

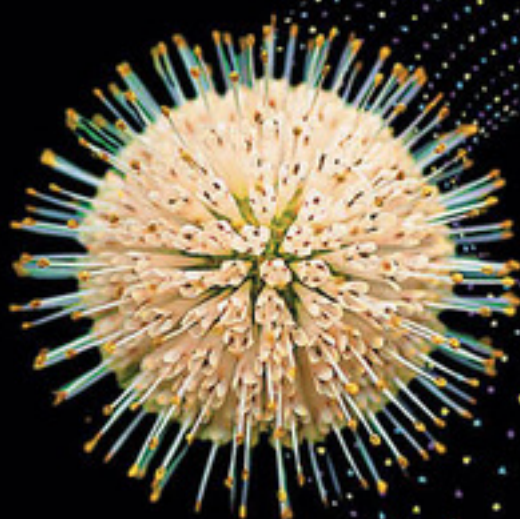
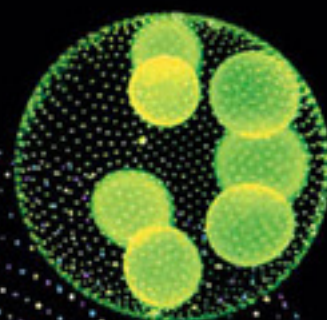
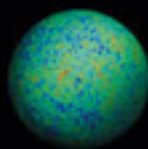


МАКС ТЕГМАРК



НАША МАТЕМАТИЧЕСКАЯ ВСЕЛЕННАЯ

В поисках фундаментальной
природы реальности



СЕРИЯ Э | Л | Е | М | Е | Н | Т | Ы

Элементы

Макс Тегмарк

**Наша математическая
вселенная. В поисках
фундаментальной
природы реальности**

«Corpus (ACT)»

2014

УДК 51-71
ББК 22.6

Тегмарк М.

Наша математическая вселенная. В поисках
фундаментальной природы реальности / М. Тегмарк —
«Corpus (АСТ)», 2014 — (Элементы)

ISBN 978-5-17-085475-2

Галилео Галилей заметил, что Вселенная – это книга, написанная на языке математики. Макс Тегмарк полагает, что наш физический мир в некотором смысле и есть математика. Известный космолог, профессор Массачусетского технологического института приглашает читателей присоединиться к поискам фундаментальной природы реальности и ведет за собой через бесконечное пространство и время – от микрокосма субатомных частиц к макрокосму Вселенной.

УДК 51-71
ББК 22.6

ISBN 978-5-17-085475-2

© Тегмарк М., 2014
© Corpus (АСТ), 2014

Содержание

Глава 1. Что такое реальность?	8
Не то, чем кажется	8
Самый главный вопрос	11
Путешествие начинается	14
Резюме	18
Часть I. Все крупнее и крупнее	19
Глава 2. Наше место в пространстве	19
Космические вопросы	19
Насколько огромен космос?	20
Размеры Земли	22
Расстояние до Луны	23
Расстояние до Солнца и планет	24
Расстояние до звезд	25
Расстояние до галактик	27
Что такое пространство?	28
Резюме	31
Глава 3. Наше место во времени	32
Как появилась Солнечная система?	32
Как появились галактики?	36
Откуда приходят микроволны?	43
Как появились атомы?	52
Резюме	55
Глава 4. Вселенная в числах	56
Требуется точная космология	56
Точные флуктуации микроволнового фона	58
Телескопы и компьютеры	59
Золото в холмах	60
Точные данные о кластеризации галактик	64
Окончательная карта нашей Вселенной	70
Почему случился Большой взрыв?	74
Резюме	75
Глава 5. Наше космическое происхождение	77
Что не так с Большим взрывом?	78
Как действует инфляция	81
Благодатный дар	85
Вечная инфляция	88
Резюме	94
Глава 6. Добро пожаловать в мультиверс	95
Мультиверс I уровня	95
Мультиверс II уровня	105
Мультиверс: счет после первого периода	119
Резюме	121
Часть II. Все мельче и мельче	122
Глава 7. Космическое «лего»	122
Атомное «лего»	122
Ядерное «лего»	123

«Лего» элементарных частиц	125
Математическое «лего»	126
Фотонное «лего»	130
Выше закона?	131
Кванты и радуга	132
Образование волн	134
Квантовые причуды	136
Коллапс консенсуса	138
Без причуд никуда	140
Квантовое недоразумение	141
Резюме	142
Глава 8. Мультиверс III уровня	143
Мультиверс III уровня	144
Иллюзия случайности	149
Квантовая цензура	153
Радости обойденного	157
Почему ваш мозг – не квантовый компьютер	158
Субъект, объект и среда	161
Квантовый суицид	165
Квантовое бессмертие?	168
Мультиверс объединенный	170
Много миров – или слов?	174
Резюме	177
Часть III. Шаг назад	179
Глава 9. Внутренняя, внешняя и консенсусная реальности	179
Внешняя и внутренняя реальности	179
Правда, вся правда и ничего, кроме правды	180
Консенсусная реальность	182
Физика: связь внешней реальности с консенсусной	184
Резюме	185
Глава 10. Физическая и математическая реальности	187
Математика, везде математика	189
Дополнительные улики	195
Гипотеза математической Вселенной	196
Уменьшение нормы разрешенного багажа	197
Что такое математическая структура?	201
«Багаж» и эквивалентные описания	201
«Багаж» и математические структуры	203
Симметрия и другие математические свойства	204
Резюме	208
Глава 11. Иллюзорно ли время?	210
Может ли физическая реальность быть математической?	210
Кто вы?	217
«Коса» жизни	217
Где вы? И что вы воспринимаете?	225
Когда вы?	230
Резюме	243
Глава 12. Мультиверс IV уровня	245
Почему я верю в мультиверс IV уровня	245

Исследование мультиверса IV уровня	248
Следствия существования мультиверса IV уровня	258
Живем ли мы в модели?	266
Отношения между ГМВ, мультиверсом IV уровня и иными гипотезами	269
Проверка мультиверса IV уровня	269
Резюме	273
Глава 13. Жизнь, Вселенная и все такое	275
Насколько велика наша физическая реальность?	275
Будущее физики	280
Чем все закончится: о будущем нашей Вселенной	281
Будущее жизни	284
Ваше личное будущее	299
Резюме	303
Благодарности	305
Рекомендованная литература	306

Макс Тегмарк

Наша математическая вселенная. В поисках фундаментальной природы реальности

© Max Tegmark, 2014

© А. Сергеев, перевод на русский язык, 2017

© А. Бондаренко, художественное оформление, макет, 2017

© ООО «Издательство Аст», 2017

Издательство CORPUS ®

* * *

Посвящается Мейе

Глава 1. Что такое реальность?

Деревья в основном состоят из воздуха. Сгорая, они вновь возвращаются в воздух, а в их огне высвобождается тепло солнечного пламени, которое было связано в ходе превращения воздуха в дерