спиральных галактик. Однако никакие подобные ожидания не могут быть абсолютными; мы говорим о тенденциях, а не о законах природы. Тем не менее наш опыт учит, что определенные типы вещей обычно обладают определенными свойствами, поэтому в возникающих периодически необычных обстоятельствах, когда наши ожидания не оправдываются, мы совершенно естественно начинаем искать объяснение. Увидев кошку на трех лапах, мы задаемся вопросом, что случилось с ее четвертой лапой.

Вселенная не такая. Она сама по себе, а не представитель какого-то более крупного класса. (Другие Вселенные также могут существовать, по крайней мере в контексте подходящего определения понятия «Вселенная», но мы абсолютно точно не можем наблюдать ни одной помимо нашей собственной.) Это означает, что мы не можем применить индуктивные, эмпирические рассуждения такого типа — «рассматривая множество примеров чего-то, идентифицировать общие свойства», — чтобы проверить свои ожидания относительно того, какой должна быть Вселенная.¹

Тем не менее ученые постоянно делают заявления о том, что определенные свойства Вселенной все же могут считаться «естественными». К примеру, далее я собираюсь предположить, что низкая энтропия ранней Вселенной — удивительное явление, и приведу аргументы, что это явление должно объясняться основополагающими глубинными причинами. Когда мы замечаем, что неразбитое яйцо обладает низкоэнтропийной по сравнению с омлетом конфигурацией, то объяснение этому находится моментально: яйцо — это не зам-

кнутая система. Его снесла курица, которая, в свою очередь, является частью экосистемы Земли, которая, как мы знаем, входит в состав Вселенной с низкоэнтропийным прошлым. В то же время Вселенная, по крайней мере на первый взгляд, кажется замкнутой системой, — продолжая аналогию, она не была снесена никакой Вселенской Курицей. Истинно замкнутая физическая система с очень низкой энтропией — поразительное явление, предполагающее, что мы не видим всей картины.²

Правильное отношение к любому кажущемуся нам удивительным свойству наблюдаемой Вселенной, такому как низкая энтропия в начале времен или низкая энергия вакуума, заключается в том, чтобы рассматривать его как потенциальный ключ к более глубокому пониманию того, как все устроено. Подобные наблюдения далеко не так безусловны, как явное экспериментальное расхождение с вашей любимой теорией; это всего лишь намеки. В глубине души мы уверены, что если бы конфигурация Вселенной выбиралась случайным образом из всех возможных, то это было бы очень высокоэнтропийное состояние. Однако в реальности это не так, а значит, состояние Вселенной — это не следствие случайного выбора. Так как же был сделан выбор? Существует ли какой-то процесс, какая-то динамическая цепочка событий, неизбежно приводящих к кажущейся не случайной конфигурации нашей Вселенной?

Наши горячие, однородные первые дни

Если думать о Вселенной как о физической системе случайным образом выбранной конфигурации, то ответ на вопрос «Как должна выглядеть Вселенная?» будет следующим: «Она должна находиться в высокоэнтропийном состоянии». Таким образом, нам необходимо понять, как выглядит высокоэнтропийное состояние Вселенной.

Даже такая формулировка вопроса не совсем верна. В действительности нас не интересует конкретное состояние Вселенной прямо сейчас, в этот момент. В конце концов, оно было другим вчера, а завтра снова изменится. Нам интересна *история* Вселенной, ее эволюция с течением времени. Но для понимания того, что такое естественная история, нам необходимо знать что-то о пространстве состояний, в том числе о том, на что похожи высокоэнтропийные состояния.

Космологи традиционно обходят этот вопрос стороной, и этому есть две причины. Первая заключается в том, что расширение Вселенной из горячего, плотного начального состояния — это такой неоспоримый *факт*, что, привыкнув к данной идее, вы начинаете испытывать трудности с тем, чтобы вообразить другие альтернативы. Своей задачей как космолога-теоретика вы

начинаете считать поиск объяснения, почему Вселенная родилась именно в этом конкретном горячем и плотном состоянии, а не в каком-то другом горячем и плотном состоянии. Это временной шовинизм — самый опасный тип шовинизма. Вы бездумно подменяете вопрос «Почему Вселенная эволюционирует именно так, как она эволюционирует?» вопросом «Почему исходное состояние Вселенной было именно таким, каким оно было?».

Вторая причина, не позволяющая эффективно изучать пространство состояний Вселенной, — это неизбежное влияние гравитации. Под «гравитацией» мы подразумеваем все относящееся к общей теории относительности и к искривленному пространству—времени: как повседневные явления, такие как падающие яблоки и планеты, вращающиеся вокруг звезд, так и черные дыры и расширение Вселенной. В предыдущей главе мы детально рассмотрели один пример, а именно черную дыру — объект с сильным гравитационным полем и известной, как нам кажется, энтропией. На первый взгляд он не кажется хорошей подмогой в попытках разобраться со всей Вселенной, которая на черную дыру совсем не похожа. Скорее, она напоминает *белую дыру* (так как в прошлом у нее существует сингулярность), но даже это слабо нам помогает, поскольку мы находимся внутри Вселенной, а не снаружи. Определенно, гравитация играет важную роль во Вселенной, и это особенно верно для периода ее зарождения, когда пространство расширялось очень быстро. Однако понимание важности проблемы не всегда помогает в ее решении, поэтому большинство людей просто отбрасывают любые мысли о ней.

Существует и другая стратегия, с первого взгляда кажущаяся невинной, но потенциально скрывающая внутри себя грандиозную ошибку. Суть ее в том, чтобы просто-напросто отделить гравитацию от всего остального и вычислять энтропию материи и излучения внутри пространства—времени, отбрасывая энтропию самого пространства—времени. Разумеется, трудно быть космологом и игнорировать тот факт, что пространство расширяется; тем не менее расширение можно принимать как данность и попросту рассматривать состояние «вещества» (частиц обычной материи, темной материи, излучения) на этом фоне. Расширяясь, Вселенная разреживает материю и остужает излучение — словно частицы содержатся в камере с поршнем, который мы постепенно вытягиваем, обеспечивая им больше пространства для существования. Согласившись с такой картиной, энтропию вещества на таком фоне можно вычислить точно так же, как энтропию набора молекул в камере с движущимся наружу поршнем.

В любой момент ранняя Вселенная содержит газ частиц при практически постоянной температуре и практически постоянной плотности, которые не зависят от выбранной точки пространства. Другими словами, ее конфигурация

очень похожа на термодинамическое равновесие. Конечно, это не идеальное состояние равновесия, в котором ничего не меняется: в расширяющейся Вселенной все охлаждается и разреживается. Но по сравнению с частотой столкновения частиц расширение пространства происходит относительно медленно, поэтому охлаждение происходит плавно. Если мы рассмотрим только материю и излучение ранней Вселенной, отбросив любое влияние гравитации за исключением общего расширения, то увидим последовательность конфигураций, очень близких к тепловому равновесию, но с постепенно уменьшающейся плотностью и температурой.³

Однако это, разумеется, ужасающе неполная история. Второе начало термодинамики гласит: «Энтропия замкнутой системы либо увеличивается, либо остается постоянной»; оно не утверждает: «Энтропия замкнутой системы, если не учитывать гравитацию, либо возрастает, либо остается постоянной». Ничто в законах физики не позволяет нам игнорировать гравитацию в случаях, когда она важна, — а в космологии она имеет первостепенное значение.

Отбрасывая воздействие, которое гравитация оказывает на энтропию, и принимая во внимание исключительно материю и излучение, мы приходим к полным абсурда выводам. Материя и излучение ранней Вселенной были близки к тепловому равновесию, что означает (если пренебречь гравитацией), что это было состояние Вселенной с максимальной энтропией. Но сегодня, в поздней Вселенной, мы совершенно очевидно не находимся в термодинамическом равновесии (если бы это было так, то нас не окружало бы ничего, кроме газа при постоянной температуре), то есть не может быть сомнений, что окружающая нас конфигурация — это не конфигурация с максимальной энтропией. Однако энтропия не могла уменьшиться, ведь это было бы нарушением второго закона термодинамики. Что же происходит?

А происходит вот что: игнорировать гравитацию неправильно. К сожалению, учесть ее во всех расчетах совсем не так просто; к тому же мы до сих пор очень многого не знаем о поведении энтропии при условии гравитационного взаимодействия. Тем не менее, как мы увидим далее, нам известно достаточно, чтобы не только сдвинуться с мертвой точки в исследованиях, но и добиться значительного успеха.

Что мы подразумеваем под «нашей Вселенной»

До сих пор мы по большей части ходили проторенными дорожками: либо знакомились с утверждениями, с которыми согласны все работающие физики, либо объясняли вещи, которые не могут не быть истинными и которые *должны*

быть признаны верными всеми работающими физиками. В тех исключительных случаях, когда мы сталкивались с подлинно противоречивыми ситуациями (например, относительно интерпретаций квантовой механики), я старался четко обозначить этот факт. Но далее в этой книге мы начнем все глубже погружаться в мир умозрительных и даже еретических идей; у меня есть любимая точка зрения по определенным вопросам, и все же это не общепринятое мнение. Я буду прилагать усилия для того, чтобы продолжать проводить черту между несомненно истинными утверждениями и недоказанными пока гипотезами, но важно помнить о том, что в подобных делах всегда необходимо соблюдать максимальную осторожность.

Во-первых, мы должны определиться, что же именно мы имеем в виду, говоря «наша Вселенная». Мы не в состоянии увидеть всю Вселенную; свет распространяется с конечной скоростью, и существует барьер, за который нам не заглянуть, — определяемый, в принципе, Большим взрывом, а на практике — моментом, когда Вселенная стала прозрачной (примерно через 380 000 лет после Большого взрыва). Вселенная, если рассматривать ее на больших масштабах, в пределах той части, которую мы видим, однородна; везде она выглядит практически одинаково. Конечно же, сразу возникает соблазн взять то, что мы видим, и бесстыдно экстраполировать на те части, которые от нашего взора скрыты, вообразив, таким образом, что Вселенная однородна везде — либо во всем объеме конечного размера, если она «замкнута», либо в бесконечно большом объеме, если «открыта».

Однако нет никаких основательных причин полагать, что та Вселенная, которую мы не видим, идентична той, которую мы наблюдаем. Это может быть простым первоначальным предположением, но ничем более. Мы должны допускать возможность того, что Вселенная выглядит совершенно иначе за пределами той части, которая открыта нашему взору (даже если невидимая часть поначалу выглядит однородной, а отличия появляются лишь где-то далеко).

Так что давайте позабудем о недоступной нам Вселенной и сконцентрируемся на той части, которую мы с вами видим, — мы называем ее «наблюдаемой Вселенной». Она окружает нас, растянувшись на 40 миллиардов световых лет.⁴ Вселенная расширяется — это означает, что материя, содержащаяся внутри наблюдаемой Вселенной, раньше была упакована в область меньшего размера. Возведем что-то вроде воображаемого забора вокруг вещества в нашей наблюдаемой в данный момент Вселенной и начнем отслеживать все находящееся внутри забора, позволяя самому забору по мере расширения Вселенной растягиваться (и допуская, что в прошлом он был меньше). То, на что мы

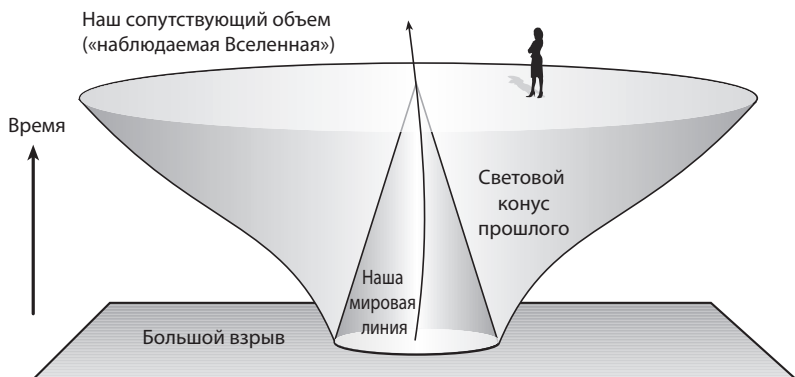


Рис. 13.1. То, что мы называем «наблюдаемой Вселенной», — это объем пространства, «сопутствующий» расширению Вселенной, то есть расширяющийся вместе с ней. Мы отслеживаем свои световые конусы назад до самого Большого взрыва, для того чтобы определить, какая часть Вселенной поддается нашему наблюдению, и позволяем этому объему расти одновременно с расширением Вселенной

смотрим, называется *сопутствующим объемом* пространства, и это именно то, что мы имеем в виду, когда говорим о «нашей наблюдаемой Вселенной».

Наш сопутствующий объем пространства, строго говоря, не является замкнутой системой. Если посадить наблюдателя на воображаемый забор, то он будет замечать разнообразные частицы, прилетающие на наш участок и улетающие с него. Однако в среднем внутрь и наружу будет проходить одно и то же число однотипных частиц, и в совокупности они будут практически неразличимы. (Постоянство космического микроволнового фона убеждает нас, что Вселенная остается однородной и за пределами нашего сопутствующего объема, пусть мы и не знаем, как далеко это единообразие простирается.) Таким образом, с практической точки зрения вполне допустимо считать наш сопутствующий объем замкнутой системой. В действительности он не замкнут, но эволюционирует по сценарию замкнутой системы: никакого важного влияния снаружи, сказывающегося на том, что происходит внутри, не наблюдается.

Сохранение информации в расширяющемся пространстве — времени

Если наш сопутствующий объем соответствует приблизительно замкнутой системе, то на следующем шаге мы должны подумать о его пространстве состояний. Общая теория относительности утверждает, что само пространство —

сцена, на которой происходит движение и взаимодействие частиц, — с течением времени эволюционирует. Из-за этого определение пространства состояний становится более изощренной задачей, чем можно было бы представить в фиксированном пространстве—времени. Большинство физиков соглашались с тем, что в ходе эволюции Вселенной информация сохраняется, но как это работает в космологическом контексте, пока непонятно. Главная проблема заключается в том, что по мере расширения Вселенной в нее помещается все больше и больше вещества, поэтому — пусть это наивно — создается впечатление, что пространство состояний также должно расти. Это вопиющее противоречие, никак не согласующееся с обычными правилами обратимой, сохраняющей информацию физики, где пространство состояний зафиксировано раз и навсегда.

Для того чтобы разрешить это противоречие, начать нужно с наилучшим из имеющихся на данный момент описанием фундаментальной природы материи, которое предоставляет нам квантовая теория поля. Поля вибрируют самыми разными способами, а мы воспринимаем вибрацию как частицы. Поэтому когда мы спрашиваем: «Каково пространство состояний в этой конкретной теории поля?», в действительности нам необходимо перечислить все возможные способы вибрации полей в этой теории.

Любую возможную вибрацию квантового поля можно считать суммой вибраций с разными фиксированными длинами волн — так же, как любой конкретный звук можно разложить на комбинацию нескольких нот с определенными частотами. Вы можете подумать, что допустимы волны с любыми возможными длинами, но в действительности существуют ограничения. Планковская длина (крохотное расстояние, равное 10^{-33} сантиметра), при которой важную роль начинает играть квантовая гравитация, задает *нижний предел* допустимой длины волны. При расстояниях, меньших, чем это, пространство—время само по себе теряет привычное значение, а энергия волны (которая тем больше, чем меньше длина волны) становится такой большой, что волна попросту коллапсирует в черную дыру.

Аналогично, существует и *верхний предел* допустимой длины волны, который определяется размером сопутствующего объема. Дело не в том, что вибрации с большими длинами волн не могут существовать — просто они не имеют никакого значения. Если длина волны превышает размер нашего объема, то, по сути, ее можно смело считать эффективно постоянной во всей наблюдаемой Вселенной.

Таким образом, кажется логичным сделать вывод о том, что «пространство состояний наблюдаемой Вселенной» состоит из «вибраций во всех возможных

квантовых полях при условии, что соответствующая длина волны больше планковской длины и меньше размера нашего сопутствующего объема». Однако проблема в том, что это пространство состояний по мере расширения Вселенной изменяется. Наш объем со временем увеличивается, а планковская длина остается постоянной. В самые ранние времена Вселенная была очень молода и расширялась чрезвычайно быстро, а наш объем был относительно небольшим (насколько небольшим, зависит от деталей эволюции ранней Вселенной, которые нам неизвестны). В то время во Вселенной умещалось совсем немного вибраций. Сегодня длина Хаббла стала просто огромной — примерно в 10^{60} раз больше планковской длины, и число допустимых вибраций теперь невероятно велико. Продолжая эту мысль, добавим, что совсем не удивительно, что энтропия ранней Вселенной была мала, ведь тогда была мала и максимально допустимая энтропия Вселенной, ведь максимально допустимая энтропия возрастает по мере расширения Вселенной и увеличения пространства состояний.

Однако если пространство состояний со временем изменяется, то, определенно, эволюция не может обеспечивать сохранение информации и обратимость. Если сегодня возможных состояний больше, чем было вчера, и два разных начальных состояния всегда эволюционируют в два разных конечных состояния, то какие-то из сегодняшних состояний должны были появиться ниоткуда. Это означает, что в целом эволюцию невозможно повернуть вспять. Во всех стандартных обратимых законах физики, с которыми мы давно и близко знакомы, фигурируют пространства состояний, зафиксированные раз и навсегда, а не меняющиеся с течением времени. Конфигурация внутри пространства будет эволюционировать, но само пространство состояний никогда не меняется.

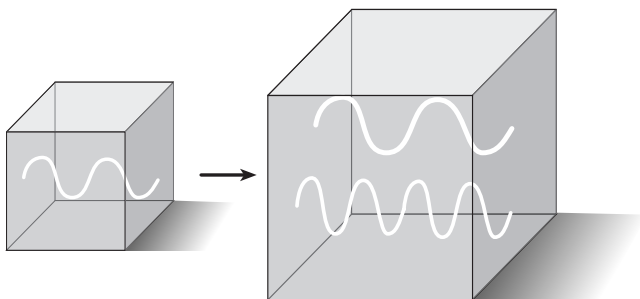


Рис. 13.2. Чем больше расширяется Вселенная, тем больше самых разных типов волн она может вместить. Может произойти больше разных событий, то есть создается впечатление, что пространство состояний увеличивается

Итак, мы столкнулись с дилеммой. Практическое правило квантовой теории поля в искривленном пространстве—времени подразумевает, что пространство состояний увеличивается с расширением Вселенной, но идеи, на которых все это базируется, — квантовая механика и общая теория относительности — строго придерживаются принципа сохранения информации. Очевидно, кто-то должен уступить.

Ситуация напоминает загадку с потерей информации в черных дырах. Тогда мы (а точнее, Стивен Хокинг) воспользовались квантовой теорией поля в искривленном пространстве—времени, чтобы получить результат — испарение черных дыр в хокинговское излучение, — свидетельствующий о том, что информация теряется или, по крайней мере, искажается. А теперь мы рассуждаем о космологии, где правила квантовой теории поля в расширяющейся Вселенной подразумевают фундаментально необратимую эволюцию.

Я буду предполагать, что эта загадка однажды разрешится в пользу сохранения информации, ведь даже Хокинг теперь придерживается мнения, что в черных дырах так и происходит (хотя с ним согласны, конечно, не все). Ранняя Вселенная и поздняя Вселенная — это просто две разные конфигурации одной и той же физической системы, эволюционирующей согласно обратимым фундаментальным законам в рамках неизменного пространства возможных состояний. Отзываясь об энтропии системы как о «большой» или «маленькой», правильно сравнивать ее с максимально возможной энтропией вообще, а не с наибольшей энтропией, совместимой с определенными свойствами, которыми система обладает в данный конкретный момент. Если мы смотрим на контейнер с газом и обнаруживаем, что весь газ собрался в одном углу, то мы не говорим, что «это высокоэнтропийная конфигурация при условии, что мы ограничиваемся рассмотрением исключительно тех конфигураций, в которых весь газ собрался в этом углу». Мы говорим: «Это очень низкоэнтропийная конфигурация, и, вероятно, этому существует какое-то объяснение».

Вся эта неразбериха возникает, потому что у нас нет полной теории квантовой гравитации и нам приходится делать правдоподобные предположения, отталкиваясь от теорий, которые, как нам кажется, мы понимаем. Когда подобные предположения приводят к безумным результатам, чем-то приходится жертвовать. Мы представили обоснованное доказательство того, что число состояний, *описываемых вибрирующими квантовыми полями*, с течением времени и по мере расширения Вселенной изменяется. Если общее пространство состояний остается неизменным, значит, дело в том, что многие возможные состояния ранней Вселенной носят существенный квантово-гравитационный характер и их попросту невозможно описать в терминах квантовых полей на

однородном фоне. Мы можем лишь предполагать, что теория квантовой гравитации поможет нам понять, что это могут быть за состояния, но даже без этого понимания базовый принцип сохранения информации гарантирует, что подобные состояния не могут не существовать. Поэтому кажется логичным смириться с этим и попытаться объяснить, почему ранняя Вселенная обладала такой несомненно низкоэнтропийной конфигурацией.

Не все с этим согласны.⁵ Определенное уважаемое направление научной мысли придерживается примерно такого принципа: «Да, информация должна сохраняться на фундаментальном уровне, и вполне возможно, что существует какое-то фиксированное пространство состояний для всей Вселенной. Но кого это интересует? Мы не знаем, что это за пространство состояний, и мы живем во Вселенной, которая при рождении была маленькой и относительно однородной. Лучшая стратегия для нас — придерживаться правил, предлагаемых квантовой теорией поля, допуская лишь очень ограниченный набор конфигураций в самые ранние времена и намного более масштабный их набор в поздние». Возможно, они правы. Пока у нас нет окончательных ответов, и нам остается лишь прислушиваться к своей интуиции и пытаться формулировать поддающиеся проверке прогнозы, а затем сравнивать их с реальными данными. Когда речь заходит об истоках Вселенной, мы ничего не можем утверждать наверняка, поэтому лучше всего подходить к любым теориям непредвзято.

Комковатость

Поскольку мы еще до конца не понимаем квантовую гравитацию, нам сложно делать исчерпывающие заявления относительно энтропии Вселенной. Однако в нашем распоряжении есть несколько базовых инструментов, с помощью которых мы способны приходить ко вполне надежным заключениям: идея о том, что энтропия увеличивается с момента Большого взрыва, принцип сохранения информации, предсказания классической общей теории относительности и формула Бекенштейна—Хокинга для энтропии черной дыры.

Сразу же приходит в голову резонный вопрос: как выглядит высокоэнтропийное состояние, когда гравитация существенна? Если гравитация незначительна, то высокоэнтропийные состояния — это состояния термодинамического равновесия, в которых вещество равномерно распределено и имеет постоянную температуру (в зависимости от конкретной системы в деталях возможны расхождения — как у смеси масла с уксусом). Общее впечатление таково, что высокоэнтропийные состояния должны быть *однородными*, тогда как низкоэнтропийные состояния могут быть *комковатыми*. Понятно, что это

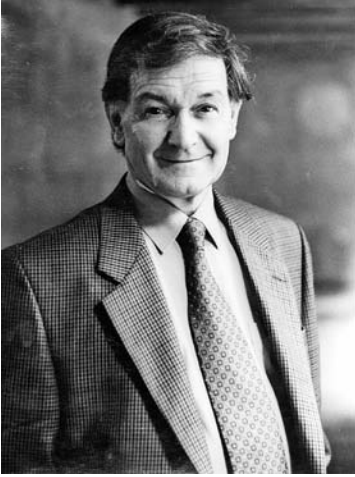


Рис. 13.3. Роджер Пенроуз, человек, который больше всех старался привлечь внимание к загадке низкой энтропии ранней Вселенной

всего лишь простой способ объяснить сложное, утонченное явление, но он может быть полезным ориентиром во множестве ситуаций.⁶ Вспомните о том, что в соответствии с рассмотренной выше философией в стиле «давайте игнорировать гравитацию» ранняя Вселенная действительно была однородной.

Однако в поздней Вселенной, когда формируются звезды, галактики и кластеры, игнорировать влияние гравитации становится попросту невозможно. И мы замечаем нечто очень интересное: привычная ассоциация «высокой энтропии» с «однородностью» с грохотом распадается.

Вот уже много лет сэр Роджер Пенроуз пытается убедить людей в том, что данное свойство гравитации — вещество

становится комковатым по мере увеличения энтропии в поздней Вселенной — принципиально важно и должно играть значительную роль в космологических обсуждениях. Пенроуз прославился в конце 1960-х и начале 1970-х годов благодаря исследованиям, которые они проводили совместно с Хокингом с целью понять черные дыры и сингулярности в общей теории относительности, и он не только состоявшийся математик, но и признанный авторитет в мире физики. Он отличается поразительной введливостью, и его забавляет изучение идей, решительно расходящихся с общепринятыми точками зрения в различных областях науки — от квантовой механики до исследования сознания.

Одна из областей, выбранных Пенроузом для того, чтобы заниматься своим любимым делом выискивания несоответствий в заветных чаяниях, — это теоретическая космология. В конце 1980-х годов, когда я был аспирантом, физики-теоретики, занимающиеся исследованием элементарных частиц, так же как и космологи, считали само собой разумеющимся, что истинной в итоге окажется та или иная версия инфляционной космологии (о ней мы поговорим в следующей главе); астрономы были намного осторожнее в своих высказываниях. Сегодня это убеждение получило еще большее распространение благодаря доказательствам, которые нам предоставляет космическое микроволновое

излучение: небольшие изменения плотности в разных точках ранней Вселенной хорошо сочетаются с инфляционными предсказаниями. Тем не менее Пенроуз всегда относился к этим заявлениям с изрядной долей скептицизма, в основном вследствие неспособности инфляционных теорий объяснить низкую энтропию ранней Вселенной. Помню, еще будучи студентом, я читал одну из его статей; я понимал, что Пенроуз говорит нечто чрезвычайно важное, и ценил его точку зрения, но меня не оставляло чувство, что где-то он допустил ошибку. Мне потребовалось два десятилетия размышлений об энтропии, для того чтобы согласиться, что по большей части он все же был прав.

У нас нет полной картины пространства микросостояний в квантовой гравитации, и соответственно нет строгого понимания энтропии. Но существует простая стратегия, позволяющая справиться с этим препятствием: мы будем рассматривать то, что на самом деле происходит во Вселенной. Большинство из нас уверены в том, что эволюция наблюдаемой Вселенной всегда происходила в соответствии со вторым началом термодинамики, а энтропия увеличивалась с самого Большого взрыва, даже если в деталях мы все еще сомневаемся. Если энтропия стремится к увеличению и если во Вселенной постоянно происходит какой-то процесс, обратного которому мы никогда не наблюдаем, вероятно, этот процесс отражает увеличение энтропии.

В качестве примера можно привести «гравитационную нестабильность» поздней Вселенной. Мы уже много раз бросали фразы вроде «когда гравитация незначительна» и «когда гравитация существенна», но каковы критерии? Как понять, насколько важную роль играет гравитация и можно ли ею пренебречь? В целом, если взять какой-то набор частиц, их гравитационное взаимодействие всегда будет притягивать их друг к другу — гравитационная сила между частицами универсальна и работает на притяжение. (В противоположность, например, электромагнитным силам, которые могут быть как притягивающими, так и отталкивающими в зависимости от того, с какими типами электрических зарядов мы имеем дело.⁷) Однако существуют и прочие силы, которые можно объединить под названием «давление». Они предотвращают всеобщий коллапс в черную дыру. Земля, Солнце или яйцо не коллапсируют под действием собственного гравитационного притяжения, потому что каждый из этих объектов поддерживается давлением вещества внутри него. Это эмпирическое правило можно сформулировать так: «гравитация существенна» подразумевает «гравитационное притяжение множества частиц преодолевает давление, пытающееся не дать им сколлапсировать».

В очень ранней Вселенной температура высока, а давление невероятно велико.⁸ Локальная гравитация между соседними частицами слишком слаба,

для того чтобы они притягивались друг к другу, что сохраняет начальную однородность материи и излучения. Но по мере того как Вселенная расширится и охлаждается, давление падает, и гравитация начинает доминировать. Это — эра «формирования структур», в которой изначально равномерно распределенная материя постепенно начинает сгущаться, формируя звезды, галактики и более крупные скопления галактик. Начальное распределение не было идеально однородным; в различных местах можно было обнаружить небольшие отклонения плотности. В более плотных областях гравитация сильнее притягивала частицы друг к другу, тогда как менее плотные регионы упустили частицы, позволяя им улететь к более плотным соседям, и становились еще более пустыми. Благодаря постоянному воздействию гравитации то, что когда-то было почти идеально однородным распределением материи, превратилось в нечто комковатое и становящееся все более и более неравномерным.

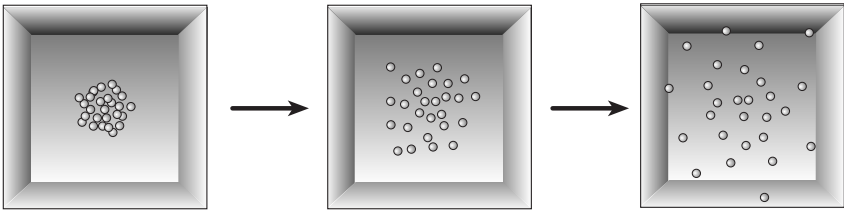
Вот что Пенроуз имеет в виду: во Вселенной формируются структуры, а энтропия возрастает. Он описывает это такими словами:

Связь гравитации с энтропией выглядит несколько непривычно, поскольку гравитационное взаимодействие всегда проявляется как притяжение. Мы привыкли иметь дело с энтропией обычного газа, который, будучи сконцентрирован в малой области, обладает низкой энтропией... а в состоянии теплового равновесия с высокой энтропией газ имеет однородное распределение. С гравитацией все обстоит наоборот. Однородная система гравитирующих тел будет обладать низкой энтропией (если только скорости этих тел не слишком велики, и/или тела не слишком малы, и/или они не находятся так далеко друг от друга, что вклад гравитации в энергию становится несущественным), тогда как высокая энтропия достигается, когда гравитирующие тела сливаются воедино.⁹

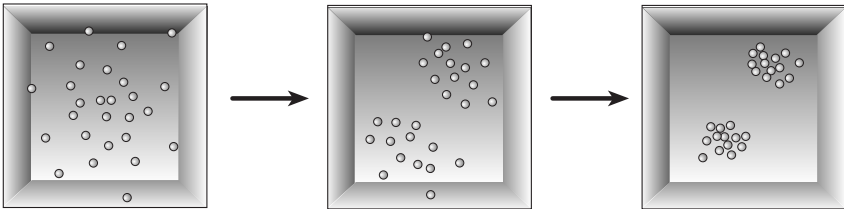
Все это совершенно правильно и отражает очень важную идею. При определенных условиях, таких, например, которые можно наблюдать в современной Вселенной на больших масштабах, мы, несмотря на отсутствие у нас готовой формулы для энтропии системы, включающей гравитацию, можем с уверенностью заявлять, что энтропия возрастает по мере формирования структур и увеличения комковатости Вселенной.

К схожему выводу можно прийти и другим путем, посредством волшебства мысленных экспериментов. Рассмотрим текущее макросостояние Вселенной — какой-то набор галактик, темной материи и т. д., распределенных определенным образом по пространству. А теперь внесем одно-единственное изменение: вообразим, что Вселенная *сжимается*, а не расширяется. Что при этом должно происходить?

Должно быть очевидно, чего точно происходить *не будет*: мы не увидим банальной прокрутки в обратную сторону фактической истории Вселенной — от однородного начального состояния до комковатого сегодня; по крайней мере, этого не произойдет для подавляющего большинства микросостояний нашего текущего макросостояния. (Хотя если мы возьмем одно конкретное микросостояние современной Вселенной и повернем время вспять только для него, то, конечно, результат будет именно таким.) Если материя, распределенная по нашей текущей Вселенной, начнет сжиматься, то отдельные звезды и галактики не начнут рассеиваться и сглаживаться. Наоборот, гравитационная сила между тяжелыми объектами будет притягивать их друг к другу, и объем комковатой структуры в действительности только увеличится, несмотря на сжатие Вселенной. Начнут формироваться черные дыры, которые затем станут сливаться друг с другом, образуя черные дыры еще большего размера. В конечном итоге произойдет что-то вроде Большого сжатия, но (и это Пенроуз особо подчеркивает) оно совершенно не будет похоже на однородный Большой взрыв, с которого Вселенная началась. Области с высокой плотностью и сформировавшиеся черные дыры относительно быстро врежутся в сингулярность будущего, тогда как более разреженные места сумеют просуществовать чуть дольше.



Увеличение энтропии, когда гравитация несущественна



Увеличение энтропии, когда гравитация важна

Рис. 13.4. Когда гравитация несущественна, увеличение энтропии ведет к сглаживанию распределения материи; когда гравитация важна, материя с увеличением энтропии приобретает комковатую структуру

Эта история отлично вписывается в идею о том, что пространство состояний нашего сопутствующего объема остается постоянным, но когда Вселенная мала, большинство состояний не могут быть описаны как вибрирующие квантовые поля в однородном пространстве. Такой картины абсолютно недостаточно для описания хаотичного, заполненного черными дырами беспорядка, который можно было бы ожидать увидеть в сжимающейся Вселенной. И все же эта беспорядочная конфигурация — настолько же допустимое состояние Вселенной, как и относительно однородное пространство, с которым мы традиционно имеем дело в космологии. Действительно, у подобной конфигурации энтропия выше, чем у однородной Вселенной (мы знаем это, потому что сжимающаяся Вселенная в общем случае эволюционирует в нечто беспорядочное), и это означает, что такой конфигурации соответствует намного больше микросостояний, чем случаю, когда все относительно равномерно. Вопрос, почему настоящая Вселенная настолько нетипична, конечно же, остается главной загадкой.

Эволюция энтропии

Итак, мы получили достаточно базовых знаний для того, чтобы последовать за Пенроузом и попробовать дать количественную оценку изменения энтропии нашей Вселенной с момента ее рождения и до сегодняшнего дня. В общих чертах эволюция нашего сопутствующего объема нам известна: в самом начале он был небольшим и наполненным горячим плотным газом, близким к абсолютной однородности. Позднее объем становится больше, холоднее, более разреженным и содержит разнообразие звезд и галактик, которое выглядит довольно комковатым на малых масштабах. Тем не менее если оценивать этот объем с точки зрения очень больших расстояний, он, по сути, все так же остается почти однородным. Так какова его энтропия?

В самые ранние моменты времени, когда все было однородно, мы можем вычислить энтропию, просто проигнорировав воздействие гравитации. Казалось бы, это идет вразрез с философией, которую я так жарко проповедовал буквально несколькими абзацами выше. Но мы не говорим, что гравитация не важна в принципе, — просто пользуемся преимуществом того факта, что на практике конфигурация ранней Вселенной была такой, что гравитационные взаимодействия между отдельными частицами не играли почти никакой динамической роли. По сути, это был всего лишь контейнер с горячим газом. А контейнер с горячим газом — это объект, энтропию которого мы вычислять умеем.

Энтропия нашего сопутствующего объема пространства во времена, когда он был юным и однородным, равна:

$$S_{\text{ранняя}} \approx 10^{88}$$

Знак « \approx » означает «приблизительно равно», и мы используем его, так как хотим подчеркнуть, что это грубая оценка, а не точный расчет. Получается это значение очень просто: мы всего лишь примем содержимое Вселенной за обычный газ в тепловом равновесии и задействуем формулы, выведенные в XIX веке учеными, занимавшимися термодинамикой. Единственное отличие — необходимость учесть одну особенность: большинство частиц во Вселенной — это фотоны и нейтрино, движущиеся со скоростью, равной или близкой к скорости света, поэтому важно принимать в расчет также теорию относительности. С точностью до нескольких числовых множителей, не сильно влияющих на ответ, энтропия горячего газа, состоящего из релятивистских частиц, равна просто-напросто полному количеству таких частиц. Наш сопутствующий объем Вселенной содержит около 10^{88} частиц, и именно такой энтропия была в ранние времена. (В течение эволюции она немного увеличивается, но совсем незначительно, поэтому считать энтропию постоянной — это допустимое приближение.)

Сегодня гравитация играет существенную роль, и было бы ошибкой считать материю в современной Вселенной газом при тепловом равновесии с пренебрежимо малой гравитацией. Обычная материя и темная материя сгустились, образовав галактики и другие структуры, и энтропия вследствие этого существенно возросла. К сожалению, у нас нет надежной формулы, позволяющей отследить изменение энтропии в ходе формирования галактики.

Тем не менее у нас есть формула для случая, когда гравитация наиболее важна, а именно для черной дыры. Насколько мы знаем, черные дыры отвечают за очень малую часть общей массы Вселенной.¹⁰ В галактике, подобной Млечному Пути, можно найти несколько черных дыр звездного размера (масса каждой такой черной дыры может десятикратно превышать массу Солнца), но основная часть общей массы черных дыр сосредоточена в единственной сверхмассивной черной дыре в центре галактики. Определенно, сверхмассивные черные дыры громадны — более миллиона солнечных масс, но это ничто по сравнению с целой галактикой, общая масса которой может превышать массу Солнца в 100 миллиардов раз.

Однако хотя черные дыры скрывают лишь крошечную долю массы Вселенной, они содержат огромную энтропию. Энтропия одной сверхмассивной черной дыры, которая в миллион раз тяжелее Солнца, согласно формуле

Бекенштейна—Хокинга, равна 10^{90} . Это в сто раз больше всей негравитационной энтропии всей материи и излучения в наблюдаемой Вселенной.¹¹

Несмотря на то что мы еще не до конца понимаем пространство состояний гравитирующей материи, вполне безопасно утверждать, что общая энтропия современной Вселенной в основном существует в форме сверхмассивных черных дыр. Поскольку галактик во Вселенной около 100 миллиардов (10^{11}), для примерного вычисления полной энтропии допустимо предполагать существование 100 миллиардов подобных черных дыр. (В каких-то галактиках они могут отсутствовать, но в других эти черные дыры могут быть намного больше, так что это не такое уж плохое приближение.) С учетом того, что энтропия одной черной дыры размером в сто солнечных масс составляет 10^{90} , мы получаем, что полная энтропия нашего сопутствующего объема сегодня равна

$$S_{\text{сегодня}} \approx 10^{101}.$$

Математик Эдвард Казнер предложил термин «гугол», обозначающий 10^{100} — число, с помощью которого он пытался выразить идею о невообразимо большом количестве. Энтропия сегодняшней Вселенной равна приблизительно десяти гуголам. (Ребята из Google вдохновлялись этим термином, придумывая название для своего поискового механизма; сегодня невозможно упомянуть гугол без того, чтобы быть неправильно понятым.)

Когда мы записываем текущую энтропию нашего сопутствующего объема как 10^{101} , создается впечатление, что она не сильно больше энтропии ранней Вселенной (10^{88}). Но это всего лишь чудо компактной записи. В действительности 10^{101} в десять триллионов (10^{13}) раз больше 10^{88} . Энтропия Вселенной невероятно возросла по сравнению с ранними годами, когда все было однородным.

Однако она могла бы быть еще больше. Каково максимально возможное значение энтропии для нашей наблюдаемой Вселенной? И снова у нас недостаточно знаний, для того чтобы уверенно дать ответ. Но мы можем показать, что максимальная энтропия должна быть не меньше определенного значения, просто вообразив, что вся материя во Вселенной собралась в одну гигантскую черную дыру. Это допустимая конфигурация для физической системы, соответствующей нашему сопутствующему объему Вселенной, и, определенно, энтропии ничто не мешает возрасти до такого уровня. Используя наши знания об общей массе материи, содержащейся во Вселенной, и снова призвав на помощь формулу Бекенштейна—Хокинга для черных дыр, мы находим, что максимальная энтропия наблюдаемой Вселенной должна быть не меньше

$$S_{\text{максимальная}} \approx 10^{120}.$$

Это фантастически большое число. Сотня квинтильонов гуголов! Максимальная энтропия наблюдаемой Вселенной могла бы быть такой или еще больше.

Эти числа доводят до конца загадку энтропии, которую представляет нам современная космология. Если Больцман прав и энтропия характеризует число возможных микросостояний системы, неразличимых с макроскопической точки зрения, то очевидно, что ранняя Вселенная находилась в чрезвычайно необычном состоянии. Вспомните, что энтропия равна логарифму количества эквивалентных состояний, то есть состояние с энтропией S — это одно из 10^S неразличимых состояний. Таким образом, ранняя Вселенная находилась в одном из

$$10^{10^{88}}$$

различных состояний. Но это могло бы быть одно из

$$10^{10^{120}}$$

возможных состояний, доступных для Вселенной. И снова чудеса написания делают эти числа на первый взгляд очень похожими, хотя в действительности второе число невероятно, непостижимо огромное по сравнению с первым. Если состояние ранней Вселенной просто «случайным образом выбрано» среди всех возможных состояний, то его вероятность выглядеть именно так, каким мы его видим, на самом деле до нелепого мала.

Вывод из всего этого совершенно очевиден: состояние ранней Вселенной *не было* выбрано случайным образом среди всех возможных состояний. С этим согласится каждый человек в мире, который когда-либо задумывался над этой проблемой. Наши мнения расходятся относительно другого вопроса: *почему* ранняя Вселенная была такой особенной — что за механизм поместил ее в это состояние? И поскольку нам и здесь не следует проявлять временной шовинизм, почему тот же механизм не помещает в схожее состояние *позднюю* Вселенную? Именно это мы и хотим выяснить.

Максимизация энтропии

Мы выяснили, что ранняя Вселенная пребывала в очень необычном состоянии, и полагаем, что это требует отдельного объяснения. Что насчет вопроса, с которого мы начали эту главу: как должна выглядеть Вселенная? Как выглядит состояние с максимальной энтропией, в котором когда-либо может оказаться наш сопутствующий объем?

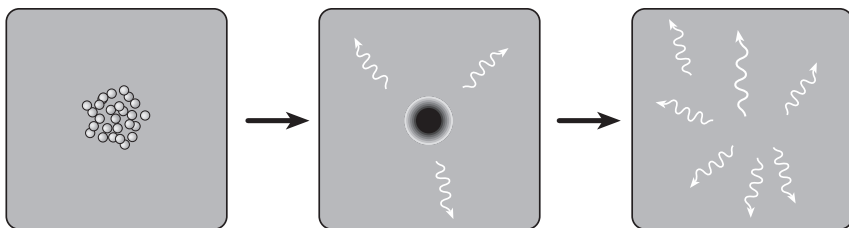
Роджер Пенроуз считает, что ответом является черная дыра.

Как обстоит дело с состоянием максимальной энтропии? В случае газа максимальная энтропия термодинамического равновесия соответствует равномерному распределению газа в доступной ему области. В случае больших гравитирующих тел максимальная энтропия достигается, когда вся масса оказывается сконцентрированной в одном месте в виде объекта, называемого черной дырой.¹²

Вы видите, почему этот ответ напрашивается сам собой. Как мы узнали, в присутствии гравитации энтропия увеличивается, когда объекты сближаются, то есть когда состояние становится комковатым, а не сглаживается. Определенно, черная дыра — это объект с максимальной плотностью, настолько большой, насколько это только можно себе вообразить. Как уже говорилось в предыдущей главе, черная дыра заключает максимальную энтропию, которая может уместиться в области пространства—времени любого фиксированного размера; эта идея лежит в основе голографического принципа. И результирующая энтропия, несомненно, очень велика, — мы убедились в этом, когда рассматривали сверхмассивную черную дыру.

Однако если еще раз все как следует проанализировать, выясняется, что этот вывод не совсем верен.¹³ Черная дыра не максимизирует общую энтропию, которой может обладать система, — она максимизирует энтропию, которая может содержаться в области фиксированного размера. Точно так же, как второе начало термодинамики не говорит: «энтропия увеличивается, если не учитывать гравитацию», оно не говорит: «энтропия в пределах фиксированного объема увеличивается». Оно утверждает лишь, что «энтропия увеличивается», и если для этого требуется большая область пространства, значит, так тому и быть. Одно из чудес общей теории относительности, заключающее в себе критически важное отличие от абсолютного пространства—времени ньютоновской механики, состоит в том, что размеры никогда не бывают фиксированными. Даже не придя к окончательному пониманию энтропии, мы можем добраться до правильного ответа, следуя по стопам Пенроуза и просто изучая естественную эволюцию систем в направлении высокоэнтропийных состояний.

Рассмотрим простой пример: материя скопилась в одной области Вселенной, пустой (даже без энергии вакуума) везде, кроме этой конкретной области. Другими словами, это пространство—время, которое практически везде абсолютно пусто и включает лишь несколько частиц материи, собравшихся в одном определенном месте. Поскольку в большей части пространства энергии нет вообще, Вселенная не может расширяться или сжиматься, так что



Увеличение энтропии при формировании и испарении черной дыры

Рис. 13.5. Энтропия черной дыры велика, но она испаряется, испуская излучение с большей энтропией

за пределами области, где находится скопление материи, в действительности ничего не происходит. А частицы под воздействием собственной гравитационной силы приближаются друг к другу.

Теперь представим себе, что они притягиваются так сильно, что в итоге коллапсируют, формируя черную дыру. Не вызывает сомнения, что пока этот процесс происходит, энтропия возрастает. Однако черная дыра не остается в одном состоянии навечно — она испускает хокинговское излучение, теряя энергию и постепенно сжимаясь, и в конечном счете полностью испаряется.

Естественное поведение черных дыр в пустых за их пределами Вселенных — постепенно испаряться, превращаясь в разреженный газ из частиц. Поскольку это естественное поведение, мы ожидаем, что оно отражает увеличение энтропии, — и это действительно так. Мы можем напрямую сравнить энтропию черной дыры с энтропией излучения, которое формируется при ее испарении, и увидим, что энтропия излучения выше. Если быть точнее, то выше примерно на 33 %.¹⁴

Итак, *плотность* энтропии, очевидно, кардинально изменилась: когда у нас была черная дыра, вся энтропия была упакована в небольшой объем, однако хокинговское излучение постепенно распространяется на огромную область пространства. Однако опять-таки, то, что нас беспокоит, — это не плотность энтропии, а исключительно ее полная величина.

Пустое пространство

Урок, который мы должны извлечь из этого мысленного эксперимента, заключается в том, что эмпирическое правило «когда гравитация принимается в расчет, высокоэнтропийные состояния выглядят комковатыми, а не гладкими» — это не абсолютный закон. Оно истинно только при определенных

обстоятельствах. Черная дыра более комковата (более контрастна), чем начальное скопление частиц, но конечное рассеивающееся излучение не обладает абсолютно никакой комковатостью. На самом деле, по мере того как излучение разбегается во все концы Вселенной, мы приближаемся к конфигурации, которая со временем становится все более однородной, так как плотность во всех точках стремится к нулю.

Таким образом, ответом на вопрос: «Как выглядит высокоэнтропийное состояние, если принимать во внимание гравитацию?» — будет не «комковатый, хаотичный вихрь черных дыр» и даже не «одна гигантская черная дыра». Состояния с самой высокой энтропией выглядят как *пустое пространство*, в котором лишь изредка тут и там встречается незначительное число частиц, постепенно разбегающихся в разные стороны.

На первый взгляд кажется, что это заявление противоречит здравому смыслу, поэтому его необходимо тщательно изучить со всех сторон.¹⁵ Случай скопления материи, частицы которой притягиваются друг к другу и формируют черную дыру, относительно прост, он позволяет подставить конкретные значения и убедиться, что энтропия при испарении черной дыры увеличивается. Однако это совершенно не доказывает тот факт, что результат этого процесса (становящийся все более разреженным со временем газ из частиц, распространяющихся в пустом пространстве) действительно представляет конфигурацию с максимально возможной энтропией. Следует рассмотреть и другие возможные ответы. Главный руководящий принцип заключается в том, что нам необходима конфигурация, к которой в процессе эволюции стремятся другие конфигурации и которая при этом сохраняется вечно.

А что, если бы у нас был целый набор из множества черных дыр? Мы могли бы вообразить, что черные дыры наполняют Вселенную и излучение из одной черной дыры в конечном итоге перетекает в другую, что предохраняет их от полного испарения. Однако в соответствии с общей теорией относительности такая конфигурация недолговечна. Рассыпав множество объектов по всей Вселенной, мы создали условия, в которых пространство должно либо расширяться, либо сжиматься. Если оно расширяется, то расстояние между черными дырами постоянно увеличивается, и в конце концов они все же испарятся и полностью исчезнут. Как и раньше, долгосрочное будущее такой Вселенной выглядит попросту как пустое пространство.

Если же пространство сжимается, то это совершенно другая история. Когда вся Вселенная сжимается, в будущем ее с большой вероятностью ждет сингулярность Большого сжатия. Это уникальный случай; с одной стороны, сингулярность в действительности не сохраняется вечно (так как, насколько

нам известно, время там заканчивается), но она и не эволюционирует ни в какое другое состояние. Невозможно исключить вероятность того, что эволюция какой-то гипотетической Вселенной приводит в будущем к Большому сжатию, но поскольку мы почти ничего не знаем о сингулярностях в квантовой гравитации, то мало что полезного можем сказать об этом случае. (К тому же в нашем реальном мире этот сценарий вроде бы не воплощается.)

Определенную подсказку мы можем получить, рассматривая коллапсирующее скопление материи (состоящей из черных дыр или чего-то другого), которое выглядит в точности как сжимающаяся Вселенная, но заполняет лишь ограниченную область пространства, не проникая во все его уголки. Оставшаяся часть Вселенной пуста, но наша локальная область в точности повторяет сценарий, который мы уже изучили выше, — когда группа частиц коллапсирует, формируя черную дыру. Получается, что то, что изнутри выглядит как Вселенная, стремящаяся к Большому сжатию, при взгляде извне создает впечатление формирования гигантской черной дыры. В этом случае мы знаем, что принесет далекое будущее: возможно, это займет какое-то время, но благодаря излучению эта черная дыра неизбежно испарится, оставив после себя лишь пустоту. Итоговым состоянием снова будет пустое пространство.

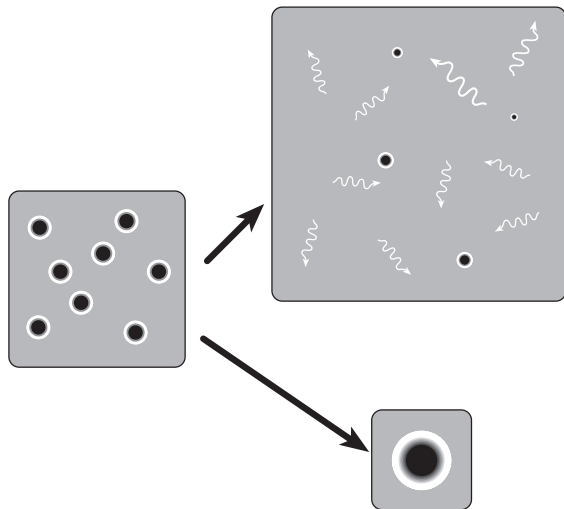


Рис. 13.6. Набор черных дыр не может оставаться статичным. Он будет либо расширяться, постепенно, с испарением черных дыр, приближаясь к пустому пространству (наверху справа), либо сжиматься до состояния Большого сжатия или до образования одной гигантской черной дыры (внизу справа)

Все это до определенной степени поддается систематизации. Космологи традиционно рассматривают только те Вселенные, которые во всем пространстве одинаковы, ведь именно такой кажется наблюдаемая часть нашей Вселенной. Но давайте попробуем не считать это само собой разумеющимся; давайте зададимся вопросом, что, в принципе, может происходить в разных областях Вселенной в самом общем случае.

Понятие о «расширяющемся» или «сжимающемся» пространстве не обязано относиться абсолютно ко всей Вселенной. Если материя в какой-то конкретной области пространства разбегается и разреживается, то локально она выглядит как расширяющаяся Вселенная; то же самое можно сказать и в случае сжатия, когда частицы материи притягиваются друг к другу. Но если попробовать представить себе частицы, разбросанные по всему объему бесконечно большого пространства, то большую часть времени мы будем обнаруживать, что одни области расширяются и становятся более разреженными, тогда как другие сжимаются, становясь все более плотными.

Однако если это верно, то во Вселенной происходит примечательнейшая штука: несмотря на очевидную симметрию между «расширением» и «сжатием», очень скоро расширяющиеся области начинают одерживать верх. А причина проста: расширяющиеся участки увеличиваются в объеме, тогда как сжимающиеся становятся меньше. Более того, сжимающиеся области не остаются в плотном, сжатом состоянии навечно. В экстремальном случае, когда материя коллапсирует в черную дыру, в какой-то момент начинается испарение черных дыр. Это означает, что, взяв начальные условия, содержащие и расширяющиеся и сжимающиеся области, и подождяв достаточно долго, мы в конце концов остаемся все с тем же результатом — пустым пространством, причем энтропия по ходу процесса непрерывно увеличивается.¹⁶

В каждом из этих примеров важным фундаментальным свойством является динамическая природа пространства—времени в общей теории относительности. В фиксированном, абсолютном пространстве—времени (таком, каким его полагал Больцман) имеет смысл представлять себе Вселенную как пространство, заполненное газом при одинаковых температуре и плотности, — повсеместное термодинамическое равновесие. Это высокоэнтропийное состояние, и естественно предполагать, что в указанных условиях Вселенная «должна» быть именно такой. Неудивительно, что Больцман считал, что наша наблюдаемая Вселенная может быть просто статистической флуктуацией подобной конфигурации.

Однако общая теория относительности все ставит с ног на голову. Газ при постоянной плотности в статическом пространстве—времени не может быть

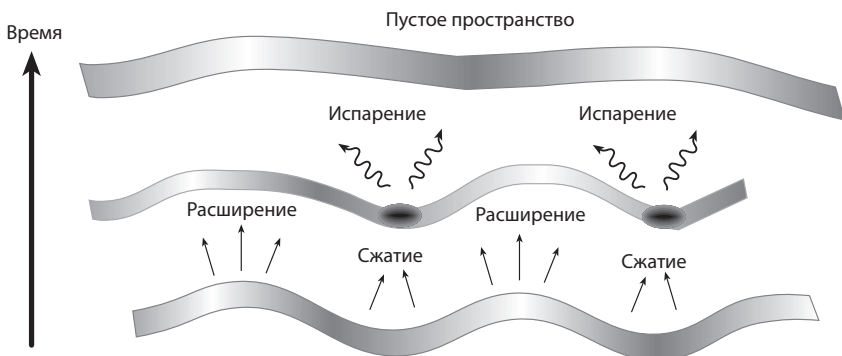


Рис. 13.7. Начальные условия (внизу) во Вселенной с расширяющимися и сжимающимися областями. Размер расширяющихся областей увеличивается, но они становятся все более разреженными. Сжимающиеся области сначала уплотняются, но в какой-то момент начинают испаряться в окружающую пустоту

решением уравнения Эйнштейна, поскольку Вселенная должна либо расширяться, либо сжиматься. До того как Эйнштейн высказал свои идеи, казалось логичным начинать мысленные эксперименты, фиксируя среднюю плотность материи или же общий объем рассматриваемой области. Но в общей теории относительности невозможно запросто зафиксировать такие параметры, так как они проявляют тенденцию к изменению с течением времени. Один из способов воспринимать это — уяснить, что общая теория относительности всегда предоставляет нам путь для увеличения энтропии любой конкретной конфигурации: сделайте Вселенную больше и позвольте материи расширяться, заполняя новый объем. Разумеется, конечным состоянием, к которому способен привести этот процесс, может быть только пустое пространство. Именно оно считается «высокоэнтропийным» состоянием в ситуации, когда мы принимаем в расчет также и гравитацию.

Конечно же, ни один из этих аргументов не следует считать нерушимым. Они действительно предлагают ответ, который кажется нам связным, логичным и разумным. И все же это ни в коем случае не окончательное доказательство чего бы то ни было. Заявление о том, что энтропия какой-то системы во Вселенной может увеличиваться за счет того, что ее элементы разлетаются по огромным просторам пространства, кажется вполне безопасным. Но вывод из него — пустое пространство представляет собой состояние с наибольшей энтропией — это всего лишь умозрительное заключение. Гравитация — сложная штука, мы очень многого не знаем о ней, поэтому не следует слишком сильно привязываться ни к одному из существующих спекулятивных сценариев.

Реальный мир

Давайте применим эти идеи к реальному миру. Если высокоэнтروпийные состояния — это те, которые выглядят как пустое пространство, то, по всей видимости, наша фактическая наблюдаемая Вселенная должна эволюционировать по направлению к такому состоянию. (Так и есть.)

Не вдаваясь в подробности, мы сказали, что когда объекты коллапсируют под воздействием гравитации, они формируют черную дыру, которая некоторое время испаряется, прежде чем окончательно исчезнуть. Совершенно очевидно, что так действительно происходит в реальном мире, где мы наблюдаем множество объектов, которые гравитация удерживает вместе, и эти объекты даже приближенно не напоминают черную дыру: планеты, звезды, даже галактики.

Однако реальность такова, что все эти системы в конце концов распадутся, — нужно лишь подождать достаточно долго. Наиболее очевидно это в случае галактик, которые можно рассматривать как наборы звезд, движущихся по орбитам под действием взаимного гравитационного притяжения. Каждая звезда проходит мимо множества других, и все они взаимодействуют подобно молекулам в контейнере с газом, за исключением того, что взаимодействие между ними — исключительно гравитационное (лишь в очень редких случаях одна звезда может непосредственно врезаться в другую). При таком взаимодействии звезды способны обмениваться энергией.¹⁷ Поучаствовав в массе таких встреч, звезды иногда умудряются набрать так много энергии, что скорость их движения достигает скорости убегания, и они вылетают из своей галактики. В результате этого галактика теряет часть своей энергии и, как следствие, сжимается, подталкивая звезды ближе друг к другу. В конечном итоге оставшиеся звезды оказываются так тесно упакованными в своей галактике, что все они проваливаются в черную дыру в ее центре. Начиная с этого момента, мы возвращаемся к предыдущей истории.

Схожая логика распространяется и на любой другой объект во Вселенной, даже если в деталях возможны какие-то отличия. Главная мысль такова: любой камень, или любая звезда, или любая планета, или любое что угодно еще — любая физическая система — *хочет оказаться в состоянии* с высокоэнтропийной конфигурацией составляющих ее элементов. Это выглядит небольшим литературным преувеличением, ведь у неодушевленных предметов в действительности нет желаний, но данное описание отражает реальность: в ходе свободной, беспрепятственной эволюции система естественным образом приходит к конфигурации с наибольшей энтропией.

Возможно, вы думаете, что на самом-то деле эволюция ограничена: например, энтропия планеты могла бы быть намного выше, если бы вся ее масса сколлапсировала в черную дыру, но внутреннее давление удерживает ее в стабильном состоянии. Здесь в игру вступает чудо квантовой механики. Вспомните, что на самом деле планета — это не набор классических частиц; как и любой другой объект, она описывается волновой функцией. Эта волновая функция характеризует вероятность того, что мы найдем составляющие планеты в любой из возможных для них конфигураций. Одной из возможных конфигураций неизбежно будет черная дыра. Другими словами, у внешнего наблюдателя, смотрящего на планету (или на любой другой объект), всегда есть крохотный шанс увидеть спонтанный коллапс планеты в черную дыру. Этот процесс называется квантовым туннелированием.

Однако не стоит начинать беспокоиться раньше времени. Да, это правда. Практически у всего, что только можно найти во Вселенной, — Земли, Солнца, вас, вашей кошки — есть шанс в любой момент квантово протуннелировать в форму черной дыры. Но этот шанс чрезвычайно мал. Для того чтобы вероятность возросла настолько, чтобы к ней можно было относиться серьезно, должен пройти огромный промежуток времени — во много, много раз больше возраста Вселенной. Однако во Вселенной, которая живет вечно, это означает, что шансы однажды все-таки пронаблюдать такой результат довольно велики — более того, это неизбежно. Никакое скопление частиц не может существовать во Вселенной вечно, не меняя своего состояния. Вывод из всего этого таков: материя всегда найдет способ перейти в высокоэнтропийную конфигурацию, если таковая, в принципе, существует. Это может быть туннелирование в форму черной дыры или какие-то более приземленные варианты. Неважно, о каком комке материи во Вселенной идет речь; он может увеличить свою энтропию, испарившись в разреженный газ из частиц, уносящихся прочь в пустое пространство.

Энергия вакуума

Как мы обсуждали в главе 3, во Вселенной можно найти не только материю и излучение, там есть также темная энергия, ответственная за ускорение Вселенной. Мы не можем точно сказать, что такое темная энергия, но среди кандидатов на это звание в настоящее время лидирует «энергия вакуума», также известная под названием космологической постоянной. Энергия вакуума — это всего лишь постоянное значение энергии, присущей каждому кубическому сантиметру пространства, которое остается неизменным в пространстве и времени.

Существование темной энергии одновременно и упрощает наши идеи относительно высокоэнтропийных состояний в присутствии гравитации, и делает их более изощренными. Я говорил, что естественное поведение материи — рассеиваться по пустому пространству, которое, таким образом, становится наиболее вероятным кандидатом на звание состояния с максимальной энтропией. Во Вселенной, подобной нашей, где энергия вакуума мала, но все же больше нуля, этот вывод становится еще более здравым. Положительная энергия вакуума постоянно подталкивает расширение Вселенной, что поддерживает общую тенденцию материи и излучения к рассеиванию. Если в течение следующих нескольких лет человеческие существа сумеют создать машину или лекарство, обеспечивающие бессмертие, то космологам на протяжении своей бесконечной жизни придется наблюдать становящуюся все более пустой Вселенную. Звезды будут умирать, черные дыры испаряться, и все сущее будет разлетаться в стороны под воздействием ускорения, сообщаемого энергией вакуума.

В частности, если темная энергия — это действительно космологическая постоянная (а не что-то иное, что в конечном счете сойдет на нет), то мы можем быть уверены в том, что Вселенную никогда больше не ожидает Большое сжатие ни в какой форме. В конце концов, Вселенная не только расширяется, но и ускоряется, и это ускорение будет продолжаться вечно. Данный сценарий — и не будем забывать, что он остается наиболее популярным предсказанием эволюции реального мира среди современных космологов, — ярко иллюстрирует причудливую природу нашего низкоэнтропийного прошлого. Мы рассматриваем Вселенную, которая уже существовала какое-то фиксированное время в прошлом, но которую ждет бесконечное будущее. Первые несколько десятков миллиардов лет ее существования — это горячая, кипучая, сложная и интересная неразбериха, за которой следует бесконечный период холодной, пустой тишины. (За исключением редких статистических флуктуаций; см. следующий раздел.) Хотя это не более чем интуитивное ощущение, кажется излишним расточительством провести бесконечность в темном одиночестве после относительно волнующих и захватывающих ранних лет в прошлом нашей Вселенной.

Существование положительной космологической постоянной позволяет нам доказать хотя бы частично строгое утверждение, вместо того чтобы без конца развлекаться разнообразными мысленными экспериментами. *Космическая теорема об отсутствии волос* утверждает, что при традиционном наборе «разумных предположений» Вселенная с положительной энергией вакуума, включающая также несколько материальных полей, в конечном

счете проэволюционирует в пустую Вселенную, не содержащую ничего, кроме энергии вакуума, — если, конечно, она просуществует достаточно долго для того, чтобы энергия вакуума одержала верх. Другими словами, космологическая постоянная всегда выигрывает.¹⁸

Окончательная Вселенная — пустое пространство с положительной энергией вакуума — называется *пространством де Ситтера* в честь нидерландского физика Виллема де Ситтера, одного из первых, после Эйнштейна, исследователей космологии в рамках общей теории относительности. Как мы уже упоминали в главе 3, пустое пространство с нулевой энергией вакуума известно как пространство Минковского, тогда как пустое пространства с отрицательной энергией вакуума — это пространство анти-де Ситтера. И хотя пространство—время в пространстве де Ситтера пусто, оно благодаря положительной энергии вакуума все же искривлено. Энергия вакуума, как мы знаем, постоянно подталкивает пространство к расширению. Если мы рассмотрим в пространстве де Ситтера две частицы, изначально находящиеся в состоянии покоя, то увидим, как вследствие расширения пространства они будут постепенно отдаляться друг от друга. Аналогично, если мы посмотрим на их движение в прошлом, то увидим, что они сближались, замедляясь, так как пространство между ними растягивалось.

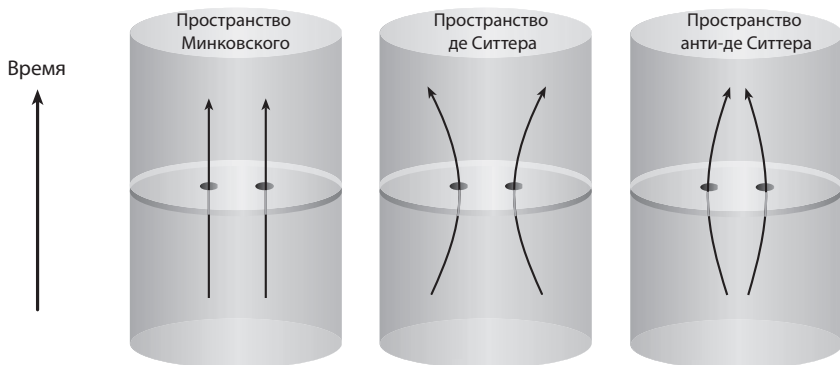


Рис. 13.8. Три разные версии «пустого пространства» с разными значениями энергии вакуума: пространство Минковского, где энергия вакуума равна нулю, пространство де Ситтера, где она положительна, и пространство анти-де Ситтера, где она отрицательна. В пространстве Минковского две частицы, первоначально находившиеся в покое, остаются неподвижными по отношению друг к другу; в пространстве де Ситтера они разлетаются, а в пространстве анти-де Ситтера приближаются друг к другу. Чем больше значение энергии вакуума, тем сильнее разлет или сближение

Все, о чем мы здесь ведем речь, указывает на то, что пространство де Ситтера должно служить конечной точкой космологической эволюции при положительной энергии вакуума и, следовательно, состоянием с самой высокой энтропией, какое только можно себе представить в присутствии гравитации. Это не строгое утверждение — текущий уровень развития науки пока недостаточно высок для того, чтобы делать строгие выводы касательно таких вопросов, — но весьма многообещающее.

Возможно, вы задаетесь вопросом, как пустое пространство может обладать высокой энтропией, ведь энтропия должна отражать число способов реорганизации микросостояний, а что нам реорганизовывать, если в наличии имеется только пустое пространство? Однако это та же самая загадка, с которой мы уже сталкивались при изучении черных дыр. Ответ должен быть такой: существует большое количество микросостояний, описывающих квантовые состояния пространства самого по себе, даже когда оно пусто. Действительно, если мы верим в голографический принцип, то можем присвоить конкретное значение энтропии, содержащейся в наблюдаемом объеме пространства де Ситтера. Это огромное число, и энтропия тем *больше*, чем *меньше* энергия вакуума.¹⁹ Наша собственная Вселенная эволюционирует по направлению к пространству де Ситтера, энтропия каждого наблюдаемого участка которого составляет около 10^{120} . (Тот факт, что это значение совпадает с энтропией, которую мы получили бы, сколлапсировав всю материю в наблюдаемой Вселенной в черную дыру, — совпадение. Это то же самое совпадение, что и факт, что плотность материи и энергия вакуума в настоящее время примерно равны, несмотря на то что материя доминировала в прошлом, а энергия вакуума будет доминировать в будущем.)

Хотя пространство де Ситтера представляется допустимым кандидатом на звание высокоэнтропийного состояния, идея энергии вакуума чинит препятствия для наших попыток понять энтропию в контексте квантовой гравитации. Главная проблема заключается в том, что эффективная энергия вакуума — значение, которое вы бы фактически получили, измерив энергию вакуума в конкретном событии пространства—времени, — может меняться, по крайней мере на какой-то период времени. Космологи говорят об «истинном вакууме», в котором энергия вакуума принимает минимальное возможное значение, и о различных «ложных вакуумах», где эффективная энергия вакуума выше. Действительно, не исключено, что прямо сейчас мы находимся в ложном вакууме. Идея о том, что «высокая энтропия» непременно означает «пустое пространство», становится намного сложнее, когда выясняется, что пустое пространство может принимать разные формы, соответствующие разным значениям энергии вакуума.

И это *хорошо*: мы не хотим, чтобы пустое пространство было состоянием с самой высокой энтропией, какая только возможна, потому что мы живем не там. В следующих двух главах мы посмотрим, не в силах ли разные значения энергии вакуума каким-то образом помочь нам разобраться в загадках Вселенной. Но сперва мы должны убедиться в том, что без выбора какой-то стратегии использования ложных вакуумов нам должно казаться очень удивительным то, что мы не живем во Вселенной, где кроме нас ничего больше нет. А это означает, что нам необходимо еще раз навестить гигантов, на плечах которых мы стоим: Больцмана и Лукреция.

Почему мы живем не в пустом пространстве?

Мы начали эту главу с вопроса о том, как должна выглядеть Вселенная. Совсем не очевидно, что этот вопрос, в принципе, может считаться осмысленным, но если это все же так, то логичным ответом на него будет: «Вселенная должна выглядеть так, словно она находится в высокоэнтропийном состоянии», потому что состояний с высокой энтропией намного больше, чем низкоэнтропийных. Затем мы убедились, что истинно высокоэнтропийные состояния выглядят, по сути, как пустое пространство; в мире с положительной космологической постоянной это означает пространство де Ситтера — Вселенную, содержащую энергию вакуума и больше ничего.

Итак, главный вопрос, на который пытается ответить современная космология, звучит так: «Почему пространство, в котором мы живем, — это не пространство де Ситтера?». Почему мы живем во Вселенной, в которой бурлит жизнь со всеми этими звездами и галактиками? Почему мы живем в шлейфе нашего Большого взрыва, чудовищном пожарище материи и энергии, и обладаем невероятно низкой энтропией? Почему во Вселенной так много *всего* и почему это все было так плотно и однородно упаковано в ранние годы?

Одним из возможных ответов могло бы быть воззвание к антропному принципу. Мы не можем жить в пустом пространстве — ну, потому что оно пусто. Там просто нет ничего, что можно было бы использовать для жизни. Это рассуждение звучит абсолютно обоснованно, но все же не отвечает на поставленный вопрос. Пусть мы действительно не в состоянии существовать в пустом пространстве де Ситтера, но это не объясняет, почему наша ранняя Вселенная даже отдаленно не напоминает ничего, что можно было бы охарактеризовать словом «пустой». Наша реальная Вселенная несоразмерно дальше от пустоты, чем было бы достаточно для применения антропного критерия.

Возможно, эти размышления заставляют вас вспомнить наше обсуждение сценария Больцмана—Луcreция из главы 10. Тогда мы воображали себе статичную Вселенную, содержащую бесконечное число атомов, то есть атомы в ней были распределены по всему пространству с некоей средней плотностью. Мы предполагали, что статистические флуктуации расстановок этих атомов могли приводить к возникновению временных низкоэнтропийных конфигураций, может быть, даже напоминающих нашу Вселенную. Однако с этим была связана определенная проблема: этот сценарий надежно предсказывал, что мы (при любых возможных определениях «нас») должны быть наименьшей возможной флуктуацией по сравнению с термодинамическим равновесием, удовлетворяющей условиям нашего существования. В предельном случае мы должны быть бесплотными больцмановскими мозгами, окруженными газом при постоянной температуре и плотности. Но это не так, и дальнейшие эксперименты предоставляют все больше доказательств того, что остальная Вселенная и близко не подходит к равновесию, то есть данный сценарий полностью опровергается экспериментальными данными.

Несомненно, под влиянием общей теории относительности прямолинейный сценарий, предложенный Больцманом, подвергся бы кардинальному пересмотру. Наиболее важный новый ингредиент заключается в том, что существование статичной Вселенной, наполненной молекулами газа, попросту невозможно. Согласно Эйнштейну, пространство, заполненное материей, не может оставаться неизменным; оно будет либо расширяться, либо сжиматься. И если материя равномерно распределена по Вселенной и к тому же состоит из нормальных частиц (не обладающих отрицательной энергией или давлением), то неизбежно появление сингулярности в том направлении течения времени, где материя уплотняется — Большой взрыв в прошлом, если Вселенная расширяется, или Большой коллапс в будущем сжимающейся Вселенной. (Или и то и другое, если Вселенная какое-то время расширяется, а затем снова начинает сжиматься.) Получается, что эта беззаботная ньютоновская картина с молекулами, вечно живущими в счастливом статичном равновесии, теряет всякий смысл, как только на сцену выходит общая теория относительности.

Вместо этого нам следует обдумать возможность существования жизни в пространстве де Ситтера, отобравшего звание состояния с наибольшей энтропией у газа термальных частиц. Если бы наши знания ограничивались классической физикой, то пространство де Ситтера было бы воистину пусто. (Энергия вакуума — это характеристика самого пространства—времени; с ней не связаны никакие частицы.) Но классическая физика — это еще не вся история; реальный мир на самом деле квантово-механический. А в соответствии

с квантовой теорией поля частицы могут создаваться «из ничего» при условии, что дело происходит в подходящем искривленном пространстве—времени. Излучение Хокинга — самый очевидный тому пример.

Если следовать той же нити рассуждений, что и Хокинг при исследовании черных дыр, то выясняется, что предположительно пустое пространство де Ситтера на самом деле бурлит жизнью со всеми этими частицами, то и дело возникающими из ниоткуда. Разумеется, необходимо подчеркнуть, что их все же не так много, — мы говорим о чрезвычайно тонком эффекте. (В пустом пространстве множество виртуальных частиц, но лишь небольшое число реальных, уловимых.) Давайте представим себе, что мы сидим в пространстве де Ситтера, вооружившись невероятно чувствительным экспериментальным прибором, способным обнаруживать любые пролетающие мимо частицы. Мы увидим, что в действительности нас окружает газ из частиц при постоянной температуре, словно мы находимся в контейнере при тепловом равновесии. И температура никуда не денется с расширением Вселенной — это характеристика пространства де Ситтера, остающаяся постоянной на протяжении вечности.²⁰

Следует признать, что нам удастся обнаружить не так уж много частиц; температура все же довольно невысока. Если кто-либо спросит вас, какова «температура Вселенной» прямо сейчас, то вашим ответом, вероятно, будет 2,7 кельвина, температура космического микроволнового фонового излучения. Это довольно низко; 0 кельвинов — это минимальная возможная температура, комнатная температура равна приблизительно 300 кельвинам, а самая низкая температура, которой когда-либо удалось достичь в лабораторных условиях на Земле, составляет около 10^{-10} кельвинов. Если допустить, что Вселенная расширится до такой степени, что вся материя и микроволновое фоновое излучение полностью рассредоточатся, оставив после себя лишь частицы, рождаемые пространством де Ситтера за счет квантовых эффектов, то температура такой системы будет составлять примерно 10^{-29} кельвинов. Кого ни спроси, это очень мало.

И все же температура есть температура, и любая температура выше нуля допускает флуктуации. Когда мы принимаем во внимание квантовые эффекты в пространстве де Ситтера, Вселенная выглядит и ведет себя как контейнер с газом при фиксированной температуре, и эта ситуация сохранится навечно. Даже если в прошлом у нее случился впечатляющий Большой взрыв, будущее остается вечностью в условиях ультранизкой температуры, которая никогда не понижается до нуля. Следовательно, мы можем рассчитывать на бесконечное будущее, полное термических флуктуаций, — включая больцмановские мозги

и любые другие варианты термодинамически маловероятных конфигураций, которые только можно вообразить в вечном контейнере с газом.

А это означает, что *все проблемные аспекты сценария Больцмана — Локреция становятся проблемными аспектами реального мира*. Если подождать достаточно долго, то наша Вселенная будет опустошена. Она превратится в пространство де Ситтера, существующее при очень низкой температуре, и останется в этом состоянии навсегда. Периодически будут возникать случайные флуктуации теплового излучения, приводящие ко всевозможным маловероятным событиям, включая спонтанное образование галактик, планет и больцмановских мозгов. Шанс, что любое такое событие случится в конкретный момент времени, очень мал, но нам некуда торопиться — в нашем распоряжении целая вечность, так что любое допустимое событие рано или поздно произойдет. В этой Вселенной — *нашей* Вселенной, насколько мы можем судить, — подавляющее большинство математических физиков (или разумных наблюдателей любого другого типа) будут возникать из окружающего хаоса и обнаруживать себя дрейфующими в пространстве в полном одиночестве.²¹

Ускорение Вселенной было открыто в 1998 году. Физики-теоретики какое-то время не спеша обдумывали этот удивительный результат, прежде чем очевидной стала проблема с больцмановскими мозгами. Впервые она была рассмотрена в 2002 году Лайзой Дайсон, Мэтью Клебаном и Леонардом Сасскиндом в статье со зловещим названием «Тревожный подтекст космологической постоянной» (*Disturbing Implications of a Cosmological Constant*), а Андреас Альбрехт и Лоренцо Сорбо дополнили ее подробностями в своей статье 2004 года.²² Пока что до решения этой загадки нам все еще очень далеко. Самый простой выход из положения — считать, что темная энергия — это не космологическая постоянная, существующая на протяжении вечности, а истощающийся источник энергии, который угаснет задолго до того, как мы достигнем времени возвращения Пуанкаре. Правда, не совсем ясно, как такой источник может работать, поэтому строить обоснованные модели затухающей темной энергии оказывается весьма затруднительно.

Так что у загадки больцмановских мозгов — «Почему мы пребываем во Вселенной, постепенно эволюционирующей из состояния невероятно низкой энтропии, а не обнаруживаем себя в форме изолированных созданий, недавно флуктуировавших из окружающего хаоса?» — все еще нет очевидного ответа. Кроме того, стоит подчеркнуть, что данная загадка делает проблему стрелы времени значительно более значимой. До того как ученым удалось понять проблематику этой непростой ситуации, нас беспокоила лишь проблема тонкой подстройки: почему ранняя Вселенная обладала такой низкой энтропией?

Однако мы, по крайней мере, всегда могли пожать плечами и сказать: «Ну, просто потому, что такой она была, и никакого глубокомысленного объяснения этого явления не существует». А теперь нам этого уже недостаточно. В пространстве де Ситтера можно надежно предсказать, сколько раз за историю Вселенной (включая бесконечное будущее) наблюдатели будут появляться в окружении холодной и недружелюбной пустоты, а сколько — в комфортном окружении, полном звезд и галактик, и станет очевидно, что холодная и недружелюбная пустота — вариант чрезвычайно более вероятный. Это больше, чем неудобная тонкая подстройка; это прямое разногласие между теорией и наблюдением, а также знак, что нам еще есть над чем работать.

Примечания

- ¹ В XVIII веке Готфрид Вильгельм Лейбниц поставил Изначальный экзистенциальный вопрос: «Почему существует что-то, а не ничего?» (на что можно было бы ответить: «А почему бы, собственно, и нет?»). Впоследствии несколько философов пытались доказать, что само существование Вселенной должно казаться нам чем-то неожиданным и паразитическим, аргументируя это тем, что «ничто» проще «чего-то» (Swinburne, R. *The Existence of God*. Oxford: Oxford University Press, 2004). Однако это утверждение предполагает верным несколько сомнительное определение «пустоты», так же как и идею о том, что данный конкретный вариант простоты — это свойство, которым Вселенная просто обязана обладать. Ни опыт, ни логика ничего из этого не подтверждают и не гарантируют. Подробное обсуждение см. в работе Grünbaum, A. *The Poverty of Theistic Cosmology* // *British Journal for the Philosophy of Science*, 2004, 55, p. 561–614.
- ² Кто-то может утверждать, что роль Вселенской Курицы, которая создала Вселенную в низкоэнтропийном начальном состоянии, сыграл Бог. Это не кажется минимальным подходом к объяснению чего-либо, кроме того, совершенно неясно, почему энтропия должна была быть именно такой низкой, а также (помимо прочего) зачем было начинать Вселенную сотнями миллиардов галактик. Еще важнее то, что мы, будучи учеными, стремимся объяснять максимум, предполагая минимум, и если мы сумеем в итоге прийти к натуралистическим теориям, объясняющим низкую энтропию нашей наблюдаемой Вселенной, не прибегая к помощи ничего иного, помимо законов физики, это будет настоящим триумфом. История подтверждает, что данная стратегия всегда оказывается наиболее успешной; в противоположность этому, попытки указывать на «пробелы» в натуралистических объяснениях мира, заявляя, что только Бог способен их заполнить, приводят к довольно печальным результатам.
- ³ Это не совсем верно, хотя и близко к тому. Если определенный тип частиц очень слабо взаимодействует с остальной материей и излучением Вселенной, их взаимное влияние может в какой-то момент прекратиться, после чего этот тип частиц выпадет из окружающей равновесной конфигурации. Этот процесс называется «вымораживанием», и он чрезвычайно важен для космологов, например, когда у них возникает необходимость подсчитать распространенность частиц темной материи, которая, вероятно, выморозилась

в ранней Вселенной. В действительности материя и излучение поздней (сегодняшней) Вселенной выморозились уже очень давно, и наше состояние нельзя называть равновесным, даже если полностью игнорировать гравитацию. (Температура космического микроволнового фона составляет около 3 кельвинов, так что если бы мы находились в равновесии, то все вокруг нас пребывало бы при температуре около 3 кельвинов.)

- ⁴ Отношение скорости света к постоянной Хаббла определяет «длину Хаббла», которая в современной Вселенной равна 14 миллиардам световых лет. Для тех, кто не столь придирчиво относится к космологическим деталям, данная величина практически равна возрасту Вселенной, умноженному на скорость света, поэтому эти величины можно считать взаимозаменяемыми. Поскольку Вселенная в разные периоды времени расширяется с разной скоростью, текущий размер нашего сопутствующего объема может быть несколько больше длины Хаббла.
- ⁵ См., например, статью *Kofman, L., Linde, A., Mukhanov, V. Inflationary Theory and Alternative Cosmology // Journal of High Energy Physics, 2002, 0210, p. 57.* Она была написана в ответ на статью Голландса и Уолда (*Hollands, S., Wald, R. M. An Alternative to Inflation // General Relativity and Gravitation, 2002, 34, p. 2043–2055*), в которой поднимаются вопросы, схожие с теми, которые мы исследуем в данной главе, в узком контексте инфляционной космологии. Обсуждение на популярном уровне, придерживающееся схожей точки зрения, вы найдете в книге *Chaisson, E. J. Cosmic Evolution: The Rise of Complexity in Nature. Cambridge, MA: Harvard University Press, 2001.*
- ⁶ Действительно, Эрик Шнайдер и Дорион Саган (*Schneider, E. D., Sagan, D. Into the Cool: Energy Flow, Thermodynamics, and Life. Chicago: University of Chicago Press, 2005*) утверждали, что «смысл жизни» заключается в увеличении скорости производства энтропии путем сглаживания градиентов во Вселенной. Предположение, подобное этому, вряд ли может быть точным, и на то существует множество причин. Как минимум, хотя второе начало термодинамики утверждает, что энтропия стремится к увеличению, нет такого закона природы, согласно которому энтропия должна была бы увеличиваться с максимально возможной скоростью.
- ⁷ А также в противоположность гравитационным эффектам источников плотности энергии, отличных от «частиц». Эта лазейка важна для реального мира из-за присутствия в нем темной материи. Темная энергия — это не набор частиц; это однородное поле, распространяющееся на всю Вселенную, и его гравитационное воздействие заключается в том, что оно растакивает объекты. Никто и не говорил, что это будет просто.
- ⁸ Прочие подробности также важны. В ранней Вселенной обычная материя *ионизирована*: электроны способны перемещаться свободно, не будучи привязанными к атомным ядрам. Давление в ионизированной плазме обычно больше, чем внутри набора атомов.
- ⁹ *Penrose, R. The Road to Reality: A Complete Guide to the Laws of the Universe. New York: Knopf, 2005, p. 706.* Более раннюю версию этого рассуждения вы найдете в книге *Penrose, R. Singularities and Time-Asymmetry. В General Relativity, and Einstein Centenary Survey / S. W. Hawking, W. Israel (eds.), p. 581–638. Cambridge: Cambridge University Press, 1979.*
- ¹⁰ Большая часть материи во Вселенной — от 80 до 90 % ее общей массы — это темная материя, не состоящая из обычных атомов и молекул. Нам неизвестно, что такое темная материя, и существует гипотеза, что она имеет форму маленьких черных дыр. Но с этой идеей связаны определенные проблемы, включая, как минимум, то, что создать так много черных дыр чрезвычайно сложно. Поэтому большинство космологов все же склонны

верить, что темная материя, скорее всего, состоит из каких-то новых элементарных частиц (одного или нескольких видов), которые просто еще не были открыты.

- ¹¹ Энтропия черной дыры стремительно возрастает по мере того, как черная дыра набирает массу, — она пропорциональна квадрату массы черной дыры. (Энтропия шкалируется как площадь, которая пропорциональна квадрату радиуса, а радиус Шварцшильда пропорционален массе.) Таким образом, энтропия, которой обладала бы черная дыра массой в 10 миллионов солнечных масс, была бы в 100 раз больше, чем энтропия, обеспечиваемая одним миллионом солнечных масс.
- ¹² Penrose, R. *The Road to Reality: A Complete Guide to the Laws of the Universe*. New York: Knopf, 2005. 707 p.
- ¹³ Следующее разъяснение — это, по сути, выдержка из статьи, которую мы написали в сотрудничестве с Дженнифер Чен (*Carroll, S. M., Chen, J. Spontaneous Inflation and the Origin of the Arrow of Time* (2004). <http://arxiv.org/abs/hep-th/0410270>).
- ¹⁴ См., например, статью Zurek, W. H. *Entropy Evaporated by a Black Hole // Physical Review Letters*, 1982, 49, p. 1683–1686.
- ¹⁵ Кроме того, это утверждение совсем не из тех, с которыми безоговорочно соглашаются все физики. Я не говорю, что существует какой-то другой общепринятый ответ на вопрос: «Как выглядят состояния с самой высокой энтропией, когда в расчет также принимается гравитация?» помимо «Мы не знаем». Но, надеюсь, мне удалось убедить вас, что «пустое пространство» — это наилучший вариант среди тех, что имеются в нашем распоряжении в настоящее время.
- ¹⁶ Немного забегу вперед: обратите внимание на то, что в эту игру можно играть также, повернув время вспять. Пусть вначале у нас есть какая-то конфигурация материи во Вселенной, срез пространства—времени в какой-то момент времени. В одних местах мы видим расширение и разреживание, а в других — сжатие, коллапс и в конце концов испарение. И мы спрашиваем, что произойдет, если проэволюционировать это «начальное» в обратном направлении во времени, используя все те же обратимые законы физики. Ответ, разумеется, таков: мы обнаружим тот же самый тип поведения. Области, расширяющиеся по направлению к будущему, сжимаются по направлению к прошлому, и наоборот. Однако в конечном итоге пространство все равно будет опустошено, когда «расширяющиеся» области одержат победу. Очень далекое прошлое выглядит точно так же, как очень далекое будущее: это пустое пространство.
- ¹⁷ Здесь, в нашей ближайшей окрестности, NASA нередко применяет схожий трюк — «гравитационный маневр» — для придания дополнительной скорости космическим зондам, которые направляются к удаленным объектам нашей Солнечной системы. Если космический летательный аппарат маневрирует специальным образом возле массивной планеты, он может «подхватить» часть энергии движения этой планеты. Планета настолько велика, что для нее такая потеря абсолютно незаметна, но космический аппарат может продолжать движение с намного более высокой скоростью.
- ¹⁸ Wald, R. W. *Asymptotic Behavior of Homogeneous Cosmological Models in the Presence of a Positive Cosmological Constant // Physical Review*, 1983, D 28, p. 2118–2120.
- ¹⁹ В частности, мы можем определить «горизонт» вокруг каждого наблюдаемого участка пространства де Ситтера, так же как делали это для черных дыр. Тогда формула энтропии для этого участка полностью совпадет с формулой энтропии черной дыры — это площадь поверхности такого горизонта в планковских единицах, деленная на четыре.

- ²⁰ Если H — это параметр Хаббла в пространстве де Ситтера, то температура равна $T = \frac{\hbar}{2\pi k} H$, где \hbar — постоянная Планка, а k — постоянная Больцмана. Впервые это соотношение было выведено Гэри Гиббонсом и Стивеном Хокингом (1977).
- ²¹ Возможно, вам кажется, что это слишком смелое предсказание, основанное на неточной экстраполяции в режимы применения физики, которые мы в действительности не совсем понимаем. Никто не спорит с тем, что у нас действительно нет прямого экспериментального доступа к вечной Вселенной де Ситтера, но обрисованный выше сценарий основывается лишь на паре довольно надежных принципов: существование теплового излучения в пространстве де Ситтера и относительная частота появления различных видов случайных флуктуаций. В частности, любопытно было бы поставить вопрос, является ли тип флуктуаций, порождающих Большой взрыв, каким-то особенным и может ли быть так, что подобный тип флуктуаций более вероятен, чем флуктуация, порождающая бальцмановский мозг. Не исключено, что так действительно происходит согласно окончательным, самым правильным законам физики, — и мы сделаем предположение в этом стиле чуть далее в этой книге, — но это абсолютно точно не то, что может быть при условиях, которые мы здесь предполагаем. Что приятно в термодинамических флуктуациях в вечном пространстве де Ситтера, так это то, что мы очень хорошо в них разбираемся и можем точно рассчитать, как часто будут происходить те или иные флуктуации. В частности, флуктуации, предполагающие серьезные изменения энтропии, несоизмеримо менее вероятны, чем флуктуации, ведущие лишь к незначительному ее изменению. Всегда будет проще флуктуировать в мозг, чем во Вселенную, если только не случится какого-то значительного отклонения от вышеописанного сценария.
- ²² Dyson, L., Kleban, M., Susskind, L. Disturbing Implications of a Cosmological Constant // *Journal of High Energy Physics*, 2002, 210, p. 11; Albrecht, A., Sorbo, L. Can the Universe Afford Inflation? // *Physical Review*, D 70, 2004, p. 63528.

Глава 14

Инфляция и Мультипенная

Считающие метафизику самой неограниченной или умозрительной из дисциплин заблуждаются; по сравнению с космологией метафизика заурядна и обыденна.

Стивен Тулмин¹

Прохладным декабрьским утром 1979 года в Пало Альто Алан Гут что есть силы крутил педали велосипеда, спеша в свой офис в группе теоретической физики в SLAC, Стэнфордском центре линейных ускорителей. Добравшись до рабочего стола, он открыл блокнот на новой странице и написал:

ПОТЯСАЮЩАЯ ДОГАДКА: подобный тип переохлаждения может объяснить, почему Вселенная сегодня такая невероятно плоская, — и, следовательно, разрешить парадокс тонкой подстройки, который Боб Дике описал в своих лекциях на дне Эйнштейна.

Он аккуратно обвел эти слова прямоугольной рамкой. Затем еще одной.²

Будучи ученым, вы живете ради того дня, когда вам удастся добиться результата — это может быть теоретическая догадка или экспериментальное открытие — настолько изумительного, что он заслуживает быть обведенным рамкой. В редких случаях результат достоин двойной рамки — обычно он в корне меняет жизнь человека, а заодно и направление хода научной мысли. Как пишет сам Гут, других результатов, которые следовало бы обвести двойной рамкой, в его блокнотах нет. А тот блокнот, которым он пользовался во времена работы в SLAC, теперь входит в экспозицию планетария Адлера в Чикаго, раскрытый на странице с процитированной выше записью.

Гут напал на след сценария, сегодня известного под названием «инфляция». Суть идеи в том, что ранняя Вселенная была заполнена временной формой темной энергии с ультравысокой плотностью, что заставляло пространство ускользаться в невероятном темпе (упомянутое выше «переохлаждение»). Это простое предположение способно дать объяснение практически всему, что касается условий, наблюдаемых в нашей ранней Вселенной, — от геометрии пространства до распределения возмущений плотности в космическом микроволновом излучении. И хотя мы пока не располагаем окончательными доказательствами того, что инфляция на самом деле происходила, эта идея, возможно, оказалась самой

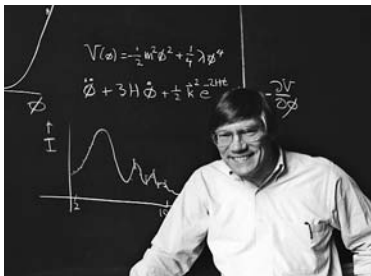


Рис. 14.1. Алан Гут, чей сценарий инфляционной Вселенной может помочь в объяснении, почему наша наблюдаемая Вселенная так близка к однородному и плоскому состоянию

влиятельной в космологии за последние несколько десятилетий.³

Из этого, конечно же, не следует ее истинность. Если в ранней Вселенной в течение какого-то периода времени доминировала темная энергия с высокой плотностью, то можно понять, почему Вселенная эволюционировала именно в то состояние, в котором она, очевидно, находилась в ранние годы. Однако мы подвергаем себя опасности упустить из виду важный вопрос: почему Вселенная вообще находилась под властью темной энергии? Инфляция сама по себе не дает

никакого ответа на загадку, почему энтропия в ранней Вселенной была низкой, за исключением предположения, что при зарождении Вселенной энтропия была еще ниже (что вполне может оказаться небольшим жульничеством).

Тем не менее инфляция — это невероятно привлекательная идея, хорошо согласующаяся с наблюдаемыми свойствами нашей ранней Вселенной. И благодаря ей мы пришли к определенным удивительным выводам, которые не предвидел даже сам Гут, когда впервые предложил этот сценарий, — включая, как мы скоро узнаем, способ придать реалистичность идее Мультиленной. По мнению большинства работающих в настоящее время космологов, та или иная версия инфляционной теории, скорее всего, окажется в итоге правильной. Единственный вопрос — почему инфляция вообще происходила?

Кривизна пространства

Представьте себе, что вы взяли карандаш и пытаетесь поставить его на кончик грифеля. Очевидно, что он сразу же начнет падать. Но если бы в вашем распоряжении была чрезвычайно устойчивая поверхность, а вы были бы настоящим мастером балансировки, то вы бы могли установить эту конструкцию так, чтобы карандаш оставался в вертикальном положении очень долгое время. Скажем, более 14 миллиардов лет.

Этот пример хорошо иллюстрирует нашу Вселенную, а карандаш представляет такую ее характеристику, как *кривизна пространства*. В действительности это не самое запутанное понятие, но космологи зачастую искусственно усложняют его, говоря то о «кривизне пространства—времени», то о «кри-

визне пространства». Это разные вещи, и нам приходится каждый раз из контекста догадываться, что именно имелось в виду. Так же как пространство— время может обладать кривизной, кривизна может быть и у пространства самого по себе, и вопрос о том, искривлено ли пространство, абсолютно не связан с вопросом искривленности пространства—времени.⁴

Одна из проблем, которые потенциально могут всплыть при обсуждении кривизны пространства самого по себе, заключается в том, что общая теория относительности предоставляет нам возможность нарезать пространство— время на трехмерные копии эволюционирующего во времени пространства множеством разных способов; определение «пространства» не уникально. К счастью, в нашей наблюдаемой Вселенной существует естественный вариант подобной нарезки: мы определяем «время» так, чтобы плотность материи оставалась приблизительно одинаковой в пространстве на больших масштабах, но уменьшалась по мере расширения Вселенной. Другими словами, распределение материи определяет естественную покоящуюся систему координат во Вселенной. Это ни в коем случае не нарушает принципы относительности, так как отражает свойства одной конкретной конфигурации материи, а не базовые законы физики.

В целом пространство может совершенно произвольным способом искривляться в разных точках, и для того чтобы справиться с математикой, описывающей искривление, была разработана особая дисциплина, носящая название дифференциальной геометрии. Но космологам повезло: пространство при рассмотрении очень больших расстояний является однородным и выглядит одинаково во всех направлениях. В такой ситуации достаточно указать одно значение — «пространственную кривизну», чтобы узнать все необходимое о геометрии трехмерного пространства. Кривизна пространства может выражаться положительным числом, отрицательным числом или быть равной нулю. Если кривизна равна нулю, то мы, естественно, говорим, что пространство «плоское» и обладает всеми геометрическими характеристиками в привычном для нас понимании. Эти характеристики впервые были сформулированы Эвклидом и включают такие свойства, как «параллельные линии никогда не пересекаются» и «сумма углов треугольника равна в точности 180 градусам». Если кривизна положительна, то пространство напоминает поверхность сферы, — за исключением того, что оно трехмерно. Линии, параллельные на каком-то участке, в конечном счете пересекутся, а сумма углов треугольника *превышает* 180 градусов. Если же кривизна отрицательная, то пространство похоже на седло или картофельные чипсы. Линии, параллельные на каком-то участке, расходятся в стороны, а сумма углов треугольника — ну, вы, вероятно, уже догадались.⁵

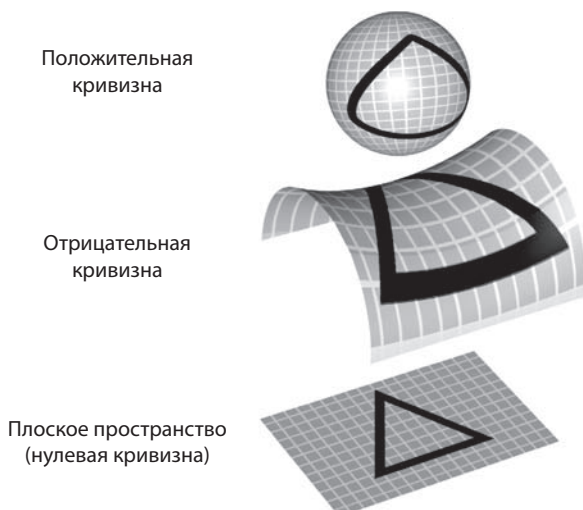


Рис. 14.2. Варианты пространств с постоянной кривизной. Сверху вниз: положительная кривизна, как на сфере; отрицательная кривизна, как на седле; нулевая кривизна, как на плоской поверхности

Согласно правилам общей теории относительности, если при рождении Вселенная была плоской, то она остается плоской. Если она появилась в искривленном состоянии, то кривизна постепенно, по мере расширения Вселенной, уменьшается. Однако, как мы уже знаем, плотность материи и излучения также уменьшается. (Пока позабудьте даже о том, что вы когда-либо слышали такой термин, как темная энергия, потому что она все ставит с ног на голову.) Написав уравнения, можно убедиться, что плотность материи или излучения уменьшается *быстрее*, чем вклад кривизны пространства. По сравнению с материей и излучением кривизна по мере расширения Вселенной оказывает все большее влияние на эволюцию Вселенной.

Следовательно, если в ранней Вселенной присутствовал хоть сколько-нибудь заметный вклад кривизны, сегодня искривленность Вселенной должна быть очевидной. Плоская Вселенная подобна карандашу, поставленному на кончик грифеля: малейшее отклонение влево или вправо моментально приведет к падению карандаша. Схожим образом, любое мельчайшее отклонение от идеальной плоскостности в ранние годы должно с годами становиться все более и более заметным. Но наблюдения показывают, что Вселенная выглядит очень плоской. Насколько можно судить, никакой поддающейся измерению кривизны в современной Вселенной не наблюдается.⁶

Такое состояние дел известно под названием *проблемы плоскостности*. Раз Вселенная настолько плоская сегодня, она должна была быть невероятно плоской и в прошлом. Но почему?

Проблема плоскостности имеет определенное сходство с проблемой энтропии, которую мы разбирали в предыдущей главе. В обоих случаях загвоздка не в ужасающем несоответствии между теорией и наблюдением — нам достаточно постулировать, что ранняя Вселенная пребывала в какой-то определенной форме, и тогда головоломка прекрасно складывается. Проблема в том, что «определенная форма» создает впечатление формы неестественной и принудительно тонко подстроенной, причем без всяких очевидных на то причин. Конечно, мы могли бы сказать, что и энтропия и пространственная кривизна ранней Вселенной были малы, и на этом закончить историю безо всяких дополнительных объяснений. Но эти очевидно неестественные свойства Вселенной могут быть ключом к чему-то важному, поэтому надлежит относиться к ним со всей серьезностью.

Магнитные монополи

Когда Алан Гут наткнулся на идею инфляции, он не пытался решить проблему плоскостности. Его интересовала совершенно другая загадка, известная под названием *проблемы магнитных монополей*.

Гут, если уж на то пошло, космологией вообще особенно не интересовался. 1979 год был для него девятым годом постдоктората — фазы научной карьеры между аспирантурой и вхождением в преподавательский состав высшего учебного заведения, когда ученый может сконцентрироваться на исследованиях, не беспокоясь о преподавании и прочих академических обязанностях. (И без каких-либо гарантий обеспечения работой; большинство постдоков так никогда и не получают место на факультете и в конце концов уходят с научной арены.) Девять лет — это больше, чем талантливому постдоку, как правило, требуется, чтобы получить где-то должность доцента, но и история публикаций Гута на том этапе его карьеры не отражала дарования, которое в нем видели другие. Какое-то время он трудился над вставшей в общественную немилость теорией кварков, а затем переключился на попытки понять невнятное предсказание недавно ставших популярными теорий великого объединения — о существовании магнитных монополей.

Теории великого объединения (Grand Unified Theories, GUT) представляют собой попытку унифицированного объяснения всех сил природы, за исключением гравитации. Они завоевали большую популярность в 1970-х годах

как благодаря присущей им простоте, так и за счет весьма интригующего предсказания, согласно которому протон, непоколебимая элементарная частица, которая (совместно с электроном и нейтроном) формирует основу для всей окружающей нас материи, в конце концов распадается на более легкие частицы. Для поиска доказательств протонного радиоактивного распада были построены гигантские лаборатории, но пока никаких свидетельств этого явления обнаружено не было. Это не означает, что теории великого объединения неверны; они все еще довольно популярны, но неудача с обнаружением протонного распада заставила физиков погрузиться в сомнения относительно того, каким же образом эти теории могут быть проверены.

Также теории великого объединения предсказали существование нового типа частиц — магнитного монополя. Обычные заряженные частицы — это электрические монополи, то есть они несут либо положительный заряд, либо отрицательный, и на этом история заканчивается. Никому еще не удалось обнаружить изолированный «магнитный заряд» в природе. Магниты, как мы их знаем, всегда остаются диполями: у них есть северный и южный полюсы. Разрежьте магнит пополам между полюсами, и в месте разреза появятся два новых полюса. Насколько можно судить по результатам экспериментов, поиск изолированного магнитного полюса — монополя — это практически то же самое, что поиск фрагмента струны только с одним концом.

Однако, согласно теориям великого объединения, монополи должны быть реальными. В конце 1970-х годов люди осознали, что можно просто сесть и подсчитать число монополей, которые должны быть рождены в результате Большого взрыва. И ответ оказался таков: их слишком много. Общая масса монополей, согласно этим расчетам, должна оказаться намного выше общей массы обычных протонов, нейтронов и электронов. Магнитные монополи должны постоянно пролетать сквозь ваше тело.

Конечно же, из этой затруднительной ситуации можно выпутаться довольно простым способом, заявив, что теории великого объединения ошибочны. И это может быть верным ответом. Но Гут, размышляя над данной проблемой, наткнулся на куда более интересную идею: инфляцию.

Инфляция

Темная энергия — источник плотности энергии, остающейся практически (или точно) постоянной на всем протяжении пространства и времени, не разреживаясь по мере расширения Вселенной, — заставляет Вселенную ускоряться, постоянно подталкивая расширение. Мы полагаем, что большая

часть энергии во Вселенной — от 70 до 75 % общей энергии — в настоящее время пребывает в форме темной энергии. Но в прошлом, когда плотность материи и излучения была выше, темная энергия, обладавшая, судя по всему, примерно такой же плотностью, как и сегодня, играла относительно незначительную роль.

Теперь вообразите, что в какой-то другой период жизни очень ранней Вселенной существовала темная энергия с еще большей плотностью энергии. Назовем эту необычайно плотную темную энергию «темной суперэнергией».⁷ Она доминировала во Вселенной и заставляла пространство ускоряться в колоссальном темпе. Затем — по причинам, которые будут названы позже, — эта темная суперэнергия внезапно распалась на материю и излучение, а те в свою очередь сформировали горячую плазму, из которой, по нашим представлениям, состояла ранняя Вселенная. Распад оказался почти полным, но все же относительно небольшая плотность темной энергии сохранилась, и в последнее время этот остаток начал существенно влиять на динамику Вселенной.

Таков сценарий инфляции. По сути, инфляция начинается в крохотной области пространства и раздувает ее до невероятных размеров. Возможно, вы зададитесь вопросом, почему это так важно: что такого необычного во временной фазе темной суперэнергии, если она просто-напросто распадается на материю и излучение? Популярность инфляционной идеи объясняется тем, что она аналогична исповеди — полностью стирает все прошлые грехи.

Вернемся к проблеме монополей. Если теории великого объединения верны, то монополи возникают в огромном количестве в самый ранний период жизни Вселенной. Итак, представим себе, что инфляция происходит довольно

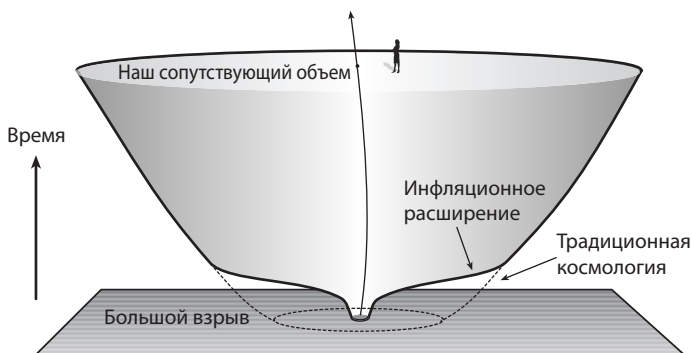


Рис. 14.3. Инфляция начинается в крохотном участке пространства и быстро расширяет его до громадных размеров. На этом рисунке масштаб абсолютно не соблюден; инфляция происходит за ничтожно малую долю секунды и растягивает пространство более чем в 10^{26} раз

рано, но все же после возникновения монополей. В этом случае, если инфляция продолжается достаточно долго, пространство увеличивается до такого невероятного размера, что концентрация монополей уменьшается практически до нуля. При условии, что распад темной суперэнергии на материю и излучение не порождает дополнительных монополей (а этого не произойдет, если процесс не слишком энергетически эффективный), вуаля! — никакой проблемы монополей не остается.

То же самое и с кривизной пространства. По сути, проблема состояла в том, что кривизна падает намного медленнее, чем разреживаются материя и излучение, поэтому если хоть какая-то кривизна существовала в ранний период, она была бы хорошо заметна сегодня. Но темная энергия разреживается еще медленнее, чем кривизна, — на самом деле ее плотность вообще почти не уменьшается. Так что опять мы заключаем, что если инфляция займет достаточно много времени, то кривизна успеет уменьшиться почти до нуля, прежде чем материя и излучение будут заново созданы в процессе распада темной суперэнергии. Никакой больше проблемы плоскостности.

Вы понимаете, почему инфляционная идея так взволновала Гута. Он размышлял о проблеме монополей, но с другой точки зрения — пытаюсь не решить ее, а использовать в качестве аргумента против теорий великого объединения. В своей исходной работе, посвященной данной проблеме и написанной в соавторстве с физиком из Корнелльского университета Генри Таем, он вообще проигнорировал возможную роль темной энергии и заключил, что решить проблему монополей чрезвычайно сложно. Однако стоило Гуту как следует задуматься о возможных эффектах раннего периода доминирования темной энергии, как решение проблемы монополей упало к нему в руки в готовом виде, — одно это заслуживает рамки, по крайней мере одинарной.

Необходимость добавить вторую рамочку стала очевидной, когда Гут понял, что данная идея также способна решить проблему плоскостности, о которой он до этого даже не думал. Совершенно случайно чуть раньше Гут посетил лекцию физика из Принстонского университета Роберта Дике, одного из первых ученых, занявшихся исследованием космического микроволнового фонового излучения. В своей лекции, прочитанной в Корнелльском университете в рамках мероприятия под названием «день Эйнштейна», Дике упомянул о нескольких невыясненных вопросах традиционной космологической модели. Одним из них была проблема плоскостности, которая врезалась в память Гуту, несмотря на то что его исследования в то время не были особо связаны с космологией.

В результате, осознав, что инфляция решает не только проблему монополей, но и проблему плоскостности, Гут ясно увидел перспективы поистине велико-

го открытия. И действительно, благодаря этому открытию Гут, можно сказать, проснулся знаменитым, превратившись из едва сводящего концы с концами постдока в самого желанного кандидата на рынке профессорских вакансий. В итоге он решил вернуться в МИТ, где заканчивал аспирантуру, и по сей день он преподает в этом учебном заведении.

Проблема горизонта

Прорабатывая следствия инфляционной теории, Гут осознал, что данный сценарий предлагает решение еще одной загадки космологической тонкой подстройки — *проблемы горизонта*. И это на самом деле очень важно, так как, по мнению многих ученых, проблема горизонта — самая запутанная и требующая наибольшего внимания в стандартной космологии Большого взрыва.

Эта проблема произрастает из того простого факта, что ранняя Вселенная выглядит практически одинаково во всех точках, как бы далеко они ни были разнесены. В предыдущей главе мы упомянули о том, что «типичное» состояние ранней Вселенной, даже если зафиксировать невероятную плотность и стремительное расширение, проявляет тенденцию к разнообразным флуктуациям и возникновению неоднородностей — оно должно напоминать состояние сжимающейся Вселенной с обращенным временем. Так что однородность Вселенной является как раз тем свойством, которое необходимо объяснить. Можно сказать, что проблема горизонта — это в действительности отражение проблемы энтропии в том виде, как мы рассматривали ее выше, несмотря на то что решается проблема горизонта обычно совершенно другим способом.

Мы знаем, что такое горизонт в контексте черных дыр, — это такая область, попав в которую мы никогда уже не сможем вернуться во внешний мир. Или, если точнее, сможем, но только если начнем перемещаться со скоростью выше скорости света. Однако в стандартной модели Большого взрыва существует совершенно особое понятие горизонта, базирующееся на том факте, что Большой взрыв произошел конечное время тому назад. Это «космологический горизонт», в противоположность «горизонту событий» вокруг черной дыры. Нарисуем направленный в прошлое световой конус из нашего текущего местоположения в пространстве—времени; в далеком прошлом этот световой конус пересечется с началом Вселенной. Рассмотрим теперь мировую линию частицы, родившейся при Большом взрыве за пределами нашего светового конуса: никакой сигнал с этой мировой линии никогда не сможет достичь нашего текущего события (если только его скорость не превысит скорость света).

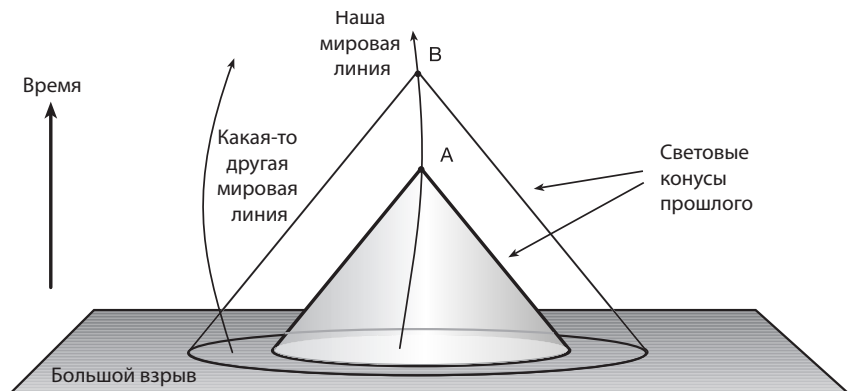


Рис. 14.4. Космологический горизонт определяется как область, на границе которой наш световой конус прошлого встречается с Большим взрывом. По мере того как мы продвигаемся вперед во времени, наш горизонт увеличивается. Мировая линия, находившаяся за пределами нашего горизонта в момент А, оказывается внутри горизонта, когда мы достигаем момента В

Следовательно, можно сказать, что такая частица находится за пределами нашего космологического горизонта, как показано на рис. 14.4.

Все это хорошо и прекрасно, но самое интересное начинается тогда, когда мы понимаем, что в отличие от горизонта событий статической черной дыры наш космологический горизонт со временем, по мере того как мы продвигаемся вдоль нашей мировой линии, увеличивается. Чем старше мы становимся, тем больше пространства—времени охватывает наш световой конус прошлого, и мировые линии других частиц, которые раньше находились снаружи, попадают внутрь нашего горизонта. (Сами мировые линии не меняются — наш горизонт расширяется и захватывает их тоже.)

Следовательно, у событий, оставшихся далеко в прошлом, космологические горизонты меньше; они ближе (по времени) к Большому взрыву, поэтому их прошлое содержит меньше событий. Рассмотрим разные точки, наблюдаемые при изучении космического микроволнового фонового излучения на противоположных сторонах неба, как показано на рис. 14.5. Микроволновое фоновое излучение позволяет нам увидеть изображение Вселенной на момент около 380 000 лет после Большого взрыва. Тогда Вселенная стала прозрачной: температура понизилась достаточно, для того чтобы электроны и протоны могли связаться в атомы. В зависимости от локальных условий в выбранных нами точках — плотности, скорости расширения и т. д. — сегодня для нас они могли бы выглядеть совершенно по-разному. Но не выглядят. Насколько мы

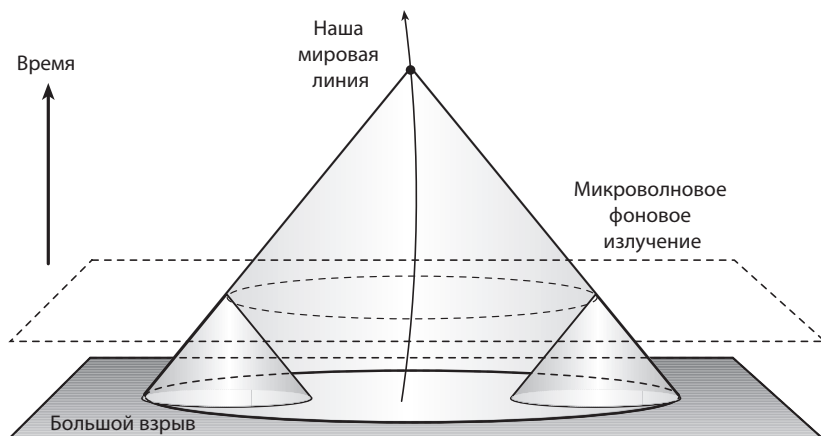


Рис. 14.5. Проблема горизонта. Мы смотрим на точки космического микроволнового фонового излучения, находящиеся очень далеко друг от друга, и замечаем, что их температура почти одинакова. Но горизонты этих точек не пересекаются, поэтому никакие сигналы пройти между ними не могли. Как же эти точки умудрились прийти к одной и той же температуре?

видим, все точки на микроволновом небе имеют почти одинаковую температуру; от одной области к другой температура может различаться лишь на тысячную долю процента. Следовательно, физические условия во всем этом множестве точек должны были быть достаточно схожими.

Именно в этом и заключается суть проблемы горизонта: как эти разнесенные далеко в стороны точки *узнали*, к какому общему состоянию им нужно прийти? Несмотря на то что все они находятся в пределах нашего космологического горизонта, их собственные горизонты куда меньше, поскольку сами точки намного ближе к Большому взрыву. Сегодня вычисление размера космологических горизонтов для подобных точек (в предположениях традиционной модели Большого взрыва) — стандартное упражнение для аспирантов, изучающих космологию; и ответ таков, что у точек, расстояние между которыми на небе составляет более одного градуса, горизонты вообще не пересекаются. Другими словами, в пространстве—времени нет таких событий, которые бы принадлежали прошлому всех этих разных точек, и не существует способа, при помощи которого они могли бы обмениваться какими-либо сигналами.⁸ Тем не менее физические условия во всех них практически идентичны. Как такое возможно?

Это сравнимо с тем, как если бы вы попросили несколько тысяч людей выбрать случайное число от единицы до миллиона и все они назвали числа между

836 820 и 836 830. Вы были бы уверены, что это не простая случайность, — что каким-то образом все эти люди сговорились между собой. Но как? Это проблема горизонта. Как вы видите, она тесно связана с проблемой энтропии. Когда во всей ранней Вселенной, куда ни посмотри, наблюдаются чрезвычайно схожие условия, это, определенно, низкоэнтропийная конфигурация, так как число способов устроить это крайне ограничено.

Инфляция предлагает изящное решение проблемы горизонта. В эру инфляции пространство расширяется невероятно сильно; точки, которые изначально находились довольно близко друг к другу, разнесутся очень далеко. В частности, точки, между которыми было огромное расстояние на момент, когда сформировалось микроволновое фоновое излучение, до начала инфляции, находились вплотную друг к другу, — и это ответ на вопрос: «Как они узнали о схожих условиях?». Что еще важнее, во время инфляции во Вселенной доминировала темная суперэнергия, которая, как и любая другая форма темной энергии, обладает везде одинаковой плотностью. Возможно, на участке пространства, где началась инфляция, существовали и другие формы энергии, но они быстро рассеялись в расширяющемся пространстве; раздувая пространство, инфляция делает его плоским — так вы расправляете скомканную простыню, растягивая ее в стороны за уголки. Естественным результатом инфляции является Вселенная, выглядящая очень однородной на больших масштабах.

Истинный и ложный вакуумы

Инфляция — это простой механизм объяснения свойств ранней Вселенной: она растягивает небольшой участок пространства, делая его плоским и гладким и решая таким образом проблемы плоскостности и горизонта. Кроме того, она избавляет нас от нежелательных пережитков прошлого, таких как магнитные монополи. Но как это все в действительности работает?

Очевидно, что фокус с инфляцией зависит от наличия временной формы темной суперэнергии, которая в течение какого-то времени стимулирует расширение Вселенной, а затем внезапно исчезает. Такое поведение может казаться нелогичным, ведь определяющим свойством темной энергии является почти полное ее постоянство в пространстве и времени. По большей части это действительно так, но могут также происходить неожиданные скачки ее плотности — «фазовые переходы», при которых значение темной энергии резко падает, как при схлопывании пузыря. Фазовый переход подобного рода предоставляет секретный ключик к пониманию инфляции.

Возможно, вы задаетесь вопросом, что же в конце концов порождает эту темную суперэнергию, стимулирующую инфляцию. Ответ — квантовое поле, точно такое же, как поля, вибрации которых обнаруживаются в форме окружающих нас частиц. К сожалению, ни одно из известных нам полей — поле нейтрино, электромагнитное поле и т. д. — не подходит для этой работы. Так что космологи попросту предположили, что должно существовать какое-то совершенно новое поле, приводящее к инфляции, и недолго думая нарекли его «инфлатоном». Придумывать новые поля на пустом месте — занятие не настолько постыдное, как может показаться; правда в том, что инфляция предположительно происходит при энергиях, намного превышающих те, которые мы в состоянии напрямую воссоздать в лабораторных условиях здесь, на Земле. Без сомнения, при таких энергиях может существовать любое количество новых полей, пусть даже мы не знаем, что это за поля; вопрос только в том, обладают ли какие-либо из них подходящими свойствами, чтобы выполнить функции инфлатона (то есть инициировать временную фазу темной суперэнергии, которая расширяет Вселенную до невероятных размеров, а затем распадается и исчезает).

Пока в наших обсуждениях квантовых полей мы делали акцент на том, что вибрации этих полей порождают частицы. Если поле везде постоянно, а вибрации отсутствуют, то мы и не видим никаких частиц. Если бы нас беспокоили исключительно частицы, то фоновое значение поля — среднее значение, которое оно принимает, если вообразить, что все вибрации сглажены, — не играло бы никакой роли, так как оно не поддается непосредственному наблюдению. Однако фоновое значение поля можно измерить *косвенно*: в частности, оно способно нести энергию и, следовательно, влиять на кривизну пространства—времени.

Энергия, связанная с полем, может возникать разными способами. Обычно она связана с тем, что от одной точки пространства—времени к другой поле меняется; это энергия растяжения, соответствующая меняющимся значениям поля, подобно тому как существует энергия, связанная со скручиваниями и вибрациями резинового листа. Но в дополнение к этому поля способны обладать энергией даже тогда, когда они просто принимают постоянное значение, без каких-либо колебаний. Такой тип энергии, соответствующий самому значению поля, а не его изменениям от одной точки пространства к другой или от одного момента времени к другому, называется потенциальной энергией. Совершенно плоский резиновый лист обладает большей энергией тогда, когда он поднят высоко над землей, чем в том случае, когда он лежит на ее поверхности; мы знаем это, потому что можем извлечь эту энергию, взяв лист и бросив

его вниз. Потенциальная энергия может быть преобразована в другие виды энергии.

В ситуации с резиновым листом (или с любым другим объектом, находящимся в гравитационном поле Земли) потенциальная энергия ведет себя достаточно прямолинейно: чем выше мы подняли объект, тем выше его потенциальная энергия. Однако с полями все намного сложнее. Если вы изобретаете новую теорию физики элементарных частиц, то вам необходимо задать зависимость потенциальной энергии от значения каждого поля. Базовых правил, которыми вы могли бы руководствоваться, не так много; просто каждому возможному значению каждого поля присваивается некоторое значение потенциальной энергии, и это часть формулировки теории. На рис. 14.6 показан пример потенциальной энергии какого-то гипотетического поля как функции значения поля.

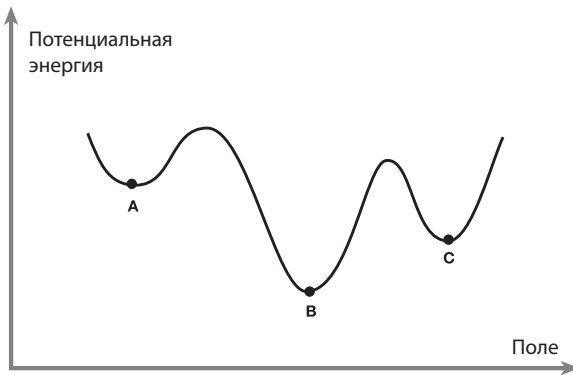


Рис. 14.6. Изменение потенциальной энергии в зависимости от фонового значения какого-то гипотетического поля, например инфлатона. Поля стремятся к тому, чтобы скатываться в нижние точки энергетической кривой; на данном графике точки A, B и C представляют разные фазы, в которых может находиться вакуум. Самое низкое значение энергии в фазе B, так что это «истинный вакуум», тогда как A и C — это «ложные вакуумы»

Поле, у которого нет ничего, кроме потенциальной энергии (ни вибраций, ни движения, ни скручивания), просто существует, не изменяясь. Следовательно, его потенциальная энергия на кубический сантиметр остается постоянной, даже если Вселенная расширяется. Мы понимаем, что это значит: это энергия вакуума. (Точнее, это один из многих возможных вкладов в полную энергию вакуума.) Поле можно представлять себе как мяч, катящийся вниз по склону холма; он стремится к тому, чтобы остановиться в покое во впадине между

холмами, где значение энергии ниже всего, — по крайней мере, ниже, чем любое другое соседнее значение. Разумеется, возможны и другие значения поля, которым соответствует еще более низкая энергия, но эти, более глубокие «впадины» разделены «холмами». На рис. 14.6 поле может счастливо жить при любом значении: А, В или С, но только в точке В энергия на самом деле минимальна. Значения А и С известны как «ложные вакуумы», и они кажутся состояниями с самой низкой энергией лишь тогда, когда для сравнения вы берете только соседние значения. «Истинный вакуум», где энергия на самом деле меньше всего, — это В. (Для физика «вакуум» — это не упражнение для укрепления брюшного пресса и даже не обязательно «пустое пространство». Это просто «состояние теории с самой низкой энергией». Посмотрите на кривую потенциальной энергии для какого-то поля: дно каждой впадины соответствует отдельному вакуумному состоянию.)

Гут совместил эти идеи в своем сценарии инфляционной Вселенной. Вообразите, что гипотетическое поле инфлатона пребывает в точке А, в одном из ложных вакуумов. Поле вносит существенный вклад в энергию вакуума, вследствие чего Вселенная ускоренно расширяется. Теперь нам остается лишь объяснить, как поле сумело переместиться из ложного вакуума А в истинный вакуум В, в котором мы сейчас живем, — как случился этот фазовый переход, превращающий энергию, запертую в поле, в обычную материю и излучение. Изначально Гут предположил, что это произошло, когда в ложном вакууме появились пузыри истинного вакуума, которые затем увеличились и, столкнувшись с другими пузырями, заполнили все пространство. Как выясняется, такой вариант, известный сегодня под названием старой инфляции, не работает; переход случается либо слишком быстро, и тогда инфляционного расширения не хватает, либо слишком медленно, и тогда инфляция никогда не заканчивается.

К счастью, вскоре после публикации первоначальной статьи Гута было сделано альтернативное предположение: представьте себе, что инфляция не застряла во «впадине» ложного вакуума, а начинается на возвышенном плато — длинном и почти плоском. Поле медленно катится вниз по плато, сохраняя почти постоянную энергию, и в конце концов падает с обрыва (фазовый переход). Это называется новой инфляцией, и в настоящее время это самая популярная среди космологов реализация идеи инфлатирующей Вселенной.⁹

Однако этим дело не ограничивается. Помимо решения проблем горизонта, плоскостности и монополей, к инфляции также прилагается совершенно неожиданный бонус: она способна объяснить истоки небольших флуктуаций плотности ранней Вселенной, которые впоследствии выросли в звезды и галактики.



Рис. 14.7. Кривая потенциальной энергии, соответствующая «новой инфляции». Поле никогда не застревает во впадине, а просто очень медленно катится вниз с возвышенного плато, прежде чем рухнуть в минимум. Плотность энергии в течение этой фазы не постоянна, но близка к тому

Механизм прост и неизбежен: квантовые флуктуации. Инфляция старается изо всех сил, для того чтобы сделать Вселенную как можно более однородной, но ей не преодолеть фундаментальный предел, определяемый квантовой механикой. Конфигурация не может стать *слишком* однородной, иначе мы нарушим принцип неопределенности Гейзенберга, описав состояние Вселенной слишком точно. Неизбежная квантовая нечеткость в плотности энергии от места к месту во время инфляции оставляет свой отпечаток на плотности материи и излучения, в которые инфляция преобразуется, а это можно перевести в очень точные и конкретные предсказания того, какие типы возмущений плотности мы должны увидеть в ранней Вселенной. Это те самые начальные возмущения, приводящие к температурным флуктуациям микроволнового фонового излучения и вырастающие в конечном итоге в звезды, галактики и кластеры. Пока предсказанные инфляцией типы возмущений прекрасно согласуются с данными наблюдений.¹⁰ Дух захватывает, когда смотришь на небо, на все эти галактики, рассыпанные по пространству, и понимаешь, что все они зародились в квантовых флуктуациях, когда Вселенной была всего лишь доля секунды от роу.

Вечная инфляция

После того как инфляция была предложена, космологи рьяно взялись за изучение ее свойств в самых разных моделях. В ходе этих исследований российско-американские физики Александр Виленкин и Андрей Линде заметили кое-что

интересное: стоит инфляции начаться, и она, судя по всему, никогда не останавливается.¹¹

Для того чтобы понять это, проще всего на самом деле вернуться к идее старой инфляции, хотя данное явление так же характерно и для новой инфляции. В старой инфляции инфляционное поле застряло в ложном вакууме, а не катится медленно по склону холма. Поскольку больше в пространстве ничего нет, Вселенная во время инфляции принимает форму пространства де Ситтера с очень высокой плотностью энергии. Главный фокус в том, как выбраться из этой фазы — как остановить инфляцию и заставить пространство де Ситтера превратиться в горячую расширяющуюся Вселенную традиционной модели Большого взрыва. Нам нужно каким-то образом преобразовать энергию, хранящуюся в состоянии ложного вакуума инфляционного поля, в обычную материю и излучение.

Поле, застрявшее в ложном вакууме, хочет распасться в истинный вакуум, обладающий более низкой энергией. Но оно не делает это одномоментно; ложный вакуум распадается посредством формирования пузырей, точно так же, как жидкая вода кипит, превращаясь в водяной пар. Через случайные интервалы времени в ложном вакууме появляются небольшие пузырьки истинного вакуума, представляющие собой квантовые флуктуации. Каждый пузырь растет, и пространство внутри него расширяется. Однако пространство снаружи пузыря расширяется еще быстрее, так как там все еще доминирует высокоэнергетический ложный вакуум.

И мы наблюдаем состязание: пузыри истинного вакуума появляются и растут, но пространство между ними также растет, расталкивая сами пузыри. Что победит? Все зависит от того, как быстро пузыри создаются. Если это происходит достаточно быстро, то все пузыри сталкиваются между собой и энергия ложного вакуума преобразуется в материю и излучение. Однако мы не хотим, чтобы пузыри формировались *слишком* быстро, — ведь в этом случае Вселенная не успеет расширяться настолько, чтобы справиться с космологическими загадками.

К несчастью для сценария старой инфляции, подходящего компромисса здесь не существует. Если мы настаиваем, что инфляция решает наши космологические загадки, то выясняется, что пузыри при этом формируются так редко, что заполнить все пространство им не удастся никогда. Отдельные пузыри могут сталкиваться — исключительно по стечению обстоятельств; но все множество пузырей не сможет расширяться и врезаться друг в друга достаточно быстро, чтобы превратить весь ложный вакуум в истинный вакуум. Между пузырями всегда будет оставаться пространство, застрявшее в ложном вакууме

и расширяющееся с необычайно высокой скоростью. И хотя пузыри продолжают формироваться, общий объем ложного вакуума продолжит увеличиваться, так как пространство расширяется быстрее, чем создаются пузыри.

В результате получается совершеннейший сумбур: хаотичное фрактальное распределение пузырей истинного вакуума, окруженное невероятно быстро расширяющимися областями ложного вакуума. Это совершенно не похоже на однородную, плотную раннюю Вселенную, которая нам хорошо знакома, поэтому идея старой инфляции была отправлена на свалку, как только подоспела новая инфляция.

Однако и здесь есть лазейка: а что, если наша наблюдаемая Вселенная содержится внутри *одного* пузыря? Тогда то, что пространство за пределами пузыря очень неоднородное, с фрагментами ложного вакуума и кусками истинного вакуума, не играет никакой роли — в нашем пузыре все выглядит однородным, и мы не в состоянии увидеть, что происходит снаружи, просто потому что ранняя Вселенная непрозрачна.

Существует веская причина, почему Гут не рассматривал такую возможность, когда впервые заговорил о старой инфляции. Если начать с простейших примеров пузыря истинного вакуума, появляющегося внутри ложного вакуума, то станет понятно, что внутренность такого пузыря составляют не материя и излучение — он абсолютно пуст. Следовательно, это не переход от пространства де Ситтера с высокой энергией вакуума к традиционной космологии Большого взрыва; это переход прямо к пустому пространству, имеющему форму пространства де Ситтера с более низким значением энергии вакуума (если энергия истинного вакуума положительная). И это не та Вселенная, в которой мы живем.

Лишь намного позже космологи осознали, что этот вывод немного скоропалителен. Действительно, существует способ «заново нагреть» внутренность пузыря истинного вакуума, для того чтобы создать условия модели Большого взрыва: реализовать эпизод новой инфляции внутри пузыря. Вообразим, что поле инфлатона внутри пузыря не достигает сразу же самой низкой точки своего потенциала, соответствующей истинному вакууму; вместо этого оно приземляется на промежуточное плато, с которого затем медленно скатывается в минимум. В этом случае фаза новой инфляции может происходить в каждом пузыре; плотность потенциальной энергии инфлатона, пока он находится на плато, позднее может преобразоваться в материю и излучение, и в результате мы получим совершенно правдоподобную Вселенную.¹²

Итак, старая инфляция, стоит ей начаться, никогда не заканчивается. Могут возникать пузыри истинного вакуума, похожие на нашу Вселенную, но область

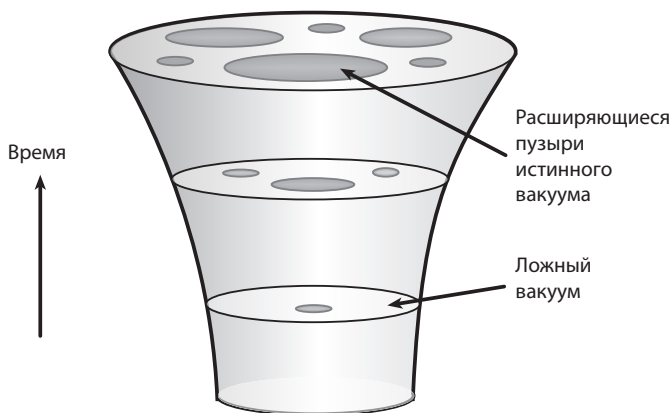


Рис. 14.8. Распад пространства де Ситтера, соответствующего ложному вакууму, на пузыри истинного вакуума в старой инфляции. Никогда не происходит так, чтобы все пузыри столкнулись и заполнили все пространство, так как объем пространства в фазе ложного вакуума увеличивается быстрее. В действительности инфляция никогда не останавливается

ложного вакуума снаружи не прекратит расти. Будет появляться все больше и больше пузырей, и процесс никогда не прервется. Это идея «вечной инфляции». Так происходит не в каждой инфляционной модели; наличие или отсутствие подобного поведения зависит от характеристик инфлатона и его потенциала.¹³ Но необходимости проводить тонкую подстройку теории, для того чтобы получить вечную инфляцию, нет; она происходит в значительной части инфляционных моделей.

Мультиленная

Про вечную инфляцию можно говорить еще долго, но давайте сфокусируемся на одном ее следствии: хотя Вселенная, которую мы видим, на больших масштабах выглядит очень однородной, на еще больших (ненаблюдаемых) масштабах она далека от однородности. Крупномасштабное единообразие нашей наблюдаемой Вселенной иногда склоняет космологов к предположению о том, что Вселенная должна бесконечно продолжаться в том же духе во всех направлениях. Однако это всегда было лишь предположением, упрощающим нашу жизнь, а не результатом скрупулезно выверенной цепочки доказательств. Сценарий вечной инфляции предсказывает, что Вселенная *не* сохраняет однородность на всем своем протяжении; очень далеко за пределами нашего наблюдаемого горизонта картина в конце концов кардинально меняется.

Несомненно, где-то там, далеко, инфляция все еще продолжается. Такой сценарий кажется нам сейчас довольно умозрительным, но важно помнить, что Вселенная на ультрабольших масштабах, скорее всего, очень сильно отличается от крохотного участка Вселенной, к которому у нас есть непосредственный доступ.

Данная ситуация привела к появлению нового словаря и ошибочному употреблению части старого. Каждый пузырь истинного вакуума, если все организовано правильно, приблизительно напоминает нашу наблюдаемую Вселенную: потенциальная энергия инфлатона превращается в обычную материю и излучение, и мы обнаруживаем горячее, плотное, однородное, расширяющееся пространство. Наблюдатель, проживающий внутри одного пузыря, не видит никакие другие пузыри (если только они не сталкиваются) — в ранние времена его собственного пузыря он обнаруживает условия, схожие с Большим взрывом. Эта картина вообще-то представляет простейший пример *Мультиленной* — каждый пузырь, эволюционируя отдельно от остальных, сам по себе эволюционирует как Вселенная.

Очевидно, что здесь мы достаточно вольно обращаемся со словом «Вселенная». Если бы мы были осторожнее, то использовали бы его для обозначения всего сущего, независимо от того, способны мы это увидеть или нет (и иногда мы так и делаем, чтобы вам жизнь не казалась слишком простой). Но большая часть космологов злоупотребляет терминологией уже так давно, что если мы планируем общаться с другими учеными, нам следует научиться говорить на их языке. Мы слышим заявления вроде «нашей Вселенной четырнадцать миллиардов лет» настолько часто, что нам просто не хочется возвращаться к истокам и поправлять их, добавляя «по крайней мере, наблюдаемой части нашей Вселенной». Однако вместо этого люди просто обозначают словом «Вселенная» участок пространства—времени, напоминающий нашу наблюдаемую Вселенную, который зародился в горячем, плотном состоянии и расширился из него. Алан Гут предложил термин «карманные Вселенные» (*pocket universes*), чуть более точно отражающий суть идеи.

Таким образом, Мультиленная — это просто набор карманных Вселенных (областей истинного вакуума, расширяющихся и охлаждающихся после эффектного рождения) и фоновое инфлатирующее пространство—время, в которое они заключены. Если задуматься, это довольно-таки приземленная концепция идеи Мультиленной. Всего лишь множество различных областей пространства, которые все эволюционируют аналогично нашей наблюдаемой Вселенной.

В последнее время большое внимание привлекает интересное свойство Мультиленной такого типа: во всех этих карманных Вселенных локальные законы физики могут быть совершенно разными. На графике потенциальной энергии инфлатона на рис. 14.6 мы показали три разных состояния вакуума: А, В, С. Но совершенно не обязательно мы должны ограничиваться этим. Как мы вскользь упомянули в главе 12, теория струн, судя по всему, предсказывает существование огромного количества вакуумов — как минимум 10^{500} , а может быть, еще больше. Каждое из этих состояний представляет собой отдельную фазу, в которой может пребывать пространство—время. Это означает разные типы частиц, с разными массами и взаимодействиями — по сути, совершенно новые законы физики в каждой Вселенной. И снова мы допускаем определенные терминологические вольности, ведь базовые законы (теория струн или что угодно еще) остаются теми же; тем не менее они проявляют себя разными способами, так же как вода может быть твердой, жидкой или газообразной. Сегодня ученые, занимающиеся исследованием теории струн, используют такой термин, как «ландшафт» возможных вакуумных состояний.¹⁴

Однако одно дело, когда ваша теория *допускает* множество различных вакуумных состояний, каждое с собственными законами физики, и совсем другое — заявлять, что все эти разнообразные состояния на самом деле *существуют* где-то в Мультиленной. Здесь в игру вступает вечная инфляция. Мы рассказали историю, в которой инфляция зарождается в состоянии ложного вакуума, а заканчивается (в каждой карманной Вселенной), эволюционируя в истинный вакуум, — либо путем образования пузырей, либо медленно скатываясь с холма вниз. Но если инфляция продолжается вечно, то ничто не запрещает ей эволюционировать в разные состояния вакуума в разных карманных Вселенных; и действительно, именно этого от нее и можно ожидать. Поэтому вечная инфляция предлагает способ взять все эти возможные Вселенные и сделать их реальными.

Такой сценарий — если он верен — приводит к важным следствиям. Самое очевидное из них то, что если вы лелеяли надежду научиться на основе Теории Всего Сущего уникальным образом предсказывать свойства наблюдаемых нами физических объектов и явлений (массу нейтрино, заряд электрона и т. д.), то с этими мечтами можно распрощаться. Локальные проявления законов физики от Вселенной к Вселенной будут очень сильно разниться. Возможно, вы также надеетесь на возможность каких-то статистических предсказаний, основанных на антропном принципе: «шестьдесят три процента наблюдателей в Мультиленной обнаружат три семейства фермионов» или что-то в этом роде. И многие ученые упорно пытаются получить подобные предсказания. Но нет никакой

ясности относительно того, возможно ли это вообще, особенно если учесть, что количество наблюдателей, воспринимающих определенные свойства своего окружения, во многих случаях становится бесконечно большим — ведь инфляция во Вселенной продолжается бесконечно.

В этой книге мы очень интересуемся Мультиленной, но нам не настолько интересны детали ландшафта множества различных вакуумов или попытки выковать из антропного принципа набор практичных предсказаний. Наша проблема — низкая энтропия наблюдаемой Вселенной вскоре после зарождения — настолько ужасающа и драматична, что не стоит и надеяться решить ее с помощью антропного принципа; жизнь, определенно, могла бы существовать и во Вселенной с намного более высокой энтропией. Нам требуется нечто лучшее, и все же идея Мультиленной кажется шагом в правильном направлении. Как минимум касательно Вселенной она предполагает, что доступное нашему взору может оказаться далеко не полной картиной мира.

Чего хорошего в инфляции?

Давайте соберем все в одну кучу. История об инфляции, которую космологи придумали для себя,¹⁵ звучит примерно так:

Нам неизвестно, какими были условия в ранней Вселенной сразу после ее рождения. Предположим, что она была плотная и скученная, но необязательно однородная; то тут, то там могли наблюдаться сильные флуктуации. Среди них могли быть черные дыры, осциллирующие поля и даже довольно пустые участки. Теперь представим себе, что по крайней мере одна небольшая область пространства во всей этой неразберихе относительно спокойна, а плотность энергии в ней определяется в основном темной суперэнергией поля инфлатона. Пока остальная часть пространства продолжает жить хаотично, внутри этой конкретной области начинается инфляция; ее объем увеличивается в невообразимое число раз, а любые ранее существовавшие возмущения начисто стираются благодаря инфляционному растяжению. В конце концов эта область эволюционирует в то, что выглядит в точности как наша Вселенная, как ее описывает стандартная модель Большого взрыва, и это никак не связано с тем, что происходит в оставшейся части изначально флуктуирующего первичного бульона. Следовательно, в данном сценарии нам не требуется никакой высокочувствительной, неестественно тонкой подстройки начальных условий, для того чтобы получить пространственно плоскую и однородную на больших расстояниях Вселенную; она гарантированно появляется из типовых, случайным образом флуктуирующих начальных условий.

Обратите внимание на то, что цель здесь — объяснить, почему Вселенная, подобная той, в которой мы обнаруживаем себя сегодня, может *естественным образом* зародиться в результате динамических процессов в ранней Вселенной. Инфляция рассматривается исключительно в рамках объяснения каких-то явно тонко подстроенных свойств нашей Вселенной в ранние времена; если же вы решите, что раннюю Вселенную следует принимать такой, какая она есть, и что нет никакого смысла в том, чтобы «объяснять» ее, то инфляция ничем вам помочь не сможет.

Работает ли это? Действительно ли инфляция объясняет, почему наши, казалось бы, совершенно неестественные начальные условия в действительности вполне вероятны? Я утверждаю, что инфляция *сама по себе* не дает ответа на эти вопросы; она может быть частью полной истории, но если мы хотим, чтобы наши слова звучали убедительно, мы дополнительно должны предоставить какие-то идеи относительно того, что происходило до инфляции. Это оставляет нас (то есть меня) в меньшинстве среди современных космологов, хотя и не в полном одиночестве;¹⁶ большинство ученых, работающих в данной области, уверены, что инфляция действует как по писаному, избавляя нас от проблем тонкой настройки, от которых страдает стандартная модель Большого взрыва. Вы должны суметь принять собственное решение, не забывая, однако, что в конечном итоге решение остается за Природой.

В предыдущей главе, когда мы обсуждали эволюцию энтропии в нашей Вселенной, мы ввели в обращение понятие «сопутствующего объема» — фрагмента Вселенной, который мы в состоянии наблюдать в настоящее время и который рассматривается как эволюционирующая во времени физическая система. Вполне допустимо приближенно считать наш сопутствующий объем замкнутой системой: несмотря на то что, строго говоря, он не изолирован, мы полагаем, что оставшаяся часть Вселенной не оказывает никакого значимого влияния на происходящее в пределах нашего объема. Это верно и в инфляционном сценарии. Наш объем обнаруживает себя в конфигурации, где он очень мал и где властвует темная суперэнергия; другие части Вселенной могут выглядеть кардинально иным образом, но кого это волнует?

Мы ранее уже формулировали загадку ранней Вселенной в терминах энтропии: сегодня энтропия нашего сопутствующего объема составляет около 10^{101} , но в ранние времена ее значение было примерно 10^{88} , а максимальное значение энтропии для нас — 10^{120} . Это означает, что в ранней Вселенной значение энтропии было невероятно маленьким по сравнению с текущим состоянием Вселенной. Почему? Если состояние Вселенной выбирается случайным образом среди всех возможных состояний, то крайне маловероятно, что

результатом такого выбора будет настолько низкоэнтропийная конфигурация, так что, очевидно, нам известна далеко не вся история.

Назначение инфляционной идеи — предоставить недостающие фрагменты. Небольшой участок может из бешено осциллирующих начальных условий, которые явно или неявно иногда ошибочно описывают как «высокоэнтропийные», естественным образом эволюционировать в область с энтропией 10^{88} , выглядящую как наша Вселенная. Мы уже много раз обсуждали это в нашей книге и знаем, что истинно высокоэнтропийная конфигурация — это *не* бешено осциллирующий высокоэнергетический беспорядок, это его прямая противоположность, обширное и тихое пустое пространство. Как и в случае ранней Вселенной в традиционной истории с Большим взрывом, условия, необходимые для запуска инфляции, совершенно не похожи на те, которые мы бы получили, если бы вслепую вытаскивали их из шляпы фокусника.

На самом деле все еще хуже. Давайте сфокусируемся на крохотном участке пространства, где доминирует темная суперэнергия и в котором начинается инфляция. Какова его энтропия? Это сложный вопрос, и причина, почему мы не можем дать на него точный ответ, все та же — мы слишком мало знаем об энтропии в присутствии гравитации, и особенно в высокоэнергетическом режиме, необходимом для инфляции. Но в наших силах делать правдоподобные предположения. В предыдущей главе мы говорили о том, что в любую заданную область расширяющейся Вселенной можно «уместить» лишь ограниченное число состояний, по крайней мере если для их описания используются обычные предположения квантовой теории поля (что подразумевается для инфляции). Состояния выглядят как вибрирующие квантовые поля, а длина волны вибраций должна быть меньше размера рассматриваемой области, но больше планковской длины. Это означает, что существует максимальное число возможных состояний, которые могут выглядеть как небольшой участок, готовый к инфляции.

Числовой ответ зависит от конкретного способа запуска инфляции, и в частности от энергии вакуума во время инфляции. Однако различия между возможными моделями не слишком значительны, поэтому мы можем выбрать один пример и придерживаться его. Предположим, что энергетический масштаб во время инфляции составлял 1 % от планковского масштаба; это довольно много, но все же достаточно мало, для того чтобы мы обезопасили себя от сложностей, которые влечет за собой квантовая гравитация. В этом случае предполагаемое значение энтропии нашего сопутствующего объема в начале инфляции было равно:

$$S_{\text{инфляции}} \approx 10^{12}.$$

Это невероятно маленькое значение по сравнению и с 10^{120} — такой энтропия вполне может быть, — и с 10^{88} — а такой энтропия станет совсем скоро. Оно отражает тот факт, что для того, чтобы инфляция началась, каждая степень свободы, которая будет описывать нашу текущую Вселенную, должна была быть тщательно упакована в чрезвычайно однородный маленький участок пространства.

Таким образом, секрет инфляции раскрыт: объяснение, почему наша наблюдаемая Вселенная пребывала в таком очевидно низкоэнтропийном, тонко подстроенном раннем состоянии, базируется в этом сценарии на предположении о том, что ему предшествовало *еще более низкоэнтропийное* состояние. Это не кажется чем-то удивительным, если мы доверяем второму закону термодинамики и ожидаем, что энтропия со временем будет возрастать, но и ответа на главный вопрос не дает. На самом деле все еще удивительно, что наш сопутствующий объем Вселенной оказался в низкоэнтропийной конфигурации того типа, который необходим для начала инфляции. Невозможно решить проблему тонкой подстройки, апеллируя к еще более тонкой подстройке.

Возвращаясь к нашему сопутствующему объему

Давайте попробуем добраться до сути дела; здесь мы уже отступаем от общепринятой точки зрения, и нам надлежит соблюдать крайнюю осторожность.

Мы делаем два критически важных предположения относительно эволюции наблюдаемой Вселенной — нашего сопутствующего объема пространства и всего, что внутри него имеется. Во-первых, мы предполагаем, что наблюдаемая Вселенная, по сути, *автономна*, то есть она эволюционирует как замкнутая система, свободная от влияния извне. Инфляция не нарушает данное предположение; как только процесс инфляции запускается, наш сопутствующий объем стремительно приобретает вид однородной конфигурации, а эта конфигурация эволюционирует независимо от остальной Вселенной. Данное предположение, очевидно, может нарушаться до начала инфляции и играть определенную роль в формировании начальных условий. Однако инфляция сама по себе в попытках объяснить то, что в настоящее время предстает нашему взору, не пользуется преимуществом никаких гипотетических внешних воздействий.

Во-вторых, предположим, что динамика нашей наблюдаемой Вселенной *обратима* — любые изменения сохраняют информацию. Это кажущееся

безобидным заявлением приводит к важным следствиям. Существует пространство состояний, фиксированное раз и навсегда (в частности, оно остается одним и тем же как в ранние времена, так и в поздние), и эволюция в этом пространстве переводит разные начальные состояния в разные конечные состояния (за одно и то же время). Ранняя Вселенная очень не похожа на позднюю: она меньше, плотнее, быстрее расширяется и т. д. Но (в предположении об обратимой динамике) это не означает, что изменилось пространство состояний; изменился лишь конкретный тип состояния, в котором Вселенная находится.

Ранняя Вселенная (повторяя очевидное) — это та же самая физическая система, что и поздняя Вселенная, только в совершенно иной конфигурации. А энтропия любого заданного микросостояния этой системы отражает число других микросостояний, аналогичных данному с макроскопической точки зрения. Если бы мы случайным образом выбирали конфигурацию физической системы, которую мы называем наблюдаемой Вселенной, с подавляющей вероятностью это оказалось бы состояние с очень высокой энтропией, то есть близкое к пустому пространству.¹⁷

Честно говоря, люди, даже профессиональные космологи, обычно так не думают. Мы склонны полагать, что ранняя Вселенная — это небольшой плотный участок, поэтому, задумываясь о состояниях, в которых она могла пребывать, мы часто ограничиваемся лишь небольшими плотными конфигурациями, достаточно однородными и удобными, для того чтобы к ним можно было применять правила квантовой теории поля. Однако для таких предположений нет совершенно никаких оснований, по крайней мере в рамках динамики Вселенной. Размышляя о возможных состояниях, в которых могла находиться ранняя Вселенная, мы должны включать в рассмотрение также и неизвестные состояния, не входящие в сферу действия квантовой теории поля. Если уж на то пошло, нам следует рассматривать все возможные состояния *текущей* Вселенной, ведь это всего лишь другие конфигурации той же самой системы.

Размер Вселенной не сохраняется, он эволюционирует и изменяется. Когда мы рассматриваем статистическую механику молекул газа в контейнере, вполне допустимо считать количество молекул фиксированным, так как это отражает реальность глубинной динамики. Однако в теории, включающей гравитацию, «размер Вселенной» не может быть фиксированным. Так что бессмысленно — снова, отталкиваясь от известных законов физики, без оглядки на какие бы то ни было новые принципы за их пределами — с самого начала предполагать, что ранняя Вселенная обязательно маленькая и плотная. Это должно быть объяснено.

Все это весьма проблематично в рамках традиционного обоснования, которое мы подводим под сценарий инфляционной Вселенной. Согласно предыдущей истории, мы признаем, что не знаем, как выглядела ранняя Вселенная, но подозреваем, что она испытывала большие флуктуации. (В современной Вселенной, разумеется, подобных флуктуаций нет, так что одно это уже требует объяснения.) Среди этих флуктуаций время от времени появляется область, в которой доминирует темная суперэнергия, и далее все следует согласно традиционной инфляционной истории. В конце концов, насколько сложно случайно профлукутировать в подходящие для начала инфляции условия?

Ответ таков: да, это невероятно сложно. Если поистине случайно выбирать конфигурацию для степеней свободы в пределах этой области, то с подавляющей вероятностью результатом выбора станет состояние с высокой энтропией: большая пустая Вселенная.¹⁸ На самом деле, просто сравнивая энтропии, можно заключить, что намного проще получить нашу текущую Вселенную, с сотней миллиардов галактик и всем прочим, чем область, готовую к инфляции. И если мы не выбираем конфигурации этих степеней свободы случайным образом, то что же, вообще говоря, мы делаем? Это выходит за рамки традиционной инфляционной истории.

Подобные проблемы характерны не только для инфляционной идеи. Они досаждают любым возможным сценариям, с помощью которых ученые когда-либо пытались предоставить динамическое объяснение очевидно тонкой подстройке нашей ранней Вселенной, не вступая в то же время в противоречия с нашими двумя предположениями (что наш сопутствующий объем — это замкнутая система и что его динамика обратима). Проблема заключается в том, что энтропия ранней Вселенной была низкой, а это означает, что вариантов того, как могла бы выглядеть Вселенная, относительно немного. При этом, несмотря на то что информация сохраняется, нет такого динамического механизма, который мог бы взять очень большое число состояний и заставить их эволюционировать в меньшее число состояний. Если бы что-то подобное существовало, нарушить второе начало термодинамики не составляло бы труда.

Подготавливая почву

В предыдущем обсуждении я намеренно акцентировал внимание на скелетах, спрятанных в шкафу сценария инфляционной Вселенной, — вы найдете множество других книг, в которых упор будет делаться на аргументы в пользу данной идеи.¹⁹ Однако давайте начистоту: проблема на самом деле не в инфляции, а в том, как эта теория преподносится заинтересованной аудитории.

Мы часто слышим, что инфляция устраняет настоятельную потребность в построении теории начальных условий, так как инфляция начинается при относительно типичных обстоятельствах, а стоит ей начаться, как все наши проблемы разом решаются.

Истина почти противоположна: имеется множество доводов в пользу инфляции, но все же она делает потребность в теории начальных условий еще более насущной. Надеюсь, мне удалось донести до вас мысль, что ни инфляция, ни любой другой механизм не могут сами по себе объяснить нашу низкоэнтропийную раннюю Вселенную при условии истинности предположений об обратимости и автономной эволюции. Нельзя исключать, конечно, что от обратимости придется уйти; возможно, фундаментальные законы физики нарушают обратимость на фундаментальном уровне. Хотя такое можно себе представить, я приведу аргументы, что слишком сложно привязать подобную идею к тому, что мы фактически наблюдаем в мире вокруг себя.

Менее радикальной стратегией было бы выйти за пределы предположения об автономной эволюции. Мы с самого начала понимали, что считать наш сопутствующий объем замкнутой системой — в лучшем случае приближение. В настоящее время — да и в любой момент в истории Вселенной, для которого в нашем распоряжении есть реальные эмпирические данные, — это кажется на редкость хорошим приближением. Однако нет сомнений в том, что оно нарушается в самом начале жизни Вселенной. Инфляция может играть решающую роль в объяснении окружающей нас Вселенной, но только в том случае, если мы сумеем избавиться от идеи, что «мы просто случайным образом профлуктуировали в нее», и придумаем причину, почему условия, необходимые для инфляции, вообще появились.

Другими словами, самым очевидным решением нашей головоломки будет забыть о стремлении объяснить неестественную раннюю Вселенную исключительно в терминах автономной эволюции нашего сопутствующего объема и вместо этого попытаться встроить нашу наблюдаемую Вселенную в глобальную картину. Это снова возвращает нас к идее Мультиленной — более крупной структуре, в которой Вселенная, окружающая нас, является лишь крохотной частью. Если что-то вроде этого является правдой, мы, по крайней мере, сможем всерьез рассмотреть идею о том, что эволюция Мультиленной естественным образом порождает условия, при которых может начаться инфляция, а после этого все продолжается, как описано выше.

Итак, теперь нас интересует не то, как должна выглядеть физическая система, формирующая нашу наблюдаемую Вселенную, а то, как должна выглядеть Мультиленная и действительно ли она естественным образом порождает об-

ласти, похожие на Вселенную. В идеальном случае нам бы хотелось, чтобы это происходило без необходимости вручную подключать асимметрию времени на каком-либо шаге пути. Помимо объяснения, как получить правильные условия для запуска инфляции, мы также хотим указать, почему нет ничего естественного в существовании огромной полосы пространства—времени (нашей наблюдаемой Вселенной), на одном конце которой существуют описанные условия, а на другом — пустое пространство. Эта программа далека до завершения, хотя у нас уже есть определенные наработки. Сейчас мы бродим по территории гипотетических рассуждений, но если нам удастся не потерять головы, то мы сможем успешно завершить это путешествие, не попав в пасть к дракону.

Примечания

- ¹ *Toulmin, S. The Early Universe: Historical and Philosophical Perspectives / In: The Early Universe. Report of NATO Advanced Study Institute / W. G. Unruh, G. W. Semenoff (eds.). Dordrecht: D. Reidel, 1988, p. 393.* (Доклады Института перспективных исследований НАТО на конференции, прошедшей в Виктории (Канада) с 17 по 30 августа 1986 г.)
- ² См. *Guth, A. H. The Inflationary Universe: The Quest for a New Theory of Cosmic Origins. Reading: Addison-Wesley, 1997; Overbye, D. Lonely Hearts of the Cosmos. New York: HarperCollins, 1991.*
- ³ Первая рабочая модель инфляции была предложена Алексеем Старобинским в 1980 году (*A. A. Starobinsky, A New Type of Isotropic Cosmological Models Without Singularity, Phys. Lett. B 91 (1980) 99–102*), хотя спектр проблем, которые решают инфляционные сценарии, был осознан Гуттом лишь позже. Модель Старобинского (в отличие от модели Гута) не является самопротиворечивой и все еще не исключена экспериментально. — *Примеч. науч. ред.*
- ⁴ Пространство может быть искривлено даже в том случае, когда пространство—время плоское. Пространство с отрицательной кривизной, размер которого при расширении увеличивается пропорционально времени, соответствует абсолютно плоскому пространству—времени. Точно так же пространство может быть плоским в искривленном пространстве—времени; если пространственно плоская Вселенная расширяется (или сжимается) во времени, то пространство—время определено будет искривлено. (Смысл в том, что такое расширение вносит свой вклад в общую кривизну пространства—времени, но кривизна пространства также вкладывает. Вот почему расширяющееся пространство с отрицательной кривизной может соответствовать пространству—времени с нулевой кривизной; вклад пространственной кривизны имеет знак «минус» и может точно сократить положительный вклад от расширения.) Когда космологи упоминают «плоскую Вселенную», они имеют в виду *пространственно* плоскую Вселенную; так же надо понимать «Вселенную с положительной или отрицательной кривизной».
- ⁵ Их сумма составляет менее 180 градусов.

- ⁶ Один из способов измерить кривизну Вселенной — сделать это косвенно, используя уравнение Эйнштейна. Общая теория относительности подразумевает существование взаимосвязи между кривизной, скоростью расширения и количеством энергии во Вселенной. В течение многих лет астрономы измеряли скорость расширения Вселенной и количество материи в ней (подразумевалось, что материя вносит наиболее существенный вклад в общую энергию). Получаемые данные свидетельствовали о том, что Вселенная чрезвычайно близка к плоскому состоянию, но все же должна обладать крошечной отрицательной кривизной. С открытием темной энергии все изменилось; оказалось, что темная энергия отвечает ровно за такое количество энергии, которое подразумевает, что Вселенная абсолютно плоская. Впоследствии астрономам удалось непосредственно измерить кривизну, используя картину температурных флуктуаций в космическом микроволновом излучении как своего рода гигантский треугольник (*Miller, A. D. et al., TOCO Collaboration. A Measurement of the Angular Power Spectrum of the CMB from $l = 100$ to 400 // Astrophysical Journal Letters, 1999, 524, L1–L4; de Bernardis, P. et al., BOOMERanG Collaboration. A Flat Universe from High-Resolution Maps of the Cosmic Microwave Background Radiation // Nature, 2000, 404, p. 955–959; Spergel, D. N. et al., WMAP Collaboration. First Year Wilkinson Microwave Anisotropy Probe (WMAP) Observations: Determination of Cosmological Parameters // Astrophysical Journal Supplement, 2003, 148, p. 175*). Этот метод уверенно доказывает, что Вселенная действительно пространственно плоская — приятное соответствие результатам предыдущих косвенных выводов.
- ⁷ Никто больше так ее не называет. Поскольку данная форма темной энергии введена для того, чтобы происходила инфляция, предполагается, что она возникает из гипотетического поля, носящего название «инфлатон». Было бы прекрасно, если бы поле инфлатона служило какой-то иной цели или уютно вписывалось в какую-то более полную теорию физики элементарных частиц, но пока нам известно слишком мало, чтобы делать еще какие-либо заявления.
- ⁸ Возможно, вы думаете, что поскольку Большой взрыв сам по себе — тоже точка, световые конусы прошлого любых событий во Вселенной должны обязательно пересекаться в момент Большого взрыва. Однако это заблуждение. Как минимум, Большой взрыв — это не точка в пространстве, а момент во времени. Но еще важнее то, что в классической общей теории относительности Большой взрыв представляет собой сингулярность и не должен даже считаться частью пространства—времени; мы имеем право говорить только о том, что происходит после Большого взрыва. И даже если мы включим в рассмотрение моменты времени, непосредственно следовавшие за Большим взрывом, световые конусы прошлого все равно не пересекутся.
- ⁹ Исходные статьи: *Linde, A. D. A New Inflationary Universe Scenario: A Possible Solution of the Horizon, Flatness, Homogeneity, Isotropy and Primordial Monopole Problems // Physics Letters, 1981, B 108, p. 389–393; Albrecht, A., Steinhardt, P. J. Cosmology for Grand Unified Theories with Radiatively Induced Symmetry Breaking // Physical Review Letters, 1982, 48, p. 1220–1223. Обсуждение на доступном языке см. в работе Guth, A. H. The Inflationary Universe: The Quest for a New Theory of Cosmic Origins. Reading: Addison-Wesley, 1997.*
- ¹⁰ См., например, *Spergel, D. N., et al., WMAP Collaboration. First Year Wilkinson Microwave Anisotropy Probe (WMAP) Observations: Determination of Cosmological Parameters // Astrophysical Journal Supplement, 2003, 148, p. 175.*

- ¹¹ См. *Vilenkin, A.* The Birth of Inflationary Universes. *Physical Review*, D 27, 1983, p. 2848–2855; *Linde, A. D.* Eternally Existing Selfreproducing Chaotic Inflationary Universe. *Physics Letters*, B 175, 1986, p. 395–400; *Guth, A. H.* Eternal Inflation and Its Implications // *Journal of Physics*, A 40, 2007, p. 6811–6826.
- ¹² Данный сценарий получил слегка дезинформирующее название открытой инфляции (*Bucher, M., Goldhaber, A. S., Turok, N.* An Open Universe from Inflation // *Physical Review*, D 52, 1995, p. 3314–3337). В тот период, когда темная энергия еще не была обнаружена, космологи понемногу начинали воановаться: создавалось впечатление, что инфляция надежно предсказывает пространственную плоскостность Вселенной, в то время как наблюдения плотности материи упорно указывали на то, что для осуществления такого предсказания энергии попросту недостаточно. Кто-то уже паниковал и пытался изобретать модели инфляции, не обязательно предсказывающие плоскую Вселенную. Но оказалось, что необходимости в этом нет, — темная энергия предоставляет как раз недостающую часть плотности энергии, для того чтобы сделать Вселенную плоской, и наблюдения за космическим микроволновым фоновым излучением уверенно подтверждают, что Вселенная действительно плоская (*Spergel, D. N., et al.*, WMAP Collaboration. First Year Wilkinson Microwave Anisotropy Probe (WMAP) Observations: Determination of Cosmological Parameters // *Astrophysical Journal Supplement*, 148, 2003, p. 175). Так что все в порядке, потому что благодаря панике родилась умная идея — как сделать реалистичную Вселенную внутри пузыря, заключенного в фоновый ложный вакуум.
- ¹³ В действительности первые статьи по вечной инфляции были написаны в контексте новой инфляции, а не «старой инфляции с новой инфляцией в пузырях». В сценарии новой инфляции на самом деле вечная инфляция представляет собой куда более удивительный факт, так как поле, по идее, должно просто скатиться вниз с холма его потенциальной энергии. Однако необходимо также помнить, что скатывающееся поле содержит квантовые флуктуации; если условия окажутся подходящими, то эти флуктуации могут быть довольно большими. Действительно, они могут быть настолько крупными, что в некоторых областях пространства поле будет двигаться *вверх* по холму, хотя в среднем, разумеется, оно будет катиться вниз. Области с движением вверх редки, но они расширяются быстрее, потому что плотность энергии в них выше. Результат таких процессов очень похож на всю эту историю со старой инфляцией: в огромной части Вселенной инфлатон скатывается вниз и преобразуется в материю и излучение, но все больший и больший объем застревает на инфляционном этапе, и в итоге инфляция никогда не прекращается.
- ¹⁴ См. *Susskind, L.* The Cosmic Landscape: String Theory and the Illusion of Intelligent Design. New York: Little, Brown, 2006 или *Vilenkin, A.* Many Worlds in One: The Search for Other Universes. New York: Hill and Wang, 2006. Более ранняя, но связанная версия ландшафта различных состояний вакуума рассмотрена в работе *Smolin, L.* The Life of the Cosmos. Oxford: Oxford University Press, 1993.
- ¹⁵ В исходных работах, посвященных инфляции, неявно предполагалось, что частицы в ранней Вселенной пребывали в состоянии, близком к термодинамическому равновесию. Описанный здесь сценарий, кажущийся более достоверным, носит название хаотической инфляции и впервые был предложен Андреем Линде (*Linde, A. D.* Chaotic Inflation // *Physics Letters*, B 129, 1983, p. 177–181; *Linde, A. D.* Eternally Existing Selfreproducing Chaotic Inflationary Univers // *Physics Letters*, B 175, 1986, p. 395–400).

- ¹⁶ См., например, *Penrose, R. The Road to Reality: A Complete Guide to the Laws of the Universe*. New York: Knopf, 2005; *Hollands, S., Wald, R. M. An Alternative to Inflation. General Relativity and Gravitation*, 34, 2002, p. 2043–2055.
- ¹⁷ Это не означает, что мы обязаны случайным образом выбрать конфигурацию Вселенной среди всех возможных допустимых состояний или что существует причина полагать, что нечто подобное действительно произошло. Скорее, если состояние Вселенной совершенно точно было выбрано *не случайно*, то существуют конкретные правила, определяющие, как это произошло; это всего лишь зацепка, которую нам хотелось бы использовать, чтобы понять, как работает Вселенная.
- ¹⁸ Вы можете возразить, что существует и другой кандидат на роль «высокоэнтропийного состояния»: хаотичное месиво, в которое наша Вселенная эволюционирует, если позволить ей сжаться. (Или, что эквивалентно, если взять типичное микросостояние, совместное с текущим макросостоянием Вселенной, и прокрутить часы в обратную сторону.) Действительно, такое состояние намного более комковатое, чем наша текущая Вселенная, так как в процессе сжатия формируются сингулярности и черные дыры. Но в этом-то и суть: даже среди тех состояний, которые упаковывают всю текущую Вселенную в очень маленькую область, лишь невероятно малая доля принимает форму гладких участков, где доминирует темная суперэнергия, то есть выполняются условия, необходимые для инфляции. Большинство подобных состояний, наоборот, характеризуются условиями, в которых квантовая теория поля неприменима, поскольку их абсолютно невозможно описать без квантовой гравитации. Однако заявление: «мы не знаем, как описывать такие состояния» — это совершенно не то же самое, что «такие состояния не существуют» или даже «мы можем игнорировать такие состояния, если перечислим все возможные начальные состояния Вселенной». Если динамика обратима, у нас нет другого выбора, кроме как относиться к подобным состояниям со всей серьезностью.
- ¹⁹ См., например, *Guth, A. H. The Inflationary Universe: The Quest for a New Theory of Cosmic Origins*. Reading: Addison—Wesley, 1997.

Глава 15

Прошлое сквозь будущее

Вечное молчание этих бесконечных пространств ужасает меня.

*Блез Паскаль. Мысли*¹

В этой книге мы занимались тем, что исследовали значение стрелы времени в соответствии с положениями второго начала термодинамики, а также ее взаимосвязь с космологией и с истоками Вселенной. Наконец-то нам удалось обзавестись достаточным набором базовых знаний, для того чтобы собрать все вместе и рассмотреть главный вопрос: почему энтропия нашей наблюдаемой Вселенной в первый момент времени была такой низкой? (Или, еще лучше, чтобы с самого начала не скатываться в грех асимметричного языка: почему мы живем во временной окрестности такого чрезвычайно низкоэнтропийного состояния?)

Мы, конечно, попытаемся покончить с этим вопросом, но на самом деле ответ на него нам неизвестен. Существуют разные идеи, одни более многообещающие, другие менее, но все они пока довольно расплывчаты и неопределенны, и в нашей головоломке на месте последних фрагментов все еще зияют дыры. Да, такова наука, и это действительно самая увлекательная ее часть — когда вы уже собрали какие-то подсказки и у вас есть несколько перспективных идей, но поймать за хвост окончательный ответ вам пока не удастся. Остается только надеяться, что перспективы, обрисованные в этой главе, послужат вам ценным путеводителем в дороге на том пути, по которому космологи будут следовать в своих попытках ответить на эти фундаментальные вопросы.²

Рискуя повториться, предлагаю еще раз проанализировать нашу загадку, для того чтобы понять, что же может считаться приемлемым решением задачи.

Согласно второму началу термодинамики, все макроскопические проявления стрелы времени — возможность превращать яйца в омлет, но не наоборот, склонность молока смешиваться с кофе, но никогда не разделяться спонтанно на составляющие, тот факт, что мы помним прошлое, но не будущее — можно связать с тенденцией энтропии к увеличению. В 1870-е годы Больцман объяснил микроскопическую подоплеку второго начала термодинамики: энтропия отражает число микросостояний, соответствующих каждому макросостоянию, то есть если система (по какой бы то ни было причине)

вначале находится в относительно низкоэнтропийном состоянии, с подавляющей вероятностью энтропия по направлению к будущему будет увеличиваться. Тем не менее фундаментальная обратимость законов физики диктует, что если единственным не подлежащим сомнению фактом является низкая энтропия текущего состояния, то ничуть не менее правомерно ожидать, что в прошлом энтропия также была выше. Судя по всему, в реальном мире дела обстоят не так, поэтому для продолжения нам требуется что-то еще. Этим чем-то еще служит гипотеза о прошлом: предположение о том, что очень ранняя Вселенная пребывала в невероятно низкоэнтропийном состоянии и сейчас мы наблюдаем, как она релаксирует в состояние высокой энтропии. Вопрос, почему мы считаем гипотезу о прошлом истинной, относится к сфере интересов космологии. Как ни прискорбно, антропный принцип не в состоянии дать этому объяснения, поскольку мы с тем же успехом могли обнаружить себя в форме случайных флуктуаций (больцмановских мозгов) в пустом (за исключением нас) пространстве де Ситтера. Аналогично, инфляция сама по себе не решает эту проблему, поскольку требует еще более низкоэнтропийного начального состояния, чем то, с которым принято оперировать в традиционной космологии Большого взрыва. Это означает, что вопрос остается без ответа: почему гипотеза о прошлом остается справедливой в нашем наблюдаемом участке Вселенной?

Давайте посмотрим, удастся ли нам с таким багажом на плечах продвинуться вперед.

Эволюция пространства состояний

Начнем с самой очевидной гипотезы: глубоко внутри фундаментальные законы физики просто-напросто необратимы. Я стараюсь не забывать о существовании этого варианта и периодически упоминаю о нем, но, как вы заметили, всегда в том ключе, что он крайне рискованный и серьезного внимания в действительности не заслуживает. Этому есть основательные причины, хотя, разумеется, не непровержимые.

Обратимая система — это система, пространство состояний которой фиксировано раз и навсегда, а эволюция этих состояний вперед во времени сохраняет информацию. Два разных состояния, заданные в некоторый начальный момент времени, предсказуемо эволюционируют в два разных состояния в какой-то более поздний момент, но никогда в одно и то же состояние. Таким образом, мы можем рассматривать эволюцию в обратном направлении во времени, так как у каждого состояния, в котором в настоящее время может находиться система, есть уникальный предок в любой момент времени.

Один из способов нарушить обратимость — позволить самому пространству состояний эволюционировать с течением времени. Возможно, Вселенная в ранние времена располагала меньшим количеством возможных состояний, поэтому ее небольшая энтропия не так удивительна. Однако в этом случае у множества вероятных микросостояний, входящих в одно и то же макросостояние современной Вселенной, попросту нет вероятных прошлых состояний, из которых они могли бы эволюционировать.

Именно это многие космологи неявно подразумевают, говоря о происходящем в расширяющейся Вселенной. Если мы ограничиваемся «состояниями, выглядящими как легкие вибрации квантовых полей около гладкого фона», то очевидно, что эта конкретная часть пространства состояний со временем растет — по мере того как само пространство (в старомодном трехмерном понятии «пространства») становится больше. Однако это совершенно не то же самое, что воображать, будто *все* пространство состояний со временем изменяется. Вряд ли кто-то осмелится утверждать, что всерьез придерживается этой точки зрения: достаточно просто сесть и как следует подумать, что это в действительности означает. Я в явной форме отбросил эту возможность, когда заявил, что ранняя Вселенная подверглась тонкой подстройке, — в пространстве состояний, в которых она могла бы находиться, мы включили не только те, которые похожи на современную Вселенную, но и различные варианты с еще более высокой энтропией.

Самое странное в идее об изменяющемся со временем пространстве состояний — это то, что она требует наличия *внешнего* временного параметра, подразумевая понятие о «времени», которые существуют за пределами фактической Вселенной и в котором эволюционирует Вселенная. Мы традиционно рассматриваем время как часть Вселенной — координату в пространстве — времени, измеряемую разного сорта предсказуемо периодическими часами. На вопрос «Который час?» мы отвечаем, ссылаясь на явления, происходящие во Вселенной, то есть на свойства состояния, в котором она в данный момент пребывает. («Маленькая стрелочка на тройке, а большая стрелка на двенадцати».) Но если пространство состояний действительно изменяется со временем, то это понятие становится совершенно непригодным для употребления. В действительности в любой конкретный момент Вселенная находится в одном конкретном состоянии. Заявления вроде «пространство состояний меньше, когда Вселенная находится в состоянии X, чем тогда, когда она пребывает в состоянии Y» не несут никакого смысла. Пространство состояний по определению включает все состояния, в которых гипотетически может оказаться Вселенная.

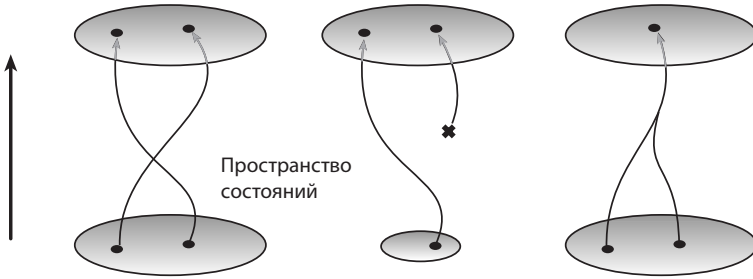


Рис. 15.1. Слева мы видим иллюстрацию обратимых законов физики: система эволюционирует в пределах фиксированного пространства состояний, то есть разные начальные состояния уникальным образом переходят в разные конечные состояния. Иллюстрация в середине — это пример необратимости, так как пространство состояний растет относительно какого-то внешнего временного параметра; у некоторых состояний в более поздний момент времени нет предшественников в более раннем, из которых они могли бы проэволюционировать. Справа еще одна форма необратимости, когда пространство состояний остается фиксированным, но разные начальные состояния эволюционируют в одно и то же конечное состояние

Таким образом, для того чтобы пространство состояний со временем изменялось, нам необходимо положить в основу наших рассуждений понятие о времени, не просто поддающемся измерению с помощью различных свойств состояния Вселенной, но существующем за пределами Вселенной в ее традиционном понимании. Тогда утверждения, подобные «когда этот внешний временной параметр имел определенное значение, пространство состояний Вселенной было относительно небольшим, а когда он дорос до какого-то другого значения, пространство состояний увеличилось», будут иметь смысл.

Больше об этой идее сказать особо нечего. Определенная возможность того, что она окажется истинной, существует, но практически никто не считает ее приемлемым решением загадки стрелы времени.³ Она потребовала бы грандиозного пересмотра всех наших взглядов и понимания законов физики; ничто в текущей картине мира не подразумевает существования временного параметра, скрывающегося где-то за пределами Вселенной. Итак, мы пока не можем окончательно отбросить эту идею, но и ощущения тепла и уюта она нам не дарует.

Необратимые движения

Другой способ изобрести необратимые по своей природе законы физики — придерживаться фиксированного раз и навсегда пространства состояний, но утвердить как факт, что динамические законы не сохраняют информацию. Этот

вариант мы уже рассматривали в главе 7, где на шахматной доске D диагональные линии из серых квадратиков встречались с вертикальной линией и попросту исчезали. Пребывая в каком-то конкретном состоянии в определенный момент времени, мы никак не могли узнать, из какого же прошлого состояния оно эволюционировало, поскольку у нас не было возможности восстановить диагонали до их роковой встречи с вертикальным столбцом.

Совсем несложно придумать несколько более реалистичную версию данной идеи. В главе 8 мы рассматривали необратимый вариант игры в бильярд: привычный бильярдный стол, по которому шары катаются, не теряя ни капли энергии за счет трения, за исключением того, что, врезавшись в один конкретный бортик стола, шар мгновенно прилипает и остается в этом положении навсегда. Пространство состояний этой системы никогда не меняется; оно всегда состоит из всех возможных положений и импульсов всех шаров на столе. Энтропия определяется самым традиционным способом — как логарифм числа состояний с определенными макроскопическими свойствами. Однако динамика необратима: если какой-то шар уже прилип к этому особому бортику, у нас нет никакой возможности узнать, как долго он уже там находится. А энтропия данной системы безнаказанно издевается над вторым началом термодинамики: постепенно, по мере того как останавливается все больше шаров, система использует все меньшую и меньшую часть пространства состояний, и энтропия уменьшается безо всякого воздействия со стороны внешнего мира.

Законы физики как мы их знаем, абстрагируясь от важного вопроса коллапса волновых функций в квантовой механике, производят впечатление обратимых. Но мы пока ничего не можем сказать о том, какими окажутся окончательные, фундаментальные законы физики; все, чем мы можем распорядиться, — это качественные приближения. Возможно ли, что реальные физические законы фундаментально необратимы и что именно их необратимость объясняет стрелу времени?

Давайте для начала разберемся с потенциально ошибочным представлением о том, что это должно означать. «Объяснить» стрелу времени — значит предложить такой набор законов физики и такое «начальное» состояние Вселенной, чтобы естественным образом (без тонкой подстройки) с течением времени наблюдать изменение энтропии, аналогичное происходящему вокруг нас. В частности, если мы просто предполагаем, что одним из начальных условий является низкая энтропия, то объяснять вовсе ничего не требуется — согласно выводам Больцмана, энтропия будет стремиться к увеличению, и на этом все. В данном случае нет даже необходимости постулировать существование

необратимых законов физики; со всей нужной работой успешно справляются обратимые. Но проблема в том, что подобное низкоэнтропийное граничное условие кажется неестественным.

Это означает, что если мы желаем объяснить стрелу времени естественным образом, но прибегнув к необратимым фундаментальным законам, то гораздо лучшей идеей будет постулировать *высокоэнтропийное* условие — «типичное» состояние Вселенной — и воображать, что физические законы, действуя на это состояние, естественным образом *уменьшают* его энтропию. Это будет считаться реальным объяснением стрелы времени. Может показаться, что в такой схеме все наоборот: она вроде бы предсказывает, что энтропия уменьшается, а не возрастает. Однако суть стрелы времени просто-напросто в том, что энтропия постоянно меняется в одном и том же направлении. Если это выполняется, наблюдатель, живущий в подобном мире, всегда «помнит» направление времени, в котором энтропия была ниже; схожим образом, в причинно-следственных связях причины всегда будут на низкоэнтропийной стороне, так как это направление с меньшим числом доступных вариантов. Другими словами, такие наблюдатели будут *называть* высокоэнтропийное направление времени «будущим», а низкоэнтропийное — «прошлым», несмотря на то что фундаментальные законы физики в этом мире работают на точное восстановление прошлого из будущего, а не наоборот.

Определенно, подобную Вселенную вообразить также несложно. Но снова возникает проблема — такая Вселенная будет абсолютно не похожа на *нашу* Вселенную.

Давайте подумаем, как бы обстояли дела во Вселенной, живущей в соответствии с этим сценарием. Вселенная по какой-то причине обнаруживает себя в выбранном случайным образом высокоэнтропийном состоянии, выглядящем как пустое пространство де Ситтера. И наши постулированные необратимые законы физики действуют на это состояние таким образом, что энтропия начинает уменьшаться. Результатом — если все это, в принципе, может сработать — должна быть история нашей фактической Вселенной, но перевернутая в обратную сторону относительно привычного для нас направления времени. Другими словами, в изначальной пустоте несколько фотонов волшебным образом фокусируются в одной точке пространства, создавая там белую дыру. Масса этой белой дыры постепенно возрастает благодаря аккреции дополнительных фотонов (хокинговское излучение наоборот). Мало-помалу вдали появляются новые белые дыры, выстроенные в пространстве в некоторую почти упорядоченную структуру. Все эти белые дыры начинают извергать газ во Вселенную, этот газ сжимается, образуя звезды. Звезды, в свою очередь,

постепенно ускоряясь, по мягкой спирали улетают прочь от белых дыр, формируя галактики. Эти звезды впитывают все больше и больше излучения из внешнего мира и используют энергию для разделения тяжелых элементов на более легкие. По мере того как галактики продолжают сближаться в пространстве, сжимающемся со все увеличивающейся скоростью, звезды распадаются и превращаются в равномерно распределенный по пространству газ. В итоге во Вселенной происходит Большое сжатие, и вблизи конца времен наблюдается чрезвычайно гладкое и равномерное распределение материи и излучения.

Это реальная история нашей наблюдаемой Вселенной, только воспроизведенная обратно во времени. И это превосходное решение для законов физики в том виде, как мы их в настоящее время понимаем: нужно всего лишь начать с состояния вблизи Большого взрыва, позволить ему эволюционировать вперед во времени до одного из возможных высокоэнтропийных состояний, а затем обратить эту историю во времени. Но гипотеза, которую мы рассматриваем в данный момент, совершенно иная: она утверждает, что эволюция такого вида неизбежна *почти для любого* высокоэнтропийного состояния пустого пространства де Ситтера. Можно ли предъявлять подобные требования к каким-то законам физики? Одно дело воображать, что энтропия уменьшается в результате действия необратимых законов, но совершенно другое — утверждать, что она может снижаться в точности таким способом, как необходимо для получения обратной версии истории нашей Вселенной.

Можно точнее указать, что именно в этом сценарии вызывает такой дискомфорт. Для того чтобы испытать действие стрелы времени, нет необходимости думать обо всей Вселенной — она здесь, прямо в нашей кухне. Бросим кубик льда в стакан теплой воды: лед растворится в остывающей воде, и температура всего содержимого стакана станет одинаковой. А фундаментально необратимая гипотеза подразумевает, что данный процесс может быть объяснен с помощью глубинных законов физики, *начиная* со стакана равномерно прохладной воды. Другими словами, законы физики целенаправленно действуют на воду, выделяя различные молекулы и формируя из них кубик льда, плавающий в стакане теплой воды, и все это происходит точно так же, как если бы все начиналось с отдельного кубика льда и воды, только в обратную сторону во времени.

Но это же безумие. Как минимум, откуда им знать? Одни стаканы с прохладной водой пять минут назад были стаканами с теплой водой и кубиками льда, тогда как другие были теми же самыми стаканами с прохладной водой. Хотя каждому макросостоянию с низкой энтропией соответствует относительно немного микросостояний, самих низкоэнтропийных макросостояний гораздо

больше, чем высокоэнтропийных. (Говоря формальным языком, каждое низкоэнтропийное состояние содержит больше информации, чем высокоэнтропийное.)

Эта проблема тесно связана с вопросом сложности, о котором я говорил в конце главы 9. В реальном мире, эволюционируя из низкоэнтропийного Большого взрыва в высокоэнтропийное будущее, Вселенная создает уточненные сложные структуры. Изначально однородный газ не просто расплывается по расширяющейся Вселенной; сначала он сжимается в звезды и планеты, которые увеличивают энтропию локально, попутно поддерживая замысловатые экосистемы и подсистемы обработки информации.

Невероятно сложно, почти невозможно представить, что все это возникает из первоначально высокоэнтропийного состояния, которое эволюционирует согласно каким-то необратимым законам физики. Это не железный аргумент, но, судя по всему, нам все же следует поискать объяснение стрелы времени в реальном мире где-то в другом месте.

Особое начало

Начиная с этого момента мы будем в своих рассуждениях исходить из гипотезы о том, что фундаментальные законы физики подинно обратимы: пространство допустимых состояний остается фиксированным, а динамические правила эволюции во времени сохраняют информацию, содержащуюся в каждом состоянии. Каким образом мы можем надеяться объяснить низкоэнтропийное начальное условие в нашей наблюдаемой Вселенной?

Для Больцмана, который мыслил в контексте абсолютного ньютоновского пространства и времени, это было неразрешимой загадкой. Но общая теория относительности и модель Большого взрыва предлагают новую возможность, а именно: у Вселенной, включая само время, было начало, и это начальное состояние обладало очень низкой энтропией. И вам не разрешается спрашивать почему.

Иногда условие «вам не разрешается спрашивать почему» перефразируют следующим образом: «Мы постулируем *новый закон природы*, утверждающий, что начальное состояние Вселенной обладало очень низкой энтропией». Совершенно неясно, чем вообще различаются эти две формулировки. В нашем привычном понимании законов физики для полного описания эволюции физической системы требуются два ингредиента: набор динамических законов, подчиняясь которым система может с течением времени эволюционировать из одного состояния в другое, и граничное условие,

фиксирующее, в каком состоянии система находится в какой-то определенный момент времени. Однако хотя необходимы и законы, и граничное условие, это вроде бы совершенно разные вещи; непонятно, что мы приобретаем, называя граничное условие «законом». Динамический закон снова и снова подтверждает свою справедливость; в каждый момент времени он берет текущее состояние и переводит его в следующее состояние. Но граничное условие просто задано раз и навсегда; по своей природе это скорее эмпирический факт, описывающий Вселенную, а не дополнительный закон физики. Нет никакой существенной разницы между утверждениями «ранняя Вселенная обладала низкой энтропией» и «то, что ранняя Вселенная обладала низкой энтропией, — это закон физики» (если только мы не полагаем, что существует множество Вселенных и для всех них верно одно и то же граничное условие).⁴

Как бы то ни было, нельзя исключать, что это максимум того, что мы когда-либо будем в состоянии сказать: лучшее понимание динамических законов физики не поможет нам объяснить низкую энтропию ранней Вселенной — это просто факт, с которым необходимо смириться, или (если вам так больше нравится) независимый закон природы. В защиту такого подхода открыто выступает Роджер Пенроуз, предложивший то, что он называет «гипотезой кривизны Вейля» — новый закон природы, явно различающий сингулярности пространства—времени в прошлом и те, которые находятся в будущем. Основная идея заключается в том, что сингулярности прошлого должны быть однородными и однообразными, тогда как будущие сингулярности могут быть какими угодно беспорядочными и сложными.⁵ Это очевидное нарушение симметрии относительно обращения времени, которое должно гарантировать низкую энтропию Большого взрыва.

Реальная проблема с подобными предложениями заключается в том, что они крайне рукотворны.⁶ Утверждение, что сингулярности прошлого были очень однородными, не помогает обрести никакого нового понимания Вселенной. Оно «объясняет» асимметрию времени, просто постулируя ее. Тем не менее его можно пока считать допустимым заменителем более глубокого понимания. Если же будут найдены какие-то более основательные причины, объясняющие принципиальное отличие начальных сингулярностей от конечных (к примеру, что кривизна начальных сингулярностей ограничена, тогда как конечных — нет), то мы определенно сделаем огромный шаг вперед к пониманию истоков стрелы времени. Однако даже такая формулировка подразумевает, что наша главная задача сейчас — искать нечто более фундаментальное.

Симметричная Вселенная

Если фундаментальные законы физики обратимы и мы не позволяем себе просто накладывать асимметричные во времени граничные условия, то остается единственный вариант: эволюция Вселенной действительно симметрична по отношению к обращению времени, несмотря на противоположное первое впечатление. Нетрудно представить себе такой сценарий, если мы ничего не имеем против того, что Вселенная в конце концов перестанет расширяться и снова сожмется. До открытия темной энергии многие космологи находили идею повторно сжимающейся Вселенной привлекательной с философской точки зрения; понятие Вселенной, ограниченной как в пространстве, так и во времени, привлекало к себе внимание многих ученых, и в частности Эйнштейна и Уилера. Будущее Большое сжатие обеспечит приятную симметрию истории Вселенной, начавшейся с Большого взрыва.

В традиционной картине, однако, любая подобная симметрия неизбежно будет подпорчена вторым началом термодинамики. Все, что мы знаем об эволюции энтропии Вселенной, можно легко объяснить исходя из предположения о том, что при зарождении Вселенной энтропия была крайне низка и теперь естественным образом с течением времени увеличивается. Если Вселенную ждет повторное сжатие, то ни один из известных законов физики не запрещает энтропии продолжать расти. Вселенная в момент Большого сжатия будет беспорядочным высокоэнтропийным местом, не имеющим ничего общего с первоначальной однородностью Большого взрыва.

В попытке восстановить общую симметрию истории Вселенной люди периодически задумывались о необходимости дополнительного закона физики: граничного условия в *будущем* (гипотеза о будущем, дополняющая гипотезу о прошлом), которое гарантировало бы, что энтропия будет низкой не только вблизи Взрыва, но и вблизи Сжатия. Данная идея, предложенная Томасом Голдом (больше известным как пионер модели стационарной вселенной) и другими учеными, подразумевает, что стрела времени развернется, как только Вселенная достигнет максимального размера, и, следовательно, заявление о том, что энтропия увеличивается в направлении времени, соответствующем расширению Вселенной, всегда останется верным.⁷

Вселенная Голда так и не снискала расположения космологов, и причина тому проста: нет никаких особых оснований надеяться на существование какого бы то ни было граничного условия в будущем. Определенно, оно способно восстановить глобальную симметрию времени, но ничто в нашем опыте наблюдения Вселенной не требует такого условия, и оно не вытекает ни из каких фундаментальных принципов.

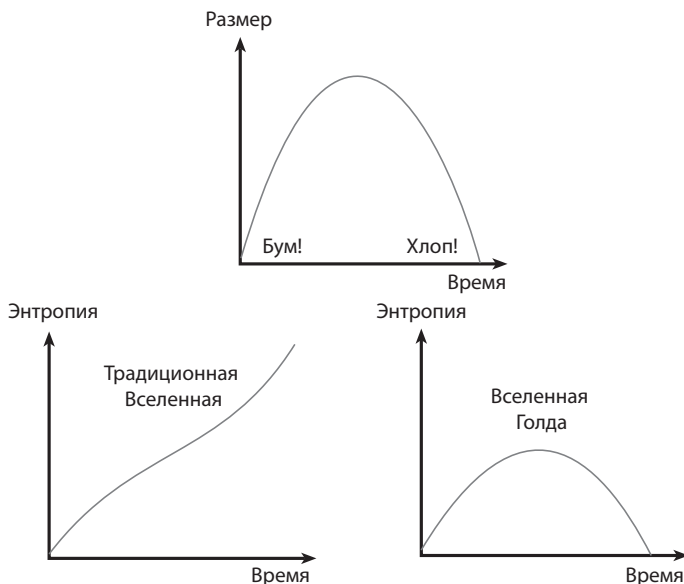


Рис. 15.2. Наверху: размер Вселенной со сжатием как функция времени. Внизу: два возможных сценария эволюции энтропии. Согласно традиционным взглядам, энтропия должна продолжать увеличиваться даже после сжатия Вселенной, как показано слева внизу. Во Вселенной Голда низкоэнтропийное граничное условие в будущем обязывает энтропию в определенный момент времени начать уменьшаться

С другой стороны, точно так же нет никаких особых оснований надеяться на существование граничного условия *в прошлом*, за исключением того неоспоримого факта, что нам подобное условие необходимо для объяснения Вселенной, которую мы фактически наблюдаем вокруг себя.⁸ Хью Прайс отстаивал Вселенную Голда как нечто, что должно приниматься космологами всерьез, — по крайней мере, на уровне мысленного эксперимента, если не модели реального мира, — как раз по этой причине.⁹ Мы не знаем, почему энтропия была низкой вблизи момента Большого взрыва, но это действительно так; следовательно, тот факт, что мы не знаем, почему энтропия должна быть низкой вблизи Большого сжатия, — недостаточная причина для того, чтобы попросту отбросить такую возможность. Действительно, если не вводить временную асимметрию вручную, то вполне разумно полагать, что какой бы неизвестный закон физики ни навязывал низкую энтропию в окрестности Взрыва, этот принцип может делать то же самое и для Сжатия.

Интересно рассмотреть данный сценарий с точки зрения настоящих ученых и попробовать ответить на вопрос, могут ли существовать какие-либо поддающиеся экспериментальной проверке следствия будущего низкоэнтропийного условия. Даже если такое условие существует, очень просто избежать любых грядущих последствий, всего лишь отложив Большое сжатие до чрезвычайно отдаленного момента в будущем. Однако если бы оно было относительно близко во времени (через триллион, а не гугол лет), то мы могли бы видеть реальные эффекты от будущего уменьшения энтропии.¹⁰

Вообразите, например, яркий источник света (который мы для удобства будем называть «звездой»), живущий в будущей фазе коллапса. Как бы мы могли его обнаружить? Мы обнаруживаем обычные звезды благодаря тому, что они излучают фотоны, которые перемещаются по световым конусам прочь от звезды. Мы поглощаем фотон в будущем по отношению к событию излучения и объявляем, что видим звезду. Теперь давайте рассмотрим этот сценарий в обратном направлении во времени.¹¹ Мы обнаруживаем фотоны, движущиеся по радиусу *по направлению к* звезде в будущем; вместо того чтобы сиять, звезда высасывает свет из Вселенной.

Возможно, вы подумаете, что можно «увидеть» будущую звезду, посмотрев в направлении от звезды и заметив один из фотонов, направляющихся к ней. Но это неосуществимо — если мы поглотим фотон, то он никогда не доберется до звезды. В будущем существует граничное условие, требующее, чтобы фотоны поглощались звездой, а не просто направлялись к ней. Так что в действительности картина, которая предстанет нашему взору, — это наш собственный телескоп, *излучающий* свет в пространство в направлении будущей звезды.¹² Если телескоп направлен на звезду в будущем, он излучает свет, если же нет, он остается темным. Это перевернутая во времени традиционная картина: «Если телескоп направлен на звезду в прошлом, он видит свет; если же нет, то он ничего не видит».

Все это кажется безумием, но лишь потому, что мы не привыкли в рассуждениях о мире учитывать будущее граничное условие. «Откуда телескоп знает, что нужно излучать свет, когда он смотрит в направлении звезды, которая появится лишь через триллион лет?» В этом суть будущих граничных условий — они выбирают невероятно маленькую долю микросостояний в рамках нашего текущего макросостояния, в которых происходит такое, казалось бы, маловероятное событие.¹³ Если как следует разобраться, то в этом нет ничего более странного, чем в граничном условии прошлого, которое существует в нашей реальной Вселенной, за исключением того, что одно нам привычно, а второе нет. (Кстати, пока никому не удалось обнаружить никаких экспериментальных

свидетельств будущих звезд или же любых других доказательств существования в будущем низкоэнтропийного граничного условия. Если бы кто-то открыл что-то подобное, вы бы наверняка об этом услышали.)

Таким образом, Вселенную Голда следует рассматривать скорее как поучительную историю, а не реального кандидата на роль объяснения стрелы времени. Если вы думаете, что у вас есть некое естественное объяснение того, почему ранняя Вселенная обладала удивительно низкой энтропией, но вы утверждаете, что не прибегаете ни к каким явным нарушениям симметрии относительно обращения времени, то почему бы поздней Вселенной не выглядеть точно так же? Этот мысленный эксперимент помогает заново осознать, насколько в действительности сложна и запутанна низкоэнтропийная конфигурация Большого взрыва.

В итоге все пока что сошлось на том, что на самом деле Вселенную не ожидает повторное сжатие. Вселенная ускоряется; если темная энергия — это абсолютно постоянная энергия вакуума (а это самый очевидный вариант), то ускорение будет продолжаться вечно. Мы пока не обладаем достаточными знаниями для того, чтобы делать окончательные заявления, но, скорее всего, наше будущее совсем не похоже на наше прошлое. И это снова ставит необычные обстоятельства, сопутствующие Большому взрыву, в центр загадки, которую мы пытаемся решить.

До Большого взрыва

У нас почти закончились варианты. Если мы не задействуем асимметрию времени (либо в динамических законах, либо в граничном условии) вручную, а у Большого взрыва была низкая энтропия, и при этом мы не настаиваем на низкоэнтропийном условии в будущем, то что остается? Мы словно столкнулись с неразрешимой логической загадкой, не оставившей нам путей к примирению эволюции энтропии в нашей наблюдаемой Вселенной с обратимостью фундаментальных законов физики.

Однако один выход все же есть: мы можем смириться с тем, что энтропия Большого взрыва была низкой, но отрицать тот факт, что Большой взрыв был началом Вселенной.

Это звучит немного еретически для каждого, кому доводилось читать об успехе модели Большого взрыва или кто знает, что существование начальной сингулярности надежно предсказывается общей теорией относительности. Нам часто говорят, что нет такого понятия, как «до Большого взрыва», — само время (так же, как и пространство) не существовало до начальной сингуляр-

ности. Это означает, что понятие «до сингулярности» просто не имеет никакого смысла.

Однако, как я вскользь упоминал в главе 3, идея о том, что Большой взрыв на самом деле породил Вселенную, — это всего лишь приемлемая гипотеза, а не результат, к которому ученые уверенно пришли, победив все разумные сомнения. Общая теория относительности не предсказывает, что пространство и время не существовали до Большого взрыва; она предсказывает, что кривизна пространства—времени в очень ранней Вселенной была так велика, что в таких условиях нельзя полагаться на саму общую теорию относительности. При этом обязательно должна приниматься во внимание квантовая гравитация, которую мы можем спокойно игнорировать, пока речь идет о кривизне пространства—времени в относительно безмятежном контексте современной Вселенной. К сожалению, мы недостаточно хорошо понимаем квантовую гравитацию, для того чтобы уверенно говорить о том, что на самом деле происходило в самые ранние времена. Вполне возможно, что в ту эпоху «возникли» пространство и время, а может быть, и нет. Не исключено, что существует также некий переход от фазы существенно квантовой волновой функции к классическому пространству—времени, которое мы все знаем и любим. Но точно так же возможно, что пространство и время продолжают за пределами момента, который мы идентифицируем как «Большой взрыв». Пока мы просто этого не знаем; исследователи рассматривают все возможности и готовы безо всяких предубеждений согласиться с той из них, которая в итоге окажется верной.

Некоторое свидетельство в пользу того, что у времени не обязательно должно быть начало, предоставляет квантовая гравитация, и в частности голографический принцип, о котором мы говорили в главе 12.¹⁴ Малдасена показал, что определенная теория гравитации в пятимерном пространстве анти-де Ситтера в точности эквивалентна «дуальной» четырехмерной теории, не включающей гравитацию. Существует множество вопросов, на которые сложно ответить как в пятимерной теории гравитации, так и в любой другой модели квантовой гравитации. Но ответы на некоторые из них становятся очевидны с дуальной четырехмерной точки зрения. Например, ответом на вопрос «есть ли у времени начало?» будет «нет». Четырехмерная теория вообще не включает гравитацию; это всего лишь теория поля, живущая в каком-то фиксированном пространстве—времени, и это пространство—время распространяется бесконечно далеко в прошлое и будущее. Это верно даже в том случае, если в пятимерной теории гравитации есть сингулярности; каким-то образом теория находит пути обхода и продолжается за их пределами. Таким образом,

у нас есть пример полной теории квантовой гравитации, для которой существует по меньшей мере одна формулировка, в которой время никогда не начинается и не заканчивается, но продолжается во веки веков. Надо признать, что наша собственная Вселенная несколько не похожа на пятимерное пространство анти-де Ситтера, — она обладает четырьмя макроскопическими измерениями, а космологическая постоянная в ней положительная, а не отрицательная. Однако пример Малдасены демонстрирует, что пространству—времени совершенно не обязательно иметь начало, если мы принимаем во внимание также и квантовую гравитацию.

Возможны и менее абстрактные подходы к пониманию того, что, возможно, было до Большого взрыва. Самая очевидная стратегия — заменить Взрыв определенного рода отскоком. Представим себе, что Вселенная до того события, которое мы называем Большим взрывом, в действительности сжималась и становилась более плотной. Но вместо того чтобы скатиться в сингулярность Большого сжатия, Вселенная — каким-то образом — отскочила в фазу расширения; этот отскок мы и принимаем за Большой взрыв.

Вопрос в том, чем подобный отскок может быть вызван. Ничего подобного не могло бы произойти при условии истинности традиционных космологических предположений: классической общей теории относительности да нескольких разумных ограничений на тип вещества и энергии во Вселенной. Это означает, что нам надо как-то изменить эти правила. Мы можем просто всплеснуть руками и сказать: «Во всем виновата квантовая гравитация», но это несколько неудовлетворительный ответ.

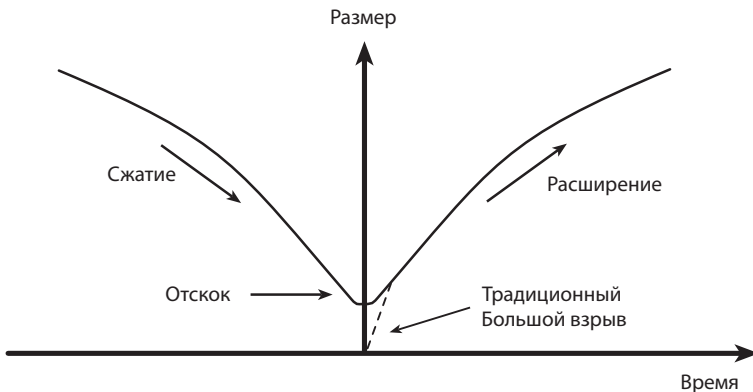


Рис. 15.3. В космологии Вселенной с отскоком сингулярность стандартного Большого взрыва заменяется (более или менее) гладким переходом от фазы сжатия к фазе расширения

В последние годы довольно много усилий было вложено в разработку моделей, сглаживающих сингулярность Большого взрыва до относительно мягкого отскока.¹⁵ Каждый из этих проектов предлагает возможность расширения истории Вселенной за пределы Большого взрыва, но в каждом случае трудно сказать, является ли предложенная модель самосогласованной. Так всегда и бывает, когда пытаешься понять рождение Вселенной в отсутствие полной теории квантовой гравитации.

Тем не менее о самом важном моменте забывать не стоит: даже если у нас нет одной полной и согласованной истории, рассказывающей о жизни Вселенной до Большого взрыва, космологи не покладая рук трудятся над решением этой задачи, и многое свидетельствует о том, что в конечном счете они добьются успеха. А возможность того, что Большой взрыв не был в действительности началом Вселенной, имеет серьезные последствия для стрелы времени.

Стрела всего времени

Если Большой взрыв был началом времен, то с формулировкой нашей главной загадки все понятно: почему вначале энтропия была так мала? Если же все началось *не* с Большого взрыва, то загадка остается, только теперь в иной формулировке: почему энтропия была мала во время отскока, который не был даже моментом рождения Вселенной? Это был всего лишь какой-то момент в вечной истории.

По большей части современные обсуждения отскакивающих космологий не касаются непосредственно вопроса энтропии.¹⁶ Однако очевидно, что добавление фазы сжатия перед отскоком не оставляет других вариантов: энтропия либо увеличивается по мере приближения Вселенной к отскоку, либо уменьшается.

На первый взгляд создается впечатление, что энтропия при движении Вселенной из прошлого к фазе отскока должна увеличиваться. В конце концов, если начальное условие было поставлено в ультрадалеком прошлом, то естественно ожидать, что с течением времени энтропия будет увеличиваться, даже если пространство сжимается. Это обычное толкование второго начала динамики, обеспечивающее единообразие стрелы времени на протяжении всей истории Вселенной. Этот вариант иллюстрирует нижний левый график на рис. 15.4. Явно или неявно, но именно его многие люди подразумевают в своих рассуждениях об отскакивающих космологиях.

Однако сценарий, в котором энтропия нашего сопутствующего участка продолжает увеличиваться и до, и во время, и после вселенского отскока, стал-

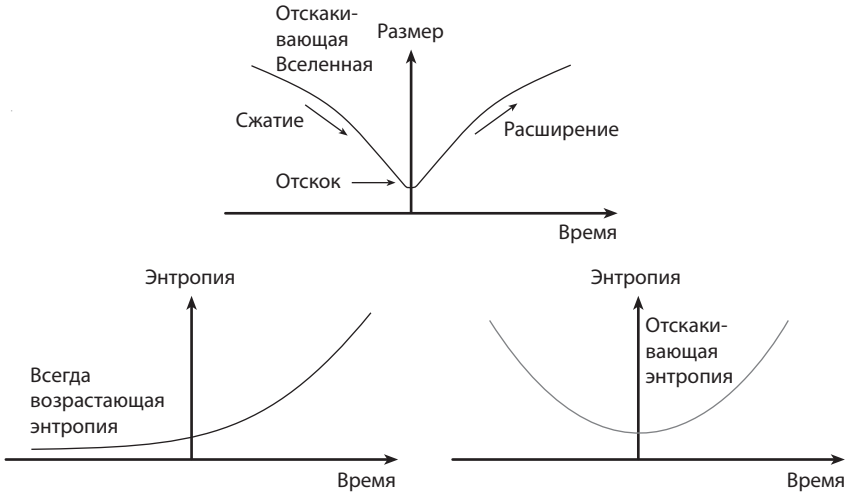


Рис. 15.4. Вверху: изменение размера отскакивающей Вселенной с течением времени; внизу: два возможных сценария эволюции энтропии. Энтропия может просто всегда увеличиваться, как показано внизу слева, обеспечивая однонаправленную стрелу времени на протяжении вечности. Или она может уменьшаться в фазе сжатия, прежде чем начать увеличиваться в фазе расширения, как показано внизу справа

кивается с невероятно сложной проблемой. Проблема традиционной космологии Большого взрыва такова: энтропия в современной наблюдаемой Вселенной относительно мала, а в прошлом была значительно меньше. Это подразумевает скрытую очень тонкую подстройку в *текущем* микросостоянии Вселенной, если мы хотим, чтобы энтропия уменьшалась при прокрутке истории в обратном направлении во времени с использованием все тех же законов физики. А в сценарии с отскоком, где мы отнесли «начало Вселенной» бесконечно далеко в прошлое, тонкая подстройка, необходимая для того же самого, должна быть бесконечно точной. Если мы верим в обратимые законы физики, то должны предполагать такое свойство у текущего состояния Вселенной, что процесс ее эволюции можно бесконечно отматывать назад и энтропия все это время будет только уменьшаться. Но это слишком высокие запросы.¹⁷

Необходимо также упомянуть о другой проблеме, тесно связанной с этой. Мы знаем, что энтропия нашего сопутствующего объема сразу после отскока должна быть маленькой — намного меньше, чем она могла бы быть. (В главе 13 мы сделали некоторые оценки и знаем, что значение энтропии было равно 10^{88} или меньше, тогда как оно могло бы достигать 10^{120} .) Из этого следует, что

прямо перед отскоком энтропия была такой же низкой или даже ниже. Если бы энтропия была высокой, то отскока бы не произошло; вы получили бы хаотическую мешанину, у которой не было бы никаких шансов превратиться в приятную и однородную Вселенную, из которой получились все мы. Так что нам приходится предположить, что этот сопутствующий объем пространства сжимался бесконечно долгое время (начиная с далекого прошлого и до момента отскока), и на протяжении этого процесса энтропия увеличивалась, но увеличение каким-то образом оказалось очень небольшим. Не то чтобы такое было невозможно себе представить, но это кажется, мягко выражаясь, довольно удивительным.¹⁸

Даже если мы позволим себе рассмотреть возможность необыкновенно тонкой подстройки, необходимой для того, чтобы позволить энтропии все время последовательно увеличиваться, у нас все равно нет абсолютно никаких причин полагать, что во Вселенной все действительно происходило именно таким образом. Мы пока не представили никакого оправдания тому, почему вообще наша Вселенная вообще должна быть тонко подстроена, но продолжаем призывать к бесконечно тонкой подстройке. Не очень похоже на прогресс.

Гипотеза о середине

Итак, это все подводит нас к необходимости рассмотреть альтернативу, изображенную на рис. 15.4 на правом нижнем графике: отскакивающая Вселенная, в которой энтропия *уменьшается* во время фазы сжатия, достигает минимального значения в момент отскока и после этого начинает увеличиваться. Возможно, теперь у нас получится прийти к какому-то результату. Явная модель такой отскакивающей космологии была предложена Энтони Агирре и Стивеном Граттоном в 2003 году. Их конструкция базируется на идее инфляции, и они демонстрируют, что путем хитрого разрезания и склеивания мы могли бы получить гладкий отскок, взяв инфляционную Вселенную, расширяющуюся по направлению к будущему, и приклеив ее к началу инфляционной Вселенной, расширяющейся по направлению к прошлому.¹⁹

У этой альтернативы есть огромное преимущество: поведение Вселенной симметрично во времени. Как размер Вселенной, так и ее энтропия достигают минимального значения в момент отскока и увеличиваются в обоих направлениях. Концептуально это большой шаг вперед по сравнению со всеми остальными рассмотренными ранее моделями; базовая симметрия законов физики относительно изменения направления времени отражается в крупномасштаб-

ном поведении Вселенной. В частности, мы избегаем ловушки, которую расставляет нам временной шовинизм, — искушения полагать, что «начальное» состояние Вселенной абсолютно не похоже на «конечное». Нам как раз и нужен был способ обойти заблуждение, приведшее к рассмотрению Вселенной Голда, которая также симметрична относительно одного момента во времени. Теперь, когда мы позволяем себе думать о возможной Вселенной до Большого взрыва, решение выглядит более приемлемым: Вселенная симметрична, и не потому, что энтропия низка на обоих концах времени, а потому, что она на обоих концах *высока*.

Как бы то ни было, это очень смешная Вселенная. Эволюция энтропии отвечает за всевозможные проявления стрелы времени, включая нашу способность помнить прошлое и наше ощущение того, что мы движемся сквозь время. В сценарии с отскакивающей энтропией стрела времени в момент отскока *меняет направление на противоположное*. С точки зрения нашей наблюдаемой Вселенной, изображенной на рис. 15.4 в правой части графиков, прошлое — это низкоэнтропийное направление времени, указывающее в сторону отскока. Но наблюдатели с противоположной стороны отскока, которую мы на графиках называем (со своей колокольни) «сжатием», также определяют «прошлое» как направление времени, в котором энтропия была ниже, то есть направление к отскоку. С точки зрения локального наблюдателя стрела времени всегда указывает в сторону увеличения энтропии. По обеим сторонам от отскока стрела времени указывает в «будущее», в котором Вселенная расширяется и опустошается. С точки зрения наблюдателя, находящегося на одной (любой) стороне, наблюдатели на противоположной стороне живут «в обратную сторону во времени». Однако такое несовпадение направлений стрел абсолютно не поддается наблюдению — люди по одну сторону от отскока не могут общаться с людьми по другую сторону, точно так же, как мы не в состоянии перекинуться парой слов с кем-нибудь из нашего прошлого. Каждый видит, что второе начало термодинамики работает стандартным образом в его наблюдаемой части Вселенной.

К сожалению, космоса с отскакивающей энтропией недостаточно для того, чтобы мы без всякого зазрения совести могли объявить, что нашли решение проблемы, сформулированной в начале этой главы. Разумеется, допуская существование космологического отскока, также представляющего точку минимального значения энтропии Вселенной, мы избегаем философских заблуждений, связанных с определением изначальных и конечных условий на совершенно разных основаниях. Но и за это приходится платить ценой новой загадки: почему энтропия так низка *в середине* истории Вселенной?

Другими словами, модель с отскакивающей энтропией сама по себе ничего не объясняет о стреле времени. Вместо этого она устраняет необходимость в гипотезе о прошлом и вместо нее вводит необходимость в гипотезе о середине. Нам опять требуется точно такая же тонкая подстройка, и мы все так же пытаемся объяснить, почему конфигурация нашего сопутствующего объема пространства находится в таком низкоэнтропийном состоянии рядом с космологическим отскоком. Таким образом, получается, что нам предстоит проделать еще очень много работы.

Новорожденные Вселенные

Мы должны предпринять честную попытку предоставить надежное динамическое объяснение низкой энтропии нашей ранней Вселенной, и для этого нам нужно сделать шаг назад. Забудем на мгновение все, что мы знаем о нашей фактической Вселенной, и вернемся к вопросу, который мы задавали в главе 13: как *должна* выглядеть Вселенная? Я отстаивал точку зрения, что естественная Вселенная — та, которая не полагается на тонко подстроенные низкоэнтропийные граничные условия ни в какой момент времени, ни в прошлом, ни в настоящем, ни в будущем, — и выглядела бы она просто-напросто как пустое пространство. Если же присутствует небольшая положительная энергия вакуума, то пустое пространство принимает форму пространства де Ситтера.

Следовательно, любая современная космологическая теория должна отвечать на вопрос, почему мы не живем в пространстве де Ситтера. У него высокая энтропия, оно существует на протяжении вечности, и кривизна пространства—времени порождает небольшую, но все же ненулевую температуру. Пространство де Ситтера пусто, за исключением разреженного фонового термального излучения, так что по большей части оно совершенно непригодно для жизни; там нет стрелы времени, поскольку оно находится в тепловом равновесии. В пространстве будут наблюдаться термодинамические флуктуации, точно такие же, каких можно было бы ожидать в запечатанном контейнере с газом в ньютоновском пространстве—времени. Подобные флуктуации могут приводить к появлению больцмановских мозгов, целых галактик или любых других макросостояний, которые вы только можете себе вообразить, — нужно лишь подождать достаточно долго. Однако мы не похожи на такую флуктуацию, — если бы мы были ею, то мир вокруг нас был бы настолько высокоэнтропийным, насколько это вообще возможно, что, очевидно, не так.

Из этого затруднительного положения есть выход: пространство де Ситтера, возможно, не существует в вечном ничем не нарушаемом покое. С ним

может что-то происходить. В этом случае все, что мы говорили о бозе-майонских мозгах, разом теряет смысл. Тот аргумент можно было принимать всерьез только потому, что мы точно знали, с системой какого типа имеем дело — газом при фиксированной температуре, и мы знали, что она будет существовать вечно, так что даже очень маловероятные события в конце концов произойдут. К тому же мы могли надежно вычислить относительную частоту появления разнообразных сомнительных событий. Если же мы усложним эту картину, то про вероятности флуктуаций можно забыть! (Как минимум про большинство из них.)

Нетрудно вообразить варианты того, как вечное существование пространства де Ситтера могло бы прерваться. Вспомните, что модель «старой инфляции», по сути, представляла период пространства де Ситтера в ранней Вселенной с очень высокой плотностью энергии, которую обеспечивало поле инфлатона, застрявшее в состоянии ложного вакуума. При условии, что существует другое состояние вакуума с более низкой энергией, это пространство де Ситтера в конечном счете подвергнется распаду путем появления пузырей истинного вакуума. Если пузыри будут появляться очень быстро, то ложный вакуум исчезнет полностью; если же они станут появляться медленно, то в итоге мы получим фрактальную смесь из пузырей истинного вакуума на неумирающем фоне ложного вакуума.

В случае инфляции критическое наблюдение состояло в том, что плотность энергии во время фазы де Ситтера была очень высока. Сейчас нас интересует противоположный конец спектра — тот, где энергия вакуума чрезвычайно низка, как в нашей текущей Вселенной.

Это порождает огромные различия. Высокоэнергетические состояния естественным образом стремятся распасться до состояний с более низкой энергией, но не наоборот. И причина не в сохранении энергии, а в энтропии.²⁰ Энтропия, соответствующая пространству де Ситтера, низка, когда плотность энергии высокая, и высока, когда плотность энергии низкая. Распад высокоэнергетического пространства де Ситтера до состояния с меньшей энергией вакуума — это всего лишь естественная эволюция низкоэнтропийного состояния в высокоэнтропийное. Однако мы хотим узнать, как избежать ситуации, подобной той, в которую эволюционирует наша Вселенная, — пустое пространство де Ситтера с очень маленькой энергией вакуума и очень высокой энтропией. Куда нам податься?

Если бы правильная всеобщая теория была квантовой теорией поля на фоне классического пространства де Ситтера, то путей для отступления у нас бы не было. Пространство продолжало бы расширяться, квантовые поля продолжали

бы флуктуировать, а мы пребывали бы в ситуации, описанной Больцманом и Лукрецием или очень похожей на нее. Но существует один (по крайней мере) вариант побега, который обеспечивает нам квантовая гравитация: создание *новорожденных Вселенных*. Если пространство де Ситтера дает начало непрерывному потоку Вселенных-младенцев, каждая из которых при рождении обладает низкой энтропией и расширяется в свою собственную высокоэнтропийную фазу де Ситтера, то, возможно, это и служит естественным механизмом увеличения энтропии Вселенной.

Как уже не раз говорилось, мы очень многого относительно квантовой гравитации не понимаем. Но мы довольно хорошо разбираемся в классической гравитации, а также в квантовой механике, так что у нас есть определенные обоснованные ожидания относительно того, что должно происходить в квантовой гравитации, даже если детали пока остаются скрытыми от нас. В частности, мы ожидаем, что само пространство—время будет подвержено квантовым флуктуациям. На деситтеровском фоне должны флуктуировать не только квантовые поля, само пространство де Ситтера должно испытывать флуктуации.

Один из вариантов флуктуаций пространства—времени был изучен в 1990-е годы Эдвардом Фархи, Аланом Гутом и Джемалем Гувеном.²¹ Они предположили, что пространство—время может не только сгибаться и растягиваться, как в обычной классической теории относительности, но также разделяться на множество кусочков. В частности, крохотный кусочек пространства может оторваться от более крупной Вселенной и начать эволюционировать самостоятельно. Этот отдельный кусочек пространства, как и следовало ожидать, называется новорожденной Вселенной. (В противоположность «карманным Вселенным», о которых мы упоминали в предыдущей главе и которые навсегда остаются связанными с фоновым пространством—временем.)

Мы могли бы добавить новые уровни детализации. Термальные флуктуации в пространстве де Ситтера — это в действительности флуктуации лежащих в их основе квантовых полей; частицы — это то, что мы видим, когда наблюдаем эти поля. Представим, что одно из таких полей обладает подходящими свойствами для того, чтобы служить инфлатоном, — в его потенциале есть участки, такие как впадина ложного вакуума или плато новой инфляции, где поле может пребывать в относительно неподвижном состоянии. Однако вместо того чтобы начинать эволюцию вблизи одного из подобных участков, мы интересуемся, что произойдет, если поле стартует вниз, где энергия вакуума очень мала. Квантовые флуктуации будут периодически выталкивать поле к более *высоким* значениям потенциала, из истинного вакуума в ложный — не во всем пространстве, но в некоторых небольших его областях.

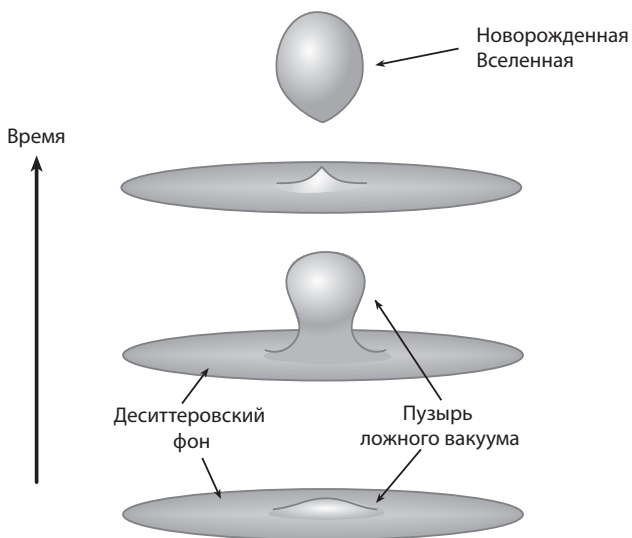


Рис. 15.5. Создание новорожденной Вселенной за счет образования квантовой флуктуации — пузыря ложного вакуума

Что происходит, когда в пространстве де Ситтера в результате некоей флуктуации появляется пузырь ложного вакуума? И снова, не буду скрывать, окончательного ответа на этот вопрос тоже пока нет.²² В большинстве случаев поле просто рассеется, снова смешавшись со своим термальным окружением. Внутри ложного вакуума, в который мы флуктуировали, пространство начнет расширяться; но стенка, отделяющая внутренность пузыря от всего, что находится за его пределами, хочет сжиматься, и чаще всего так и происходит: стенка сжимается, прежде чем что-либо серьезное успеет произойти.

Время от времени, однако, нам может улыбнуться удача. Соответствующий маловероятный процесс изображен на рис. 15.5. То, что мы здесь видим, — это одновременно флуктуация поля инфлатона, создающая пузырь ложного вакуума, и флуктуация самого пространства, при которой появляется область, отщепляющаяся от оставшейся части Вселенной. Крохотное горлышко, соединяющее их, — это кротовая нора (мы обсуждали ее в главе 6). Но эта кротовая нора нестабильна и быстро сколлапсирует в ничто, оставив нам лишь два не связанных между собой пространства—времени: исходную родительскую Вселенную и миниатюрного младенца.

Теперь у нас есть новорожденная Вселенная, в которой доминирует энергия ложного вакуума и все подготовлено для инфляции и расширения до

невероятного размера. Если ложный вакуум обладает нужными свойствами, то энергия в конце концов преобразуется в обычное вещество и излучение, и мы получим Вселенную, эволюционирующую в соответствии со стандартной историей «инфляция плюс Большой взрыв». Новорожденная Вселенная может вырасти до какого угодно размера; здесь нет ограничений, связанных, скажем, с законом сохранения энергии. Это забавное свойство общей теории относительности: общая энергия замкнутой компактной Вселенной в точности равна нулю, если в дополнение ко всему остальному принимать во внимание также энергию гравитационного поля. Таким образом, инфляция может взять микроскопический шарик пространства и раздуть его до размера нашей наблюдаемой Вселенной (или даже намного больше). По словам Гута: «Инфляция — это эталон бесплатного сыра».

Разумеется, в самом начале энтропия новорожденной Вселенной была очень мала. Это может показаться каким-то жульничеством — ведь мы столько претерпели, доказывая, что все множество степеней свободы в нашей наблюдаемой Вселенной существовало, еще когда Вселенная была молода, и если бы мы случайным образом выбирали из них какую-то конфигурацию, то чрезвычайно маловероятно, что это оказалось бы низкоэнтропийное состояние! Однако все это правда, а процесс создания новорожденной Вселенной просто-напросто не относится к тем, в которых конфигурация нашей Вселенной выбирается случайным образом. Существует один очень специальный способ: это конфигурация, для которой наиболее высока вероятность появиться в форме квантовой флуктуации в пустом фоновом пространстве — времени и которая способна отщепиться и превратиться в автономную Вселенную. Если рассматривать все вместе, то станет очевидно, что энтропия Мультиленной не уменьшается во время этого процесса; начальное состояние представляет собой высокоэнтропийное пространство де Ситтера, и оно эволюционирует в высокоэнтропийное пространство де Ситтера плюс маленькая дополнительная Вселенная. Это не флуктуация равновесной конфигурации в низкоэнтропийное состояние, а превращение высокоэнтропийного состояния в состояние с еще более высокой энтропией.

Возможно, вам кажется, что рождение новой Вселенной — это эффективное и болезненное событие, такое же, как рождение нового человека. Но в действительности это не так. Ситуация внутри пузыря, конечно же, довольно драматична — все-таки новая Вселенная появилась там, где до этого ничего не было. Тем не менее с точки зрения внешнего наблюдателя из родительской Вселенной весь процесс практически незаметен. Выглядит он всего лишь как флуктуация частиц в термальном ансамбле, которые собираются вместе, формируя область очень высокой плотности, — по сути, черную дыру. Однако это микроскопи-

ческая черная дыра с невероятно маленькой энтропией, которая затем испаряется в форме хоккинговского излучения чуть ли не быстрее, чем сформировалась. Рождение новой Вселенной — процесс куда менее травмирующий, чем рождение человеческого младенца.

Действительно, если эта история — правда, то новорожденная Вселенная могла бы появиться прямо рядом с вами, в той же комнате, где вы читаете эту книгу, и вы бы этого никогда не заметили. Но вероятность этого не очень высока; скорее всего, подобные события никогда не происходили во всем пространстве—времени Вселенной, которое мы в состоянии наблюдать. Однако даже если происходили, то все действие не выходило за пределы микроскопического масштаба. Новая Вселенная может вырасти до невероятных размеров, но она все равно будет полностью оторвана от исходного пространства—времени. Как это бывает и со многими детьми, новорожденная Вселенная совершенно не общается со своим родителем; стоит им разделиться, и они останутся разъединенными навсегда.

Неугомонная Мультиленная

Таким образом, вполне возможно, что даже когда пространство де Ситтера находится в высокоэнтропийном состоянии истинного вакуума, оно не совсем стабильно. Оно может порождать новые младенческие Вселенные, которые затем самостоятельно вырастают до больших Вселенных (и также способны давать жизнь новым малышам). Исходное пространство де Ситтера продолжает существовать, как и раньше, по сути, совершенно не потревоженное.

Перспектива появления новорожденных Вселенных совершенно меняет вопрос стрелы времени. Вспомните нашу основную дилемму: самый естественный вариант Вселенной — это пространство де Ситтера, пустое пространство с положительной энергией вакуума, которое ведет себя как вечный контейнер с газом при фиксированной температуре. Газ большую часть времени пребывает в тепловом равновесии, с редкими флуктуациями в состоянии с меньшей энтропией. В таких условиях можно с довольно высокой степенью надежности оценивать как количество флуктуаций разных типов, так и частоту их появления. Какую бы вещь вы ни желали видеть в флуктуации — человека, галактику или даже сотню миллиардов галактик, — данный сценарий надежно предсказывает, что большинство подобных флуктуаций будут выглядеть так, словно они находятся в равновесии, за исключением наличия самой флуктуации. Помимо этого, большинство подобных флуктуаций будут порождаться высокоэнтропийными состояниями и эволюционировать обратно в высокоэнтропийные состояния. Это означает,

что большинство наблюдателей будут обнаруживать себя во Вселенной в полном одиночестве в форме случайных сгустков молекул, отпочковавшихся от окружающего высокоэнтропийного газа частиц. То же самое верно для большинства галактик и т. д. Конечно, потенциально возможна и флуктуация во что-то похожее на историю нашей космологии Большого взрыва; но количество наблюдателей внутри такой флуктуации намного меньше, чем количество наблюдателей, находящихся во Вселенной в полном одиночестве.

Новорожденные Вселенные кардинально меняют картину. Теперь мы больше не можем говорить, что единственный возможный вариант развития событий — это термодинамическая флуктуация прочь от равновесия и затем обратно. Новорожденная Вселенная — это также своеобразная флуктуация, но флуктуация, которая никогда не возвращается назад: она растет и охлаждается и никогда не воссоединяется с исходным пространством—временем.

Что мы сейчас сделали — это позволили Вселенной беспредельно увеличивать свою энтропию. Во Вселенной де Ситтера пространство растет неограниченно, но часть пространства, видимая любому наблюдателю, остается конечной, а также обладает конечной энтропией, равной площади поверхности космологического горизонта. В пределах этого пространства поля флуктуируют при фиксированной температуре, которая никогда не изменяется. Это равновесная конфигурация, в которой любые процессы происходят настолько же часто, насколько и обратные к ним во времени. Как только в игру вступают новорожденные Вселенные, система выходит из равновесия по той простой причине, что такой штуки, как равновесие, теперь не существует. В присутствии положительной энергии вакуума (согласно этой истории) энтропия Вселенной никогда не достигает максимального значения и не замирает на нем, так как максимального значения энтропии Вселенной просто нет — она всегда может увеличиться еще больше, если будут рождаться новые Вселенные. Именно это позволяет нам избежать парадокса из сценария Больцмана—Лукреция.

Рассмотрим простую аналогию: шар, скатывающийся с холма. Не квантовое поле, движущееся в своем потенциале, а обычный шар. Однако скатывается он не по обычному земному холму, а по особому, у которого нет основания, так что шару приходится плавно катиться вниз в бесконечность. Кроме того, поверхность холма не создает абсолютно никакого трения, поэтому общая энергия катящегося шара никогда не меняется.

Теперь спросим себя: что шар должен делать? То есть если мы внезапно обнаружим такой шар, чудесным образом функционирующий как изолированная система на протяжении вечности, не испытывая влияния со стороны оставшейся части Вселенной, то в каком состоянии можно ожидать его увидеть?

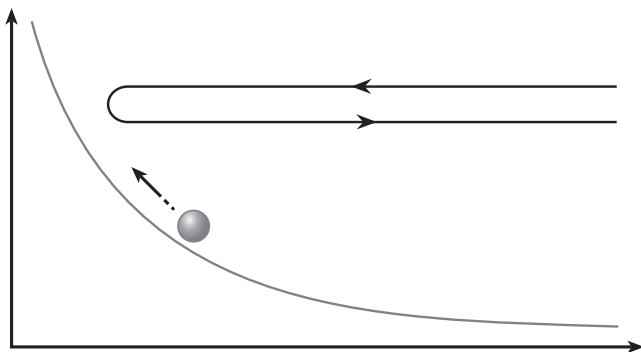


Рис. 15.6. Шар, катящийся по бесконечному холму. У такого шара может быть только одна траектория: появляться из бесконечно далекой дали в бесконечно далеком прошлом, закатываться вверх до точки поворота, менять направление и скатываться обратно в бесконечность в бесконечном будущем

Это может быть разумным вопросом, а может и не быть, но дать ответ на него совсем нетрудно, потому что такой шар не обладает большим разнообразием вариантов действий. Все допустимые траектории шара выглядят, по сути, одинаково: он прикатывается из бесконечности, разворачивается и скатывается обратно. В зависимости от общей энергии шара точка поворота на холме может находиться на разной высоте, но качественно поведение всегда будет одним и тем же. Таким образом, в жизни шара точно есть один момент, когда он не движется, — в точке, где он меняет направление движения на противоположное. В любой другой момент он катится либо влево, либо вправо. Следовательно, если мы взглянем на шар в какой-то случайный момент времени, то с большой вероятностью он в этот момент будет катиться либо в одном направлении, либо в другом.

Теперь представим себе, что внутри шара живет целая крохотная цивилизация, население которой включает крохотных ученых и философов. Одна из самых любимых тем для обсуждения у них — это то, что они называют «стрелой движения». Мыслители заметили, что их шар эволюционирует в идеальном соответствии с законами движения Ньютона. Законы не отличают «право» от «лево»; они полностью обратимы. Если шар поместить во впадину, то он просто останется там навечно без движения. Если начать с точки чуть выше на склоне холма возле впадины, то он сначала скатится вниз, а затем продолжит катиться вперед и назад в этой небольшой окрестности. Но все же их конкретный шар неизменно катится в одном и том же направлении в течение очень длительных периодов времени! Что же с ним может быть такое?

На случай, если условия этой несколько странной аналогии вам непонятны, поясню: шар представляет нашу Вселенную, а положение на склоне холма — левее или правее — представляет энтропию. Причина, почему нас не удивляет, что шар катится в неизменном направлении, заключается в том, что шар всегда стремится катиться в одном и том же направлении, за исключением одной особой точки разворота. Несмотря на внешнее различие, та часть траектории, где шар катится справа налево, ничем не отличается от той части, где шар катится слева направо; движение шара симметрично во времени по отношению к точке поворота.

Возможно, энтропия Вселенной ведет себя так же. Реальная проблема с пространством де Ситтера (без новорожденных Вселенных) состоит в том, что оно почти всегда пребывает в равновесии. Любой отдельно взятый наблюдатель видит термальную баню, существующую на протяжении вечности, с предсказуемыми флуктуациями. В более общем смысле, если в контексте космологии существует такая штука, как «равновесие», то трудно понять, почему мы не обнаруживаем Вселенную в этом состоянии. Предполагая, что равновесия не существует, мы избегаем этой дилеммы. Наблюдение растущей энтропии становится естественным делом, просто потому что энтропия способна постоянно увеличиваться.

Это сценарий, который мы с Дженнифер Чен предложили в 2004 году.²³ Мы начали с предположения, что Вселенная вечно — Большой взрыв не был началом времен — и что пространство де Ситтера представляет собой естественное высокоэнтропийное состояние, в котором должна пребывать Вселенная. Это означает, что в качестве «старта» можно взять любое понравившееся вам состояние — выберите симпатичное лично вам распределение вещества и энергии в пространстве и позвольте ему эволюционировать. Мы поместили слово *старт* в кавычки, так как не хотим создавать у вас предвзятое отношение к начальным условиям по сравнению с условиями в любой другой момент времени; уважая обратимость законов физики, мы допускаем эволюцию состояния как вперед, так и назад во времени. Как я уже говорил выше, естественная эволюция вперед во времени означает, что пространство будет расширяться и опустошаться, переходя в конце концов в состояние де Ситтера. Однако после того как оно достигнет этого состояния, если мы подождем достаточно долго, то увидим, как оно начнет время от времени путем квантовых флуктуаций производить новорожденные Вселенные. Эти новорожденные Вселенные станут расширяться и раздуваться, и их энергия ложного вакуума в итоге преобразуется в обычное вещество и излучение, которые будут рассеиваться до тех пор, пока у нас на руках снова не останется пространство де Ситтера. Теперь и исходная Вселенная, и новая Вселенная могут порождать новых младенцев. Про-

цесс продолжается бесконечно. В областях пространства—времени, которые выглядят по-дезиттеровски, Вселенная находится в равновесии, и стрелы времени там нет. Но в новорожденных Вселенных на протяжении всего периода от начального зарождения до финального остывания существует ярко выраженная стрела времени: энтропия стартует практически с нуля и увеличивается до своего равновесного расстояния.

Самое интересное, что эту историю можно рассказать обратно во времени, снова взяв за точку отсчета начальное состояние, как показано на рис. 15.7. Если это еще не пространство де Ситтера, то Вселенная будет стремиться к опустошению назад во времени — точно так же, как и вперед. После этого она начнет создавать новорожденные Вселенные, которые будут расширяться и охлаждаться. В этих новорожденных Вселенных стрела времени ориентирована в противоположном направлении по сравнению со Вселенными, которые мы поместили в «будущее». И конечно же, общее направление временной координаты абсолютно произвольно. Наблюдатели во Вселенных в верхней части диаграммы будут думать о нижней части как о «прошлом», тогда как наблюдатели в нижних Вселенных будут считать «прошлым» Вселенные наверху. Их стрелы времени противоположны, но это не ведет к неприятностям, какие испытывал Бенджамин Баттон; эти новорожденные Вселенные абсолютно не связаны между собой во времени, и их стрелы указывают в разные стороны, поэтому никакая коммуникация между ними невозможна.

В этом сценарии Мультиенная на ультрабольших масштабах симметрична относительно центрального момента времени; по крайней мере статистически, далекое будущее и далекое прошлое неразличимы. В этом смысле данная картина напоминает отскакивающие космологии, которые мы обсуждали раньше: энтропия увеличивается на протяжении вечности в обоих направлениях времени по отношению к центральной точке, соответствующей минимальному значению энтропии. Однако есть и критически важное отличие: момент «наименьшей» энтропии не является в действительности моментом «низкой» энтропии. Центральный момент не был тонко подстроен, чтобы подогнать его под какие-то особые очень низкоэнтропийные начальные условия, как в типичных отскакивающих моделях. Энтропия там настолько высока, насколько это возможно для одной связанной Вселенной в присутствии положительной энергии вакуума. В этом-то и заключается трюк: разрешить энтропии продолжать возрастать в обоих направлениях времени, несмотря на то что она с самого начала была немаленькой. Нам бы не удалось найти такое начальное состояние, для которого такой вариант эволюции был бы невозможен. Стрела времени неизбежна.²⁴



Рис. 15.7. Новорожденные Вселенные создаются в фоновом пространстве де Ситтера как по направлению к прошлому, так и по направлению к будущему. Каждая новорожденная Вселенная начинается с плотного низкоэнтропийного состояния и по мере расширения и охлаждения демонстрирует локальную стрелу времени. Мультиленная обладает глобальной симметрией относительно выбора направления времени: стрела времени в новорожденных Вселенных, появляющихся в прошлом, направлена в противоположном направлении по сравнению со стрелой времени в новорожденных Вселенных из будущего

Даже с учетом всего вышесказанного мы все равно можем задаваться вопросом, почему наш наблюдаемый участок Вселенной демонстрирует такое низкоэнтропийное граничное условие на одном конце времени: почему наши конкретные степени свободы когда-то находились в таком неестественном состоянии? Но в этой картине не совсем правильно ставить вопрос таким образом. Нельзя говорить, что нам с самого начала известно, какие степени свободы мы представляем, и что это дает нам право интересоваться, почему они находятся (или были) в определенной конфигурации. Вместо этого мы должны смотреть на Мультиленную как на единое целое и спрашивать о том, что наиболее часто предстает взору наблюдателей, таких как мы сами. (Если наш сценарий окажется путным, то конкретное определение «таких, как мы сами» не должно играть роли.)

В данной версии Мультиленной мы встретим как изолированные бальмановские мозги, притаившиеся в пустых деситтеровских областях, так и обычных наблюдателей, обнаруживаемых в шлейфах низкоэнтропийного начала новорожденных Вселенных. При этом представителей обоого типа должно быть бесконечно много. Но какая бесконечность выигрывает? Типы флуктуаций, создающих причудливых наблюдателей на равновесном фоне, определено редки, но и другие, результатом которых становятся новорожденные Вселенные, также далеко не часты. В конечном итоге нас перестанет удовлетворять рассмотрение смешных картинок со Вселенными, разветвляющимися в обоих направлениях во времени; мы хотим понять вещи на количественном уровне настолько, насколько это возможно, для того чтобы делать надежные предсказания. Тем не менее приходится признать, что состояние дел пока не настолько хорошее. И все же вполне вероятно, что намного больше наблюдателей появляется по мере того, как новорожденные Вселенные растут и охлаждаются, стремясь к равновесию, чем из случайных флуктуаций в пустом пространстве.

Собирая все вместе

Работает ли это? Предлагает ли сценарий Мультиленной с новорожденными Вселенными удовлетворительное объяснение стрелы времени?

Мы рассмотрели много возможных подходов к проблеме стрелы времени: пространство состояний, которое меняется с течением времени, необратимые по своей природе динамические законы, особое граничное условие, симметричная расширяющаяся и сжимающаяся Вселенная, отскакивающая Вселенная с глобальной симметрией обращения времени и без нее, неограниченная Мультиленная и, конечно же, сценарий Больцмана—Лукреция с флуктуациями вокруг вечного равновесного состояния. Вселенная Голда, в которой происходит повторное сжатие, кажется довольно маловероятным вариантом на эмпирических основаниях, так как скорость расширения Вселенной все время увеличивается. А Вселенную Больцмана—Лукреция позволяют вычеркнуть из списка результаты наблюдений, поскольку Большой взрыв обладал намного меньшей энтропией, чем допускается условиями этой теории. Однако прочие возможности еще не сняты с обсуждения; каждая из них предоставляет более или менее удовлетворительный ответ, но ни в одной мы не можем быть уверены настолько, чтобы со спокойной совестью отбросить остальные. Не говоря уже о вполне реальной возможности того, что истинно верную теорию еще никто не придумал.

Трудно сказать, сыграют ли в конечном итоге какую-либо роль в понимании стрелы времени новорожденные Вселенные и Мультивселенная. Начнем с того, что я приложил усилия (возможно, даже чрезмерные), для того чтобы подчеркнуть, что многие шаги на этом пути были, мягко говоря, дерзновенно спекулятивными. Мы еще не достигли того уровня понимания квантовой гравитации, при котором могли бы уверенно заявлять, что в пространстве де Ситтера на самом деле происходят флуктуации, создающие новорожденные Вселенные; существуют аргументы как «за», так и «против». Также мы еще не пришли к окончательному пониманию роли энергии вакуума. Мы в своих рассуждениях отталкивались от мнения, что космологическая постоянная, которую мы наблюдаем в нашей Вселенной сегодня, действительно представляет минимально возможную энергию вакуума, но мы не располагаем обширной базой твердых доказательств этого предположения. Например, в контексте ландшафта теории струн достаточно легко получить состояния с правильным значением энергии вакуума, но точно так же легко получить любые другие виды состояний, включая состояния с отрицательной энергией вакуума или точно равной нулю. Более универсальная теория квантовой гравитации и Мультиленной описывала бы, как все эти возможные состояния соответствуют друг другу, включая переходы между разным числом макроскопических измерений, а также между разными значениями энергии вакуума. К тому же стоит упомянуть, что мы в действительности не относились к квантовой механике со всей серьезностью — мы кивали в сторону квантовых флуктуаций, но рисовали картины того, что по сути является классическими пространствами—временами. Правильный ответ, каким бы он ни оказался, с большой вероятностью будет сформулирован в терминах волновых функций, уравнения Шрёдингера и гильбертовых пространств.

Самое важное во всем этом — не перспективы доказательства истинности какой-то определенной модели, а ключевые подсказки, которые мы, пытаясь понять Вселенную на самых больших масштабах, получаем от стрелы времени. Если все на самом деле ограничивается той Вселенной, которую мы видим, — с Большим взрывом в роли низкоэнтропийного начала, то, похоже, мы зашли в тупик с неприятной проблемой тонкой подстройки. Встраивание нашего наблюдаемого участка в более обширную Мультиленную смягчает эту проблему за счет изменения контекста: теперь целью становится объяснение не того, почему вся Вселенная обладает низкоэнтропийным граничным условием в начале времен, а того, почему в намного более крупной системе возникают относительно небольшие области пространства—времени, где энтропия резко возрастает. На этот вопрос, в свою очередь, можно ответить, если допустить,

что у Мультиленной вообще нет состояния максимальной энтропии: энтропия увеличивается, потому что она способна возрастать бесконечно, независимо от того, в каком состоянии мы находимся. Трюк в том, чтобы обставить все так, что механизм, за счет которого происходит всеобщее увеличение энтропии, окажется воспроизводство Вселенных, напоминающих нашу собственную.

Что приятно в Мультиленной, в основе которой лежит пространство де Ситтера и новорожденные Вселенные, так это то, что она избегает всех стандартных ловушек, преграждающих дорогу многим другим подходам к стреле времени: она обращается с прошлым и будущим на равных условиях, не прибегает к необратимости на уровне фундаментальной динамики и никогда не предполагает возможность в произвольный момент времени по требованию обустроить низкоэнтропийные условия для всей Вселенной. Она служит демонстрацией того, что подобное объяснение по крайней мере потенциально возможно, даже если мы не можем пока судить о том, разумен ли этот конкретный его вариант, не говоря уж о том, является ли он частью правильного окончательного ответа. У нас есть все основания надеяться, что в конце концов мы придем к уверенному пониманию того, как стрела времени динамически и естественно порождается самими законами физики.

Примечания

- ¹ *Pascal, B. Pensées*. Translated by A. J. Krailsheimer. New York: Penguin Classics, 1995.
- ² Было бы еще лучше, если бы какой-нибудь молодой человек или девушка прочитали эту книгу, уверовали бы, что это серьезная проблема, стоящая нашего внимания, и принялись бы за ее решение. Хотя и не обязательно молодой — возраст на самом деле совершенно не важен. В любом случае, если вы вдруг придумаете объяснение стрелы времени, которому удастся заслужить одобрение всего физического сообщества, пожалуйста, дайте мне знать, есть ли в этом какая-либо заслуга моей книги.
- ³ Пожалуй, ближайшей аналогией будет сценарий «голографической космологии», в защиту которого выступают Том Бэнкс и Вилли Фишлер (*Banks, T., Fischler, W. Holographic Cosmology 3.0 // Physica Scripta*, 2005, T117, p. 56–63; см. также *Banks, T. Entropy and Initial Conditions in Cosmology* (2007). <http://arxiv.org/abs/hep-th/0701146>). Они предполагают, что эффективные динамические законы квантовой гравитации могут очень сильно отличаться в разных пространствах—временах. Другими словами, сами законы физики могут зависеть от времени. Это спекулятивный сценарий, но на него стоит обратить внимание.
- ⁴ Похожая стратегия заключается в том, чтобы постулировать определенную форму волновой функции Вселенной, как сделали, например, Джеймс Хартл и Стивен Хокинг (*Hartle, J. B., Hawking, S. W. Wave Function of the Universe // Physical Review D*, 1983, 28, p. 2960–2975). Они полагаются на подход, известный под названием евклидовой квантовой гравитации (но попытки оценить преимущества и недостатки данного подхода уведут

нас слишком далеко от вопросов, которыми мы интересуемся в настоящий момент). Согласно их предположению, из волновой функции Хартла—Хокинга следует, что наша Вселенная должна быть однородной вблизи Большого взрыва, что объясняет стрелу времени (Halliwell, J. J., Hawking, S. W. Origin of Structure in the Universe // *Physical Review D*, 1985, 31, p. 1777), но верность приближения, используемого для получения данного результата, не совсем ясна. Лично я подозреваю, что волновая функция Хартла—Хокинга предсказывает, что мы должны жить в пустом пространстве де Ситтера — точно к такому же результату мы пришли, когда рассматривали энтропию обычным образом.

- ⁵ Penrose, R. Singularities and Time-Asymmetry / In: *General Relativity, and Einstein Centenary Survey* / S. W. Hawking, W. Israel (eds.). Cambridge: Cambridge University Press, 1979, p. 581–638. Если глубже копнуть математический формализм, описывающий искривленность пространства—времени, вы обнаружите, что кривизна бывает двух видов: есть «кривизна Риччи», названная так в честь итальянского математика Грегорио Риччи-Курбастро, и «кривизна Вейля», получившая свое название в честь немецкого математика Германа Вейля. Кривизна Риччи тесно связана с материей и энергией в пространстве—времени: если хоть какое-то вещество есть, кривизна Риччи отлична от нуля, а если ничего нет, то и кривизна Риччи пропадает. Кривизна Вейля, с другой стороны, может существовать сама по себе; например, гравитационная волна свободно распространяется в пространстве, порождая кривизну Вейля, но не кривизну Риччи. Гипотеза кривизны Вейля утверждает, что сингулярностям в одном направлении во времени всегда соответствует нулевая кривизна Вейля, тогда как сингулярности в противоположном направлении ничем не ограничены. Можно даже использовать такие описательные характеристики, как *начальные* и *конечные* сингулярности, так как направлению с низкой кривизной Вейля всегда будет соответствовать низкая энтропия.
- ⁶ Еще одна проблема — очевидная опасность появления бoльцмановских мозгов, если Вселенная в будущем войдет в вечную фазу де Ситтера. Кроме того, концепция «сингулярности» из классической общей теории относительности вряд ли в теории квантовой гравитации сохранит свой первоначальный вид. Более реалистичная версия гипотезы кривизны Вейля должна быть сформулирована на языке квантовой гравитации.
- ⁷ Gold, T. The Arrow of Time // *American Journal of Physics*, 1962, 30, p. 403–410.
- ⁸ В течение небольшого периода времени Стивен Хокинг полагал, что его подход к квантовой космологии предсказывает, будто стрела времени на самом деле развернется в обратную сторону в случае повторного сжатия Вселенной (Hawking, S. W. The Arrow of Time in Cosmology // *Physical Review D*, 1985, 32, p. 2489). Дон Пейдж убедил его, что это не так — согласно правильной интерпретации, у волновой функции две ветви, ориентированные в противоположных направлениях во времени (Page, D. N. Will Entropy Decrease If the Universe Recollapses? // *Physical Review D*, 1985, 32, p. 2496). Хокинг позже назвал это своим «величайшим промахом» — по аналогии с величайшим промахом Эйнштейна, когда тот предложил космологическую постоянную, вместо того чтобы предсказать расширение Вселенной (Hawking, S. W. *A Brief History of Time: From the Big Bang to Black Holes*. New York: Bantam, 1988).
- ⁹ Price, H. *Time's Arrow and Archimedes' Point: New Directions for the Physics of Time*. New York: Oxford University Press, 1996.
- ¹⁰ См., например, Davies, P. C. W., Twamley, J. Time Symmetric Cosmology and the Opacity of the Future Light Cone // *Classical and Quantum Gravity*, 1993, 10, p. 931–945; Gell-Mann, M.,

and Hartle, J. B. Time Symmetry and Asymmetry in Quantum Mechanics and Quantum Cosmology / In: Physical Origins of Time Asymmetry / J. J. Halliwell, J. Pérez-Mercader, W. H. Zurek . Cambridge: Cambridge University Press, 1996, p. 311–345. Другая форма граничного условия в будущем, не приводящая к переворачиванию стрелы времени, была исследована в физике элементарных частиц; см. работы: Lee, T. D., Wick, G. C. Finite Theory of Quantum Electrodynamics // *Physical Review D*, 1970, 2, p. 1033–1048; Grinstein, B., O'Connell, D., Wise, M. B. Causality as an Emergent Macroscopic Phenomenon: The Lee-Wick O(N) Model // *Physical Review D* 79, 2009, p. 105019.

¹¹ И снова в языке не хватает терминов и конструкций для нестандартных стрел времени. Мы договариваемся, что «направление времени» определяется нами здесь, в «обычной» фазе Вселенной, последовавшей за Большим взрывом. По отношению к этому уговору в фазе коллапса энтропия уменьшается «по направлению к будущему». Разумеется, организмы, реально живущие в этой фазе, будут естественным образом определять все ровно противоположным образом; но это наша книга, и выбор зависит всего лишь от каких-то условностей, поэтому мы можем сами устанавливать правила.

¹² Грег Иган рассмотрел поразительные следствия данного сценария в своем рассказе «Дневник, посланный за сотню световых лет» (*The Hundred Light-Year Diary*) (переиздано в книге Egan, G. *Axiomatic*. New York: Harper Prism, 1997).

¹³ Вспомните яйца Фаберже Каллендера, о которых мы говорили в главе 9.

¹⁴ См. также Carroll, S. M. *What If Time Really Exists?* (2008). <http://arxiv.org/abs/0811.3772>.

¹⁵ Один из первых сценариев отскока назывался просто «сценарий до Большого взрыва». В нем используется новое поле под названием «дилатон» из теории струн, изменение которого влияет на силу гравитации (Gasperini, M., Veneziano, G. Pre-Big-Bang in String Cosmology // *Astroparticle Physics*, 1993, 1, p. 317–339. Схожий пример — сценарий «экспиротической Вселенной», позднее давший начало «циклической Вселенной». В этой картине энергия, питающая то, что мы воспринимаем как «Взрыв», высвобождается, когда скрытое компактное измерение сжимается до нулевого размера. Идея циклической Вселенной в подробностях обсуждается в популярной книге Пола Стейнхардта и Нила Турока (Steinhardt, P. J., Turok, N. *Endless Universe: Beyond the Big Bang*. New York: Doubleday, 2007); ее предшественница, экспиротическая Вселенная, была предложена Хури и др. (Khoury, J., Ovrut, B. A., Steinhardt, P. J., Turok, N. The Ekpyrotic Universe: Colliding Branes and the Origin of the Hot Big Bang. // *Physical Review D*, 2001, 64, p. 123522). Также под рубрикой «циклическая квантовая космология» существуют другие отскакивающие космологические теории, не включающие струны или дополнительные измерения, но полагающиеся на квантовые свойства самого пространства—времени (Bojowald, M. *Loop Quantum Cosmology* // *Living Reviews in Relativity*, 2006, 8, p. 11).

¹⁶ Надеюсь, после публикации этой книги ситуация изменится.

¹⁷ Тот же аргумент работает и для циклической Вселенной Стейнхардта и Турока. Несмотря на название, их модель не обладает свойством периодичности, которое демонстрирует модель Больцмана—Лукреция. В вечной Вселенной с пространством состояний конечного размера допустимые последовательности событий происходят в обоих направлениях времени: как вперед, так и назад, причем с одинаковой частотой. Но в модели Стейнхардта—Турока стрела времени всегда указывает в одном и том же направлении, а энтропия постоянно возрастает, требуя бесконечной тонкой подстройки в каждый момент времени. Что интересно, Ричард Толмен (Tolman, R. C. *On the Problem of Entropy*

of the Universe as a Whole // *Physical Review*, 1931, 37, p. 1639–1660) уже давно озвучил проблемы энтропии в циклической Вселенной, хотя он говорил только об энтропии вещества, не включая гравитацию. См. также *Bojowald, M., Tavakol, R. Recollapsing Quantum Cosmologies and the Question of Entropy // Physical Review D*, 2008, 78, p. 23515.

- ¹⁸ Эта дискуссия подразумевает, что предположения, которые мы делали раньше, обсуждая энтропию нашего сопутствующего объема, все так же верны; в частности, мы продолжаем считать, что объем допустимо рассматривать как автономную систему. Определенно это допущение вполне может оказаться ошибочным, но ученые, исследующие эти сценарии, обычно неявно подразумевают именно такой вариант.
- ¹⁹ *Aguirre, A., Gratton, S. Inflation Without a Beginning: A Null Boundary Proposal // Physical Review D*, 2003, 67, p. 083515. Хартл, Хокинг и Хертг (Hartle, J. B., Hawking, S. W., Hertog, T. The Classical Universes of the No-Boundary Quantum State // *Physical Review D* 77, 2008, p. 123537) также исследовали Вселенные с высокой энтропией в прошлом и будущем и низкой энтропией посередине, но в контексте евклидовой квантовой гравитации.
- ²⁰ Это верно даже в обычных негравитационных ситуациях, где действует строгое правило, согласно которому полная энергия остается постоянной. Когда высокоэнергетическое состояние распадается до низкоэнергетического, как мяч, катящийся по склону холма, энергия не создается и не разрушается; она просто трансформируется из полезной низкоэнтропийной формы в бесполезную высокоэнтропийную.
- ²¹ *Farhi, E., Guth, A. H., Guven, J. Is It Possible to Create a Universe in the Laboratory by Quantum Tunneling? // Nuclear Physics*, 1990, B 339, p. 417–490. См. также работы: *Farhi, E., Guth, A. H. An Obstacle to Creating a Universe in the Laboratory // Physics Letters*, 1987, B 183, p. 149; *Fischler, W., Morgan, D., Polchinski, J. Quantum Nucleation of False Vacuum Bubbles. // Physical Review D*, 1990, 41, p. 2638; *Fischler, W., Morgan, D., Polchinski, J. Quantization of False Vacuum Bubbles: A Hamiltonian Treatment of Gravitational Tunneling // Physical Review D*, 1990, 42, p. 4042–4055. Гут пишет об этом в своей научно-популярной книге (*Guth, A. H. The Inflationary Universe: The Quest for a New Theory of Cosmic Origins. Reading: Addison-Wesley*, 1997).
- ²² Наиболее полная работа на эту тему среди опубликованных в последнее время принадлежит Энтони Агирре и Мэтью Джонсону (*Aguirre, A., Johnson, M. C. Two Tunnels to Inflation // Physical Review D*, 2006, 73, 123529). Они составили список всех возможных вариантов появления новорожденных Вселенных вследствие квантового туннелирования, однако в конце не сумели сделать окончательного заключения о том, что же происходит в реальном мире. («Грустный вывод таков, что хотя взаимоотношения между различными процессами образования зародышей стали для нас яснее, вопрос, какой же из них в действительности имеет место, остается открытым»). Приняв решение взглянуть на все это под совершенно иным углом, Фрайфогель и др. (*Freivogel, B., Hubeny, V. E., Maloney, A., Myers, R. C., Rangamani, M., Shenker, S. Inflation in AdS/CFT // Journal of High Energy Physics*, 2006, 0603, p. 7) рассмотрели инфляцию на фоне пространства анти-де Ситтера, используя соответствие Малдасены. Они пришли к выводу о том, что новорожденные Вселенные совсем не рождаются. Однако нас интересуют фоны де Ситтера, а не анти-де Ситтера; неясно, можно ли обобщить результаты, полученные в одном контексте, на другой. Еще один взгляд на эволюцию пространства де Ситтера вы найдете в работе *Bousso, R. Proliferation of de Sitter Space // Physical Review D*, 1998, 58, p. 083511.

²³ *Carroll, S. M., Chen, J. Spontaneous Inflation and the Origin of the Arrow of Time (2004).* <http://arxiv.org/abs/hep-th/0410270>.

²⁴ Мы здесь делаем предположение о том, что пространство де Ситтера соответствует истинному вакууму; в частности, что теория не включает никакое другое состояние, такое, что энергия вакуума в нем исчезает и пространство—время начинает выглядеть как пространство Минковского. Честно говоря, это предположение вполне может оказаться не совсем реалистичным. В теории струн, например, мы полагаем, что 10-мерное пространство Минковского представляет собой хорошее решение для теории. В отличие от пространства де Ситтера в пространстве Минковского царит нулевая температура, поэтому оно способно успешно избегать создания новорожденных Вселенных. Для того чтобы описанный здесь сценарий работал, необходимо вообразить, что либо состояния с нулевой энергией вакуума отсутствуют, либо объем пространства—времени, находящегося в таком состоянии, достаточно мал по сравнению с деситтеровскими областями.

Глава 16

Эпилог

Смотри на мир так, будто время исчезло, и тогда все кривое станет для тебя прямым.

Фридрих Ницше

В отличие от многих авторов я не мучился с выбором названия для этой книги.¹ Как только мне в голову пришла Вечность (*From Eternity to Here*), все сомнения были отброшены. Коннотации идеальны: с одной стороны, классический фильм (по мотивам классического романа) с той культовой сценой, в которой неукротимые волны Тихого океана разбиваются о берег рядом с Деборой Керр и Бертом Ланкастером, слившимися в страстном объятии;² с другой — космологическое великолепие, заключенное в слове *вечность*.

Однако в этом названии кроется намного больше, чем предполагают подобные поверхностные сравнения. Моя книга не только о «вечности»; она также о настоящем. Загадка стрелы времени начинается не с гигантских телескопов или мощных ускорителей частиц; она здесь, на нашей кухне, проявляется каждый раз, когда мы разбиваем яйцо, или вливаем молоко в кофе, или кладем кубик льда в теплую воду, или проливаем вино на ковер, или позволяем ароматам наполнять комнаты, или тасуем новую колоду карт, или превращаем вкусный ужин в биологическую энергию, или переживаем событие, оставляющее долговременные воспоминания, или даем жизнь новому поколению. Все эти банальные явления демонстрируют фундаментальную необратимость, которая и является отличительным признаком стрелы времени.

Цепочка рассуждений, начавшаяся с попытки понять эту стрелу, неотвратимо привела нас к космологии — к вечности. Больцман предоставил элегантное и привлекательное макроскопическое объяснение энтропии в терминах статистической механики. Но это объяснение не способно дать толкование второму началу термодинамики, если только мы не призываем на помощь граничное условие — почему вообще энтропия когда-то была низкой? Энтропия неразбитого яйца намного ниже, чем могла бы быть, но такие яйца, тем не менее, встречаются повсеместно, потому что общая энтропия Вселенной намного меньше, чем могла бы быть. А причина этого — то, что раньше она была еще ниже, и так вплоть до самого зарождения всего того, что мы в состоянии наблюдать. Происходящее здесь, на нашей кухне, тесно связано с происходящим в вечности, при зарождении Вселенной.

Такие личности, как Галилей, Ньютон и Эйнштейн, знамениты тем, что предлагали законы физики, которые до этого не принимались во внимание. Они работали в разное время, но их достижения объединяет общая тема: все они иллюстрируют *универсальность* Природы. То, что происходит здесь, происходит и в любом другом месте, — или, как сформулировал Ричард Фейнман, «вся Вселенная в бокале вина, нужно лишь внимательно присмотреться».³ Галилей показал, что небеса беспорядочны и постоянно видоизменяются, точно так же, как условия здесь, на земле. Ньютон догадался, что те же самые законы гравитации, которые отвечают за падающие яблоки, могут объяснить и движение планет. А Эйнштейн понял, что пространство и время — это составные части одного унифицированного пространства—времени и что кривизна пространства—времени лежит в основе движения Солнечной системы и рождения Вселенной.

Точно так же правила, управляющие энтропией и временем, одинаковы как для нашей повседневной жизни, так и для самых далеких уголков Мультиленной. Нам пока неизвестны все ответы, но мы стоим на пороге огромного прогресса в чрезвычайно важных вопросах.

Каков ответ?

На протяжении всей этой книги мы старательно исследовали все, что знаем о работе времени: начав с гладкого детерминистского контекста относительности и пространства—времени, мы продолжили с беспорядочным вероятностным миром статистической механики. Наконец, мы добрались до космологии и увидели, как лучшие теории Вселенной терпят неудачу, сталкиваясь с самым очевидным свойством Вселенной: отличием между энтропией в ранние и поздние годы. Затем, после того как целых четырнадцать глав мы собирали и формулировали проблемы, мы посвятили всего лишь одну главу возможным решениям и также потерпели неудачу в попытках обнаружить бескомпромиссные подтверждения истинности любого из них.

Возможно, вы даже чувствуете некоторое разочарование, но это было сделано намеренно. Понимание невероятно важного и запутанного свойства окружающего мира — это многоступенчатый процесс. Сначала мы не имеем никакого представления о том, что происходит; затем понимаем, как сформулировать проблему, но у нас совсем нет идей относительно возможных вариантов решения; потом мы располагаем несколькими допустимыми ответами, но не знаем, какой из них верен (и верен ли хоть один); и наконец, мы докапываемся до сути. Стрела времени находится между вторым и третьим этапами:

мы можем очень четко сформулировать проблему, но у нас есть лишь несколько расплывчатых идей касательно возможного ответа.

В такой ситуации имеет смысл посвятить больше времени тому, чтобы разобраться в проблеме, а не увязать во множестве потенциальных решений. Пройдет сто лет, но почти все, о чем мы говорили в первых трех частях этой книги, так же будет иметь смысл. Теория относительности хорошо обоснована, так же как и квантовая механика, и каркас статистической механики. Мы уверены в своем понимании основ эволюции Вселенной, по крайней мере начиная с момента сразу после Большого взрыва и до сегодняшнего дня. Однако существующие в настоящее время идеи относительно квантовой гравитации, Мультиленной и того, что происходило в период Большого взрыва, все еще остаются на спекулятивном уровне. Какие-то из них могут вырасти в твердое понимание, но многие наверняка будут отброшены и забыты. В данный момент нам гораздо важнее получить общее представление о карте территории, чем ссориться из-за того, по какому маршруту ее лучше пройти.

Наша Вселенная — это не флуктуация на равновесном фоне, ведь в этом случае она бы выглядела совершенно иначе. И кажется маловероятным, что фундаментальные законы физики могут быть необратимыми на микроскопическом уровне, — и даже если могут, все равно очень сложно понять, как это способно объяснить эволюцию энтропии и сложность, которую мы наблюдаем в нашей Вселенной. Невозможно отрицать граничное условие, застрявшее в начале времен, но его постулирование скорее позволяет избегать неудобных вопросов, чем отвечает на них. Возможно, это все, чего нам когда-либо удастся добиться, но я все же подозреваю, что низкая энтропия ранней Вселенной — это ключ к пониманию чего-то более важного, а не просто упрямый факт, с которым только и остается что смириться.

У нас на руках остался один вариант: наша наблюдаемая Вселенная является частью намного более крупной структуры, Мультиленной. Помещая то, что доступно нашему взору, внутрь громадного ансамбля, мы получаем возможность дать разумное объяснение нашему, очевидно, тонко подстроенному началу, не навязывая никакой тонкой подстройки для всей Мультиленной в целом. Одно-го такого хода, разумеется, недостаточно; нам нужно продемонстрировать, почему в этом мире должен существовать постоянный градиент энтропии и почему этот градиент должен проявляться в форме Вселенной, подобной нашей, а не каким-то другим образом.

Мы обсудили специфическую модель, к которой я питаю особое расположение: Вселенную, большая часть которой представляет собой высокоэнтропийное пространство де Ситтера, но которая порождает автономные ново-

рожденные Вселенные, не только позволяя энтропии увеличиваться до бесконечности, но и попутно создавая участки пространства—времени, аналогичные тому, что мы видим вокруг себя. Детали этой модели пока что по большей части относятся к области гипотез и базируются на предположениях, далеко выходящих за пределы того, что текущий уровень прогресса позволяет надежно описать (мягко говоря). И все же, по моему мнению, намного более важную роль играет общая парадигма, согласно которой энтропия увеличивается просто потому, что она способна увеличиваться вечно; для Вселенной не предусмотрено состояния равновесия. Такая схема естественным образом приводит к градиенту энтропии; кроме того, она демонстрирует естественную симметрию времени относительно какого-то момента минимальной (хотя вовсе не обязательно «маленькой») энтропии. Было бы интересно исследовать, существуют ли другие способы реализовать эту общую программу.

Где-то на дальних подступах маячит один подход, который мы время от времени упоминали, но которому никогда не уделяли безраздельного внимания: идея о том, что «время» само по себе — это всего лишь приближение, периодически оказывающееся полезным (в том числе в нашей локальной Вселенной), но не несущее никакой фундаментальной значимости. Тем не менее такой вариант вполне допустим. Уроки, которые преподавал нам голографический принцип, а также глобальное ощущение того, что базовые ингредиенты квантово-механической теории могут проявляться совсем иначе, не так, как мы привыкли видеть в классическом режиме, заставляют всерьез рассматривать возможность того, что время может быть стихийным явлением, а не неотъемлемой частью нашего окончательного описания мира.

Одна из причин, почему мы не рассматривали подробно в этой книге альтернативу «время — это всего лишь приближение», заключается в том, что мы мало что можем о ней сказать, по крайней мере в пределах имеющихся у нас знаний. Даже оставаясь в рамках наших невзыскательных стандартов, трудно представить, каким образом время могло появиться из более фундаментального описания. Однако есть и другая, более очевидная причина: даже если время — это всего лишь приближение, данное приближение кажется чрезвычайно качественным в той части Вселенной, которую мы способны наблюдать; к тому же именно оно содержит истоки проблемы стрелы времени. Определенно, можно вообразить, что классическое пространство—время как успешная концепция полностью теряет свою жизнеспособность в окрестности Большого взрыва. Тем не менее само по себе это ничего не говорит нам о том, почему в пределах нашего наблюдаемого объема условия на одном конце времени (который мы называем «прошлым») должны так радикально отличаться от

условий на другом (в «будущем»). Если мы заявляем: «Время — это всего лишь приблизительное понятие, и, следовательно, энтропия должна вести себя именно таким вот образом в конфигурации, в которой правомерно говорить о времени», эта альтернатива создает впечатление скорее маневра уклонения, а не жизнеспособной стратегии. Но это, конечно же, свидетельствует больше о нашей неосведомленности, чем о чем-либо другом; есть все шансы на то, что окончательный ответ кроется где-то в этом направлении.

Эмпирический круг

Пионеры термодинамики — Карно, Клаузиус и другие — руководствовались в своих исследованиях практическими целями: помимо прочего, они стремились построить лучшие паровые двигатели. От их догадок мы перескочили прямехонько к грандиозным гипотезам о Вселенных, лежащих за пределами нашей собственной. Ключевой вопрос теперь: как нам вернуться обратно? Хорошо, пусть наша Вселенная обладает стрелой времени, потому что принадлежит Мультиленной с неограниченной энтропией, но нам-то как об этом узнать?

Ученые невероятно гордятся *эмпирической* природой того, чем они занимаются. Научные теории получают всеобщее признание не потому, что они логичны или красивы или позволяют достичь какой-то философской цели, нежно почитаемой тем или иным ученым мужем. Это неплохие причины для того, чтобы *предложить* теорию, но для того, чтобы быть одобренной, она должна соответствовать гораздо более высоким стандартам. В конце концов, научные теории обязаны соответствовать экспериментальным данным. Насколько бы неотразимой по своей природе ни была теория, если она не соответствует данным, это любопытная диковинка, а не достижение.

Однако критерий «соответствия экспериментальным данным» не так-то прост. Как минимум, данным могут отвечать множество различных теорий; к тому же очень многообещающая теория может не полностью соответствовать данным в своем текущем состоянии, несмотря на то что суть ее верна. Если копнуть еще глубже, то одни теории могут казаться идеально соответствующими данным, но все же заводят в концептуальный тупик или же вести к внутреннему противоречию, тогда как другие, несмотря на некоторые расхождения с данными, могут выглядеть весьма многообещающими в перспективе и в будущем превращаться в нечто гораздо более приемлемое. В конечном счете как бы много данных мы ни собрали, это всегда будет лишь крохотная доля всех возможных экспериментов. Так имеем ли мы право выбирать?

Реальность научной работы слишком сложна, чтобы ее можно было облечь в форму пары нехитрых девизов. Проблема, как отличать «науку» от «не науки», настолько каверзна, что для нее придумали отдельное название: «проблема демаркации». Научные философы вовсю веселятся, ведя бесконечные споры о том, как разрешить ее наилучшим образом.

Несмотря на то что цель научной теории — достичь соответствия с экспериментальными данными, худшей из возможных научных теорий будет та, которая соответствует *всем возможным* данным. Причина в том, что истинная цель все же — не просто обеспечить соответствие с тем, что мы видим во Вселенной, а *объяснить*, что мы видим. А сделать это можно, только если вы понимаете, почему вещи находятся в том конкретном порядке, в каком они находятся, а не в каком-то ином. Другими словами, ваша теория должна утверждать, что определенные вещи вообще никогда происходить не могут, — в противном случае она ничего особенного не говорит.

Эту идею особенно рьяно защищал Карл Поппер, утверждавший, что для научной теории важнее быть не «верифицируемой», а «фальсифицируемой».⁴ Однако это не означает существования данных, противоречащих теории, — только то, что теория ясно делает предсказания, которые могли бы, в принципе, быть опровергнуты с помощью каких-то экспериментов. Теория должна быть объектом для нападок, иначе ее нельзя называть научной. Поппер имел в виду историческую теорию Карла Маркса и теорию психоанализа Зигмунда Фрейда. Эти влиятельные интеллектуальные построения, по его мнению, абсолютно не дотягивали до научного статуса, о котором с таким удовольствием вещали их сторонники. Поппер полагал, что все, что когда-либо происходило в мире, и любое поведение, демонстрируемое человеком, может быть «объяснено» с помощью теорий Маркса и Фрейда, — но вы никогда не сможете ткнуть пальцем в какое-нибудь наблюдаемое событие и сказать: «Ага! А вот это точно невозможно согласовать с этими теориями!». Как противопоставление он приводил теорию относительности Эйнштейна, которая для случайного человека с улицы звучит не менее заумно и непостижимо, но делает весьма определенные предсказания, которые (если бы эксперименты привели к другим результатам) вполне способны опровергнуть саму теорию.

Мультиленная — это не теория

В какое положение это ставит Мультиленную? Взять нас — мы утверждаем, что на практике применяем научные принципы, когда пытаемся «объяснить» наблюдаемую стрелу времени в нашей Вселенной, ссылаясь на бесконечное

множество других Вселенных, которые мы даже не в состоянии наблюдать. Можно ли опровергнуть заявление о существовании других Вселенных? Неудивительно, что подобные гипотетические теоретизирования о не поддающихся наблюдению вещах оставляют неприятное впечатление у многих ученых. По их мнению, если вы не можете сделать конкретное предсказание, которое может быть опровергнуто экспериментально, то, чем бы вы ни занимались, — это не наука. В лучшем случае это философия, и, если уж на то пошло, не лучшего качества.

Однако истина, как это часто бывает, немного сложнее. Все эти разговоры о Мультиленных могут в итоге попросту завести нас в тупик. И столетие спустя наши потомки будут качать головами, вспоминая интеллектуальные усилия, впустую потраченные на попытки понять, что было до Большого взрыва, — точно так же, как мы удивляемся, зачем было тратить столько сил на алхимию или теорию теплорода. Но причиной этого будет не то, что современные космологи сошли с истинного научного пути, а то (если действительно так произойдет), что наша теория оказалась неверной.

Касательно роли не поддающихся наблюдению вещей в науке необходимо сделать акцент на двух моментах. Во-первых, неправильно считать целью науки исключительно систематизацию экспериментальных данных. Цель науки намного глубже: она заключается в том, чтобы *понять* поведение мира природы.⁵ В начале XVII века Иоганн Кеплер предложил три закона движения планет, которые безошибочно объясняли громадные объемы астрономических данных, собранные его учителем Тихо Браге. Однако мы не понимали динамику планет по-настоящему до тех пор, пока Исаак Ньютон не продемонстрировал, что она может быть объяснена в терминах простого обратно-квадратичного закона гравитации. Аналогично, нам не нужно заглядывать дальше Большого взрыва, чтобы понять эволюцию нашей наблюдаемой Вселенной; необходимо только задать условия в ранние времена, и на этом все. Однако эта стратегия не дает никакого понимания, почему условия были именно такими, какими они были.

Схожую логику можно было бы применить, пытаясь опровергнуть необходимость в теории инфляции; все, что делает инфляция, — это берет то, что мы уже и так знаем о Вселенной (она плоская, однообразная и в ней нет монополей), и объясняет все в терминах простых базовых правил. Но зачем нам это? Мы могли бы просто принять вещи такими, какие они есть. Однако в результате нашего стремления достичь большего, по-настоящему понять раннюю Вселенную, а не просто согласиться с ее особенностями, мы обнаружили, что инфляция способна предоставить намного больше — теорию первоисточника

и природы начальных возмущений, которые выросли в галактики и крупномасштабные структуры. Это главное преимущество подхода, в котором мы ищем понимание, а не просто удовлетворяемся соответствием с данными, — истинное понимание приводит к новым высотам, о которых мы раньше не задумывались и не ставили цели достичь. Если однажды мы поймем, почему у ранней Вселенной была низкая энтропия, то велика вероятность того, что лежащий в основе этого явления базовый механизм объяснит гораздо больше, чем единственный факт.

Второй момент еще важнее, несмотря на то что следующее утверждение звучит несколько банально: наука — это беспорядочная, запутанная штука. Базис науки — эмпирическое знание, и это навсегда останется правдой. Мы руководствуемся экспериментальными данными, а не исключительно мотивами. Но для того чтобы достичь уровня, на котором мы сможем руководствоваться данными, нам приходится пройти долгую дорогу, полную неэмпирических подсказок и предпочтений в построении моделей и сравнении их друг с другом. В этом нет ничего плохого. Главным критерием конечного продукта должно быть то, насколько хорошо он объясняет данные, но это совсем не означает, что каждый шаг на пути должен быть плодом близкого и детального контакта с экспериментом.

В частности, Мультиленная — это не теория. Если бы это было так, то было бы абсолютно допустимо критиковать ее на основании того, что придумать какие-то возможные экспериментальные проверки невероятно сложно. Правильнее думать о Мультиленной как о *предсказании*. Теория — такая, какая она есть, в ее текущем недоразвитом состоянии — это тесное единение принципов квантовой теории поля и нашего базового понимания того, как работает искривленное пространство—время. Имея эти знания в качестве начальных условий, мы не просто теоретизируем о том, что в жизни Вселенной мог быть ранний период супербыстрого ускорения; мы *предсказываем*, что инфляция должна происходить, если квантовое поле инфлатона с подходящими свойствами окажется в правильном состоянии. Точно так же, мы не говорим просто: «Круто было бы, если бы существовало бесконечное число различных Вселенных!» Нет, мы предсказываем, отталкиваясь от обоснованных экстраполяций теории гравитации и квантовой теории поля, что Мультиленная действительно должна существовать.

Предсказание о том, что мы живем в Мультиленной, пока, насколько можно судить, не поддается проверке. (Хотя кто знает? Ученым и раньше приходили в голову весьма остроумные идеи.) Однако суть не в этом. Мультиленная — это часть более крупной, более всеобъемлющей структуры.

Вопрос должен ставиться не в форме: «Как нам проверить, что Мультиленная действительно существует?», а в форме: «Как нам проверить теории, предсказывающие, что Мультиленная должна существовать?». На сегодняшний день у нас нет понимания того, как с помощью этих теорий строить поддающиеся опровержению предсказания. Но нет причин полагать, что мы, в принципе, не способны это делать. Физикам-теоретикам, конечно, придется серьезно потрудиться, для того чтобы развить подобные идеи до состояния, в котором мы сможем формулировать проверяемые предсказания. Возможно, кому-то уже *не терпится* — в конце концов, почему эти предсказания с самого начала не раскладываются перед ним в готовом к употреблению виде? Но это его личные трудности, а не принципиальная философская позиция. Иногда на вынашивание и созревание многообещающей научной идеи до того уровня, когда ее можно будет беспристрастно оценить со всех сторон, требуется довольно много времени.

Поиск смысла в абсурдной Вселенной

На протяжении всей своей истории человечество (вполне естественно) рассматривало Вселенную с человекоцентрической точки зрения. В том числе буквально — поставив себя в географический центр Вселенной (на полное искоренение попыток строить теории на базе этого предположения ушло довольно много времени и усилий). С тех пор как повсеместное одобрение заслужила гелиоцентрическая модель, ученые придерживаются принципа Коперника — «мы не занимаем какое-то особенное место во Вселенной», предостерегая самих себя от того, чтобы считать нас чем-то таким уж знаменательным.

Однако на более глубоком уровне наш антропоцентризм проявляет себя в форме убеждения, что человеческие существа *имеют какое-то значение* для Вселенной. Именно это чувство лежит в основе бытующего в определенных кругах убеждения, что теория естественного отбора Дарвина не позволяет объяснить эволюцию жизни на Земле. Побуждение думать, что мы имеем особое значение, может принимать форму как простой веры, что мы (или хотя бы часть из нас) избраны Богом, так и чего-то более расплывчатого, как, например, уверенность в том, что весь этот изумительный мир вокруг нас — просто *случайность*.

У разных людей может быть разное определение слова *Бог*, так же как и разные понятия о том, какова символическая цель человеческой жизни. Бог может принимать форму настолько абстрактной и трансцендентной концепции, что

научные методы не в состоянии будут сказать о ней абсолютно ничего. Если Бог идентифицируется с Природой, или законами физики, или нашим священным трепетом перед величием Вселенной, то вопрос, предоставляет ли такой подход практичный способ мышления о мире, лежит вне масштабов эмпирического изыскания.

Совершенно иная традиция — искать свидетельства существования Бога в работе физической Вселенной. Это подход естественной теологии — учения, зародившегося задолго до Аристотеля и через аналогию с часовщиком Уильяма Пейли дожившего до наших дней.⁶ Раньше лучшим свидетельством истинности сотворения мира служили живые организмы, но Дарвин предложил элегантный механизм, раскладывающий по полочкам то, что раньше казалось абсолютно необъяснимым. В ответ на это некоторые приверженцы данной философии сместили фокус внимания на другую, казалось бы, необъяснимую вещь — от происхождения жизни к происхождению космоса.

Модель Большого взрыва со своим сингулярным началом внушает определенный оптимизм тем, что ищет след перста Божьего в создании Вселенной. (Жорж Леметр, бельгийский священник, разработавший модель Большого взрыва, отказался связывать ее с какими бы то ни было теологическими целями: «Насколько я могу видеть, такая теория остается полностью вне каких-либо метафизических или религиозных вопросов».⁷) В ньютоновском пространстве—времени вообще не было такой вещи, как создание Вселенной, по крайней мере не в форме события, случившегося в какой-то определенный момент времени; время и пространство существовали всегда. Добавление какого-то специального начала пространства—времени, особенно такого, который очевидным образом бросает вызов простому пониманию, создает искушение переложить ответственность за объяснение того, во что мы вляпались, на плечи Господа. Люди при этом обычно мыслят так: конечно же, вы можете найти динамические законы, управляющие эволюцией Вселенной от одного момента к другому, но объяснение самой Вселенной невозможно без воззвания к чему-то, находящемуся за ее пределами.

Надеюсь, одним из подспудных уроков этой книги стало то, что делать ставки против способности науки объяснить что угодно в мире, включая его начало, — плохая идея. Большой взрыв представляет собой точку, за пределы которой наше понимание не распространяется. Так было в 1920-е годы, когда эта модель впервые подверглась изучению, так продолжается и сегодня. Мы не знаем точно, что произошло 14 миллиардов лет назад, но нет никаких причин сомневаться в том, что однажды мы сумеем докопаться до сути. Ученые подходят к решению этой задачи с самых разных сторон. С какой скоростью будут

появляться новые научные достижения — предсказать очень сложно, но не сложно предсказать, что успехи определено будут.

Так где же мы находимся сейчас? Джордано Бруно отстаивал идею гомогенной Вселенной с бесконечным числом звезд и планет. Авиценна и Галилео, благодаря идее о сохранении импульса, устранили необходимость в Первичном двигателе для объяснения инерции движения. Дарвин объяснил эволюцию видов как ненаправленный процесс наследования со случайными модификациями, движимый естественным отбором. Современная космология утверждает, что наша наблюдаемая Вселенная может быть всего лишь одной из бесконечного числа Вселенных в рамках огромной составной Мультиленной. Чем больше мы понимаем о мире, тем меньше и незначительнее для его существования кажемся мы сами.⁸

Это нормально. Мы обнаруживаем себя не центральными игроками на поле космической жизни, а крошечным сопутствующим явлением, процветающим в течение краткого времени, пока нам удалось оседлать волну растущей энтропии между Большим взрывом и тихой пустотой будущей Вселенной. Мы не найдем своей цели и предназначения в законах природы или в планах какого-либо внешнего агента, создавшего мир таким, какой он есть; придумать их — наша забота. Одна из этих целей — среди многих других — берет начало в нашем стремлении как можно лучше объяснить окружающий мир. Пусть наши жизни коротки и не имеют четкого направления, но по крайней мере мы можем гордиться тем, с какой отвагой мы объединяем усилия в попытках понять вещи, куда более великие, чем мы сами.

Следующие шаги

Удивительно, насколько сложно четко оформлять свои мысли, когда думаешь о времени. Мы все знакомы с ним, но, возможно, проблема как раз в том, что знакомы мы с ним *слишком* близко. Мы настолько привыкли к стреле времени, что представить себе понятие времени без стрелы нам невероятно сложно. Мы покорно демонстрируем временной шовинизм, как от нас и требуется, проводя разграничительную линию между объяснениями нашего текущего состояния в терминах прошлого и в терминах будущего. Даже высококвалифицированные космологи подвержены этой болезни.

Несмотря на массу потраченных чернил и бумаги и весь шум, сопутствовавший обсуждениям природы времени, я убежден, что изучению этого феномена посвящается слишком мало сил и времени — отнюдь не слишком много. Однако, похоже, ситуация начинает исправляться. Тесно переплетенные тема-

тики времени, энтропии, информации и сложности перекидывают мосты между поразительным разнообразием интеллектуальных дисциплин: физикой, математикой, биологией, психологией, вычислительной техникой и искусством. Самое время всерьез заняться вопросом времени и встретить бросаемые им вызовы с высоко поднятой головой.

Что касается физики, это уже начинает происходить. На протяжении большей части XX века космология смахивала на стоячее болотце: идей было много, но данных, которые бы позволили провести между ними различие, отчаянно не хватало. Эра точной космологии, приводимая в движение крупномасштабными исследованиями, которые стали возможны благодаря новым технологиям, кардинально все изменила; были открыты неожиданные чудеса — от ускорения Вселенной до снимка ранних времен, который предоставляет нам космическое микроволновое излучение.⁹ Теперь настал черед идеям поравняться с реальностью. У нас есть интересные предположения о том, как могла зародиться Вселенная и что могло происходить до этого, связанные и с инфляцией, и с квантовой космологией, и с теорией струн. Наша задача — довести до ума эти многообещающие идеи, превратив их в честные теории, которые можно будет сравнить с экспериментальными данными и подружить с оставшейся частью физики.

Предсказывать будущее непросто (вините в этом отсутствие низкоэнтропийного граничного условия в будущем!). Но кусочки мозаики постепенно собираются вместе, подталкивая науку к тому, чтобы сделать огромный шаг вперед, к формулировке ответов на вечные вопросы о прошлом и будущем. Настало время нам с вами понять свое место в вечности.

Примечания

- ¹ И это несмотря на тот факт, что, едва я завершил работу над рукописью, на рынке появилась книга с таким же в точности названием! (*Viola, F. From Eternity to Here: Rediscovering the Ageless Purpose of God. Colorado Springs: David C. Cook, 2009.*) Однако ее подзаголовков отличается: «Возврат к нестареющему предназначению Бога». Надеюсь, никто по ошибке не закажет неправильную книгу.
- ² Автор имеет в виду фильм режиссера Фреда Циннемана «Отныне и во веки веков» (*From Here to Eternity*), снятый в 1953 году. Роман «Отныне и во веки веков» Джеймса Джексона был опубликован в 1951 году. — *Примеч. пер.*
- ³ *Feynman, R. P., Leighton, R., Sands, M. The Feynman Lectures on Physics. New York: Addison Wesley Longman, 1970.*
- ⁴ *Popper, Karl R. The Logic of Scientific Discovery. London: Routledge, 1959.* Обратите внимание на то, что Поппер не ограничивался проблемой демаркации; он хотел понять весь научный прогресс как последовательность опровергнутых гипотез. По сравнению с тем,

как обычно ведутся дела в науке, это не слишком многообещающий способ разобраться в деталях процесса; опровергать гипотезы важно, но настоящая научная работа этим не ограничивается.

- ⁵ Подробнее об этом см. в работе *Deutsch, D. The Fabric of Reality: The Science of Parallel Universes—And Its Implications*. New York: Allen Lane, 1997.
- ⁶ Один из множества примеров вы найдете в работе *Swinburne, R. The Existence of God*. Oxford: Oxford University Press, 2004.
- ⁷ *Lemaitre, G. The Primeval Atom Hypothesis and the Problem of the Clusters of Galaxies / In: La Structure et l'Evolution de l'Univers / R. Stoops (ed.)*. Brussels: Coudenberg, 1958, p. 1–32.
- ⁸ Стивен Вайнберг высказался более определенно: «Чем более постижимой кажется Вселенная, тем больше она также кажется бессмысленной» (*Weinberg, S. The First Three Minutes: A Modern View of the Origin of the Universe*. New York: Basic Books, 1977, p. 154).
- ⁹ Я очень сожалею о том, что уделил в этой книге мало внимания современным и грядущим новым экспериментам в области фундаментальной физики. Проблема в том, что какими бы увлекательными и важными эти эксперименты ни были, чрезвычайно сложно заранее сказать, какие новые знания они нам дадут, особенно касательно такой глубокой и всеобъемлющей темы, как стрела времени. К сожалению, мы не планируем построить телескоп, способный с помощью тахионов заглянуть в другие Вселенные. Что нам доступно — так это, возможно, построение ускорителя частиц, который позволит узнать нечто новое о суперсимметрии, что, в свою очередь, приведет к новым прозрениям в теории струн и, следовательно, более глубокому пониманию квантовой гравитации. Или же мы можем собирать данные с гигантских телескопов — не только фотоны света, но также космические лучи, нейтрино, гравитационные волны, даже частицы темной материи, открывающие нам новые удивительные сведения об эволюции Вселенной. Реальный мир постоянно удивляет нас: темная материя и темная энергия — это всего лишь пара очевидных примеров. Как физик-теоретик я написал эту книгу больше с теоретической точки зрения, но, как показывает история, чаще всего именно новые эксперименты способны пробудить нас от догматической спячки.

ПРИЛОЖЕНИЕ. МАТЕМАТИКА

Ллойд: В смысле, небольшой шанс — это один из ста?

Мэри: Я думаю, скорее один из миллиона.

[Пауза]

Ллойд: Значит, шанс все-таки есть.

*Джим Керри и Лорен Холли.
Тупой и еще тупее*

В основной текст книги я храбро включил несколько формул: пару авторства Эйнштейна и несколько выражений для энтропии в разных контекстах. Уравнение — это мощный символический объект, передающий огромный объем информации в невероятно компактной форме. Бывает полезно посмотреть на формулу, для того чтобы с восхищением понять ее смысл как точного выражения какой-то особенности нашего мира.

Однако давайте начистоту — формулы могут пугать. В этом приложении вы найдете очень краткое введение в экспоненцирование и логарифмирование — ключевые математические операции, которые применяются для описания энтропии на количественном уровне. Ничто из приведенного ниже в действительности не требуется для понимания основного содержания книги; встретив слово *логарифм*, просто смело идите вперед.

Возведение в степень

Эти две операции — возведение в степень и взятие логарифма — одинаково просты или сложны для понимания, ведь между ними много общего. На самом деле они противоположны друг другу: одна операция отменяет другую. Если выбрать какое-то число, возвести его в степень, а затем взять логарифм от результата, то мы получим то самое число, с которого начали. Как бы то ни было, со степенями мы в повседневной жизни сталкиваемся намного чаще, поэтому они нас не так ужасают. Начнем с них.

Операция возведения в степень означает, что мы берем некое число, называемое *основанием*, и возводим его в степень другого числа. То есть попросту умножаем основание само на себя ровно столько раз, в какую степень его требуется возвести. Основание записывается в виде обычного числа, а степень — в виде индекса сверху. Вот несколько простых примеров:

$$2^2 = 2 \cdot 2 = 4,$$

$$2^5 = 2 \cdot 2 \cdot 2 \cdot 2 \cdot 2 = 32,$$

$$4^3 = 4 \cdot 4 \cdot 4 = 64.$$

(Мы используем точку для обозначения операции умножения, а не символ \times , так как его очень легко перепутать с буквой x .) Один из самых удобных случаев возведения в степень — тот, когда в качестве основания берется число 10; в этом случае степень соответствует просто-напросто числу нулей справа от единицы:

$$10^1 = 10,$$

$$10^2 = 100,$$

$$10^9 = 1\,000\,000\,000,$$

$$10^{21} = 1\,000\,000\,000\,000\,000\,000\,000.$$

В этом и заключается идея возведения в степень. Если говорить конкретно о показательной *функции*, то здесь мы имеем в виду, что фиксируем какое-то определенное основание и позволяем степени, в которую возводится это основание, быть переменной величиной. Если обозначить основание через a , а степень — через x , то получим:

$$a^x = a \cdot a \cdot a \cdot a \cdot a \cdot a \dots a \cdot x \text{ раз.}$$

К сожалению, это определение может создавать впечатление, что показательная функция имеет смысл только в том случае, если степень x — это положительное целое число. Как умножить число на само себя минус два раза? Или 3,7 раза? Здесь вам остается только верить, что магия математики позволяет определять показательную функцию для любого значения x . Результатом является гладкая функция с очень маленьким значением, когда x — отрицательное число, но резко возрастающая, когда x становится положительным, как показано на рис. П1.

Что касается показательных функций, есть две важные вещи, о которых необходимо помнить. Любое основание, возведенное в степень 0, равно 1,

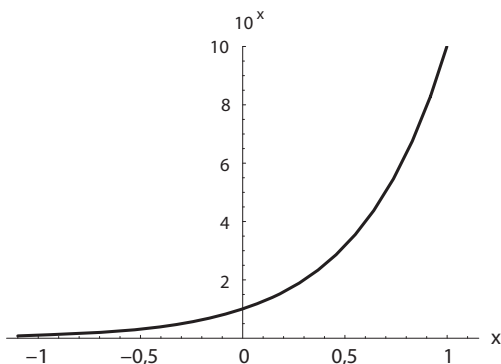


Рис. П1. Показательная функция 10^x . Обратите внимание, что она возрастает так быстро, что совершенно невозможно изобразить ее для больших значений x

а любое основание, возведенное в степень 1, равно самому себе. Для основания 10 это выглядит так:

$$10^0 = 1,$$

$$10^1 = 10.$$

Если степень — это отрицательное число, то результатом операции является число, обратное результату возведения в соответствующую положительную степень:

$$10^{-1} = 1/10^1 = 0,1,$$

$$10^{-3} = 1/10^3 = 0,001.$$

То, что вы видите выше, — это всего лишь конкретные примеры из более общих свойств, которым подчиняется показательная функция. Одно из этих свойств является невероятно важным: если *умножить* два числа, представляющих собой одно и то же основание, возведенное в разные степени, то при перемножении степени складываются, а основание остается тем же самым:

$$10^x \cdot 10^y = 10^{(x+y)}.$$

То же верно и в обратную сторону: показательная функция от суммы степеней равна произведению двух чисел, равных основанию, возведенному в эти степени.¹

Большие числа

Нетрудно понять, почему показательная функция так полезна: числа, с которыми нам приходится иметь дело, иногда бывают чрезвычайно большими, а с помощью возведения в степень вы можете превратить число средней величины в просто огромное. Как мы обсуждали в главе 13, количество различных состояний, необходимых для описания возможных конфигураций нашего сопутствующего объема Вселенной, равно примерно

$$10^{10^{120}}$$

Это число настолько неимоверно, невообразимо огромное, что было бы совершенно непонятно, с какой стороны вообще подступиться к его описанию, если бы на помощь не пришло возведение в степень.

Давайте рассмотрим несколько других больших чисел, для того чтобы оценить, насколько огромно это. Один миллиард равен 10^9 , тогда как один триллион — это 10^{12} ; с этими значениями мы хорошо знакомы благодаря обсуждениям экономики и правительственных трат. Количество частиц в нашей наблюдаемой Вселенной составляет около 10^{88} ; настолько же велика была энтропия в ранние времена. Теперь, когда у нас есть черные дыры, энтропия наблюдаемой Вселенной равна приблизительно 10^{101} , хотя вполне могла бы дорасти до 10^{120} . (Это число, 10^{120} , также представляет собой отношение предсказываемого значения плотности энергии вакуума к наблюдаемой плотности.)

Для сравнения, энтропия макроскопического объекта, такого как чашка кофе, — где-то 10^{25} . Это значение сравнимо с числом Авогадро, которое равно $6,02 \cdot 10^{23}$ — примерно столько атомов составляют один грамм водорода. Число песчинок на всех пляжах Земли — приблизительно 10^{20} . Число звезд в типичной галактике — около 10^{11} , а число галактик в наблюдаемой Вселенной — около 10^{11} , то есть в наблюдаемой Вселенной существует примерно 10^{22} звезд — немного больше, чем песчинок на Земле.

Базовые единицы измерения, используемые физиками, — это единицы времени, длины и массы; используются также их комбинации. Самый короткий интервал времени, представляющий интерес, — это планковское время, примерно 10^{-43} секунд. Предположительно инфляция продолжалась около 10^{-30} секунд или меньше, хотя это значение чрезвычайно неточно. Вселенная создала гелий из протонов и нейтронов где-то через 100 секунд после Большого взрыва, а прозрачной стала в момент рекомбинации, 380 000 лет (10^{13} секунд) спустя. (В одном году около $3 \cdot 10^7$ секунды.) Сейчас наблюдаемой Вселенной

14 миллиардов лет (примерно $4 \cdot 10^{17}$ секунды). Еще через 10^{100} лет или около того все черные дыры практически полностью испарятся, оставив после себя холодную и пустую Вселенную.

Самая маленькая длина — это планковская длина, около 10^{-33} сантиметров. Размер протона — примерно 10^{-13} сантиметров, а размер человеческого существа — примерно 10^2 сантиметров (это очень низкое человеческое существо, но мы сейчас оперируем приблизительными значениями). Расстояние от Земли до Солнца — около 10^{13} сантиметров; расстояние до ближайшей звезды — около 10^{18} сантиметров, а размер наблюдаемой Вселенной — около 10^{28} сантиметров.

Планковская масса — это примерно 10^{-5} граммов; для отдельной частицы это было бы невероятно много, но по макроскопическим стандартам — совсем нет. Самые легкие частицы с ненулевой массой — нейтрино; мы даже пока не знаем точно, какова их масса, но минимальная вроде бы составляет около 10^{-36} граммов. Масса протона — приблизительно 10^{-24} граммов, а человеческого существа — примерно 10^5 граммов. Солнце весит около 10^{33} граммов, галактика — около 10^{45} граммов, а масса, содержащаяся в пределах наблюдаемой Вселенной, составляет около 10^{56} граммов.

Логарифмы

Логарифмическая функция — самая простая вещь на свете: она всего лишь отменяет показательную функцию. Если у нас есть какое-то число, которое может быть выражено в форме 10^x , а это возможно для любого положительного числа, то логарифм этого числа равен просто²

$$\lg(10^x) = x.$$

Что может быть проще? Точно так же возведение в степень отменяет логарифм:

$$10^{\lg x} = x.$$

Можно также думать об этом так: если число представляет собой целую степень десяти (например, 10, 100, 1 000 и т. п.), то логарифм — это просто-напросто число нулей справа от единицы:

$$\lg(10) = 1,$$

$$\lg(100) = 2,$$

$$\lg(1000) = 3.$$

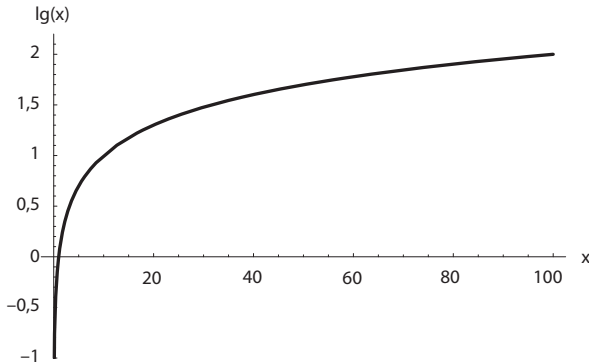


Рис. П2. Логарифмическая функция $\lg(x)$. Она не определена для отрицательных значений x , и по мере приближения x к нулю справа значение логарифма стремится к минус бесконечности

Однако так же как и показательная функция, логарифм — это гладкая функция, как показано на рис. П2. Логарифм числа 2,5 равен 0,3979, логарифм 25 равен примерно 1,3979, логарифм 250 — примерно 2,3979 и т. д. Единственное ограничение заключается в том, что невозможно взять логарифм от отрицательного числа, и это разумно, так как логарифм отменяет показательную функцию, а *получить* отрицательное число в результате операции возведения в степень невозможно. Грубо говоря, для больших чисел логарифм — это просто «количество цифр в числе».

Логарифм демонстрирует свойство, аналогичное тому, с которым мы уже познакомились выше для возведения в степень (результат возведения в степень, равную сумме чисел, равен произведению соответствующих степеней): логарифм произведения равен сумме логарифмов, то есть

$$\log(x \cdot y) = \log(x) + \log(y).$$

Это чудесное свойство делает логарифмы невероятно полезными для изучения энтропии. Как мы обсуждали в главе 8, физическое свойство энтропии заключается в том, что энтропия двух систем после объединения равна сумме энтропий этих систем по отдельности. Но число возможных состояний объединенной системы равно произведению количеств возможных состояний двух систем. Поэтому Больцман сделал вывод о том, что энтропия должна быть равна логарифму числа состояний, а не самому числу состояний. В главе 9 мы рассказали схожую историю, но уже для информации: Шэннон хотел найти меру информации, для которой общая информация, переданная в двух неза-

висимых сообщениях, была бы равна сумме количеств информации в каждом из сообщений, и он также прибегнул к помощи логарифма.

Проще говоря, логарифмы обладают таким милым свойством, что они берут огромные числа и стачивают их до управляемых размеров. Беря логарифм от такого тяжеловесного числа, как миллиард, мы получаем симпатичную девятку. Логарифм — функция монотонная, то есть его значение всегда увеличивается по мере увеличения значения, от которого берется логарифм. Таким образом, логарифм предоставляет специфическую меру того, насколько число велико, но при этом сжимает громадные числа до разумных размеров, что чрезвычайно полезно в таких областях, как космология, статистическая механика и даже экономика.

В заключение необходимо отметить, что, так же как и степенная функция, логарифмы могут братья по разным основаниям. «Логарифм по основанию b » числа x — это степень, в которую необходимо возвести b , для того чтобы получить x :

$$\begin{aligned}\log_2(2^x) &= x, \\ \log_{12}(12^x) &= x\end{aligned}$$

и т. д. Если мы не записываем основание явно, то подразумевается, что оно равно 10, потому что именно таким количеством пальцев обладает большинство людей. Однако ученые и математики частенько используют нечто странное, а именно натуральный логарифм, который часто записывается как $\ln(x)$ и основанием в котором служит число Эйлера:

$$\begin{aligned}\ln(x) &= \log_e(x), \\ e &= 2,7182818284\dots\end{aligned}$$

Число Эйлера — это иррациональное число, как π или квадратный корень из двух, так что в десятичной записи, которая частично показана выше, оно продолжается бесконечно. На первый взгляд кажется, что использовать нечто подобное в качестве основания логарифма невероятно странно. Но в действительности если углубиться в математику, то выяснится, что число e обладает множеством приятных свойств: в математическом анализе, например, функция e^x — единственная (за исключением вырожденной функции, всегда равной нулю), которая равна своей производной, а также интегралу от себя самой. В этой книге все наши логарифмы брались по основанию 10 и обозначались \lg , но если вы решите взяться за физику и математику на высшем уровне, то будете постоянно встречаться с натуральными логарифмами.

Примечания

- ¹ Эти свойства — часть той же «магии математики», о которой мы упоминали выше. Например, нам интересно было бы понять, что означает «возвести 10 в степень 0,5». Я знаю, что какими бы ни оказались реальные числа, должно выполняться свойство $10^{0,5} \cdot 10^{0,5} = 10^{(0,5+0,5)} = 10^1 = 10$. Другими словами, если мы умножим число $10^{0,5}$ на само себя, то получим 10; это означает, что $10^{0,5}$ должно быть всего лишь квадратным корнем из 10 (это рассуждение верно и для любого другого основания, возведенного в степень 0,5). С помощью этого трюка мы можем понять, каким будет результат возведения любого основания в любую другую степень.
- ² Здесь везде используются десятичные логарифмы, поэтому мы обозначаем их \lg . Логарифмы по основанию, отличному от 10, обозначаются как $\log_a x$, где a — основание. Скажем, если бы речь шла о логарифме от x по основанию 2, мы бы обозначили его $\log_2 x$. — *Примеч. пер.*

БЛАГОДАРНОСТИ

Для того чтобы выпестовать книгу — от концепции до публикации, необходимо приложить большие коллективные усилия, и я должен поблагодарить множество людей, которые помогли мне на этом пути. В период, когда существовали еще только лишь неясные очертания будущей книги, мне посчастливилось повстречать, полюбить и создать семью с женщиной, которая оказалась невероятно талантливым писателем и популяризатором науки. Я бесконечно благодарен Дженнифер Оллетт (Jennifer Ouellette), благодаря которой эта книга стала несравнимо лучше, а весь процесс обрел смысл.

Я разослал черновики рукописи многим своим друзьям, и в ответ они прислали мне массу шуточных комментариев и кучу до невозможности разумных предложений по улучшению. Огромное спасибо Скотту Ааронсону (Scott Aaronson), Эллисон Беатрис (Allyson Beatrice), Дженни Чен (Jennie Chen), Стивену Фладу (Stephen Flood), Дэвиду Гре (David Grae), Лорен Гандерсон (Lauren Gunderson), Робину Хэнсону (Robin Hanson), Мэтту Джонсону (Matt Johnson), Крису Лакнеру (Chris Lackner), Тому Левенсону (Tom Levenson), Карен Лорре (Karen Lorre), Джорджу Массеру (George Musser), Хью Прайсу (Huw Price), Тэду Пайну (Ted Pyne), Мари Рути (Mari Ruti), Алексу Сингеру (Alex Singer) и Марку Троддену (Mark Trodden) за то, что не давали сбиться с пути истинного. Подозреваю, что многие из них в скором будущем примутся за написание собственных книг, и я буду счастлив прочитать каждую.

На протяжении многих лет я обсуждал стрелу времени и другие вопросы, о которых говорится в этой книге, с коллегами-учеными, и теперь уже невозможно сказать, кто из них в какой степени повлиял на формирование моей точки зрения. Помимо перечисленных выше первых читателей, я хочу поблагодарить Энтони Агирре (Anthony Aguirre), Дэвида Альберта (David Albert), Андреаса Альбрехта (Andreas Albrecht), Тома Бэнкса (Tom Banks), Рафаэля Буссо (Raphael Bousso), Эдди Фари (Eddie Farhi), Брайана Грина (Brian Greene), Джима Хартла (Jim Hartle), Курта Хинтербихлера (Kurt Hinterbichler), Тони Леггетта (Tony Leggett), Андрея Линде (Andrei Linde), Лауру Мерсини (Laura Mersini), Кена Олума (Ken Olum), Дона Пейджа (Don Page), Джона Прескил-

ла (John Preskill), Игги Савики (Iggy Sawicki), Козму Шализи (Cosma Shalizi), Марка Средники (Mark Srednicki), Кипа Торна (Kip Thorne), Алекса Виленкина (Alex Vilenkin) и Роберта Уайлда (Robert Wald) (а также остальных, кого я, к стыду своему, забыл упомянуть) за все разговоры, которые мы вели в течение этих лет. Особую благодарность я хочу выразить Джени Чен (Jennie Chen), которая не только внимательно прочитала рукопись, но также оказала неоценимую поддержку в период, когда я лишь начинал всерьез заниматься изучением стрелы времени.

Сам я в последнее время был довольно нерадивым ученым, работая над завершением книги в то время, пока мои коллеги в одиночку форсировали наши совместные исследовательские проекты. Так что спасибо и простите меня, Лотти Акерман (Lotty Ackerman), Мэтт Бакли (Matt Buckley), Клаудиа де Рам (Claudia de Rham), Тим Дюлане (Tim Dulaney), Эдриэн Эриксек (Adrienne Ericksek), Мойра Грешем (Moirra Gresham), Мэтт Джонсон (Matt Johnson), Марк Камсионковски (Marc Kamionkowski), Сонни Мантри (Sonny Mantry), Майкл Рэмси-Масолф (Michael Ramsey-Musolf), Лиза Рэнделл (Lisa Randall), Хейвуд Там (Heywood Tam), Чин-Яо Цен (Chien-Yao Tseng), Инганн Вехас (Ingunn Wehus) и Марк Вайз (Mark Wise), за то, что вам в последнее время постоянно приходилось мириться с моей отстраненностью и невозможностью сосредоточиться на задачах.

Катинка Мэтсон (Katinka Matson) и Джон Брокман (John Brockman) сумели превратить мои первоначальные идеи в основательный замысел для новой книги и постоянно двигали процесс вперед. Я познакомился с моим редактором Стивеном Морроу (Stephen Morrow) задолго до того, как мысль о написании книги вообще пришла мне в голову, и мне было чрезвычайно приятно поработать с ним. Джейсон Торчински (Jason Torchinsky) взял мои халявные наброски и превратил их в привлекательные иллюстрации. Каким-то образом Майкл Берубе (Michael Bérubé), при посредничестве Эллиота Тарабура (Elliot Tarabour), сумел предложить свою помощь в рецензировании книги еще до того, как она была фактически написана. Но учитывая тематику — природа времени, — чего еще можно было ожидать?

Я принадлежу к тому типу людей, которых утомляет длительная работа дома или в офисе, поэтому частенько я собираю свои бумаги и учебники по физике и устраиваюсь с ними в ресторане или кофейне, для того чтобы сменить обстановку. Неизбежно кто-нибудь подойдет и спросит, что я читаю, и — вместо того чтобы убежать в страхе перед всей этой грозной наукой и математикой — начнет задавать вопросы о космологии, квантовой механике и Вселенной. В одном лондонском пабе бармен записал для себя ISBN-номер «Современной

космологии» Скотта Додельсона (Scott Dodelson, *Modern Cosmology*); в джазовом клубе Green Mill в Чикаго я получил бесплатный напиток за то, что объяснил, что такое темная энергия. Я хочу поблагодарить всех тех, кто, не будучи ученым, все же продолжает интересоваться внутренними механизмами Природы, стремится задавать вопросы и размышлять над ответами. Изучение природы времени, возможно, не поможет нам изобрести лучшие телевизоры или научиться худеть без упражнений, но мы все живем в одной общей Вселенной, и стремление понять ее — это часть того, что делает нас людьми.

Ш. Кэрролл

Вечность. В поисках окончательной теории времени

Перевела с английского Е. Шикарева

Научный редактор *Дмитрий Геннадиевич Левков*,
научный сотрудник Института ядерных исследований РАН, кандидат физ.-мат. наук

Заведующая редакцией
Ведущий редактор
Литературный редактор
Художник
Корректор
Верстка

Ю. Сергиенко
Н. Римицан
О. Лапина
В. Шимкевич
Н. Викторова
Л. Егорова

ООО «Питер Пресс», 192102, Санкт-Петербург, ул. Андреевская (д. Волкова), 3, литер А, пом. 7Н.

Налоговая льгота — общероссийский классификатор продукции ОК 034-2014, 58.11.12.000 —
Книги печатные профессиональные, технические и научные.

Подписано в печать 18.12.15. Формат 60×90/16. Бумага офсетная. Усл. п. л. 32,000.
Тираж 3500. Заказ 0000.

Отпечатано в полном соответствии с качеством представленного электронного оригинал-макета
в типографии филиала АО «ТАТМЕДИА» «ПИК «Идел-Пресс».
420066, Казань, ул. Декабристов, 2. E-mail: idelpress@mail.ru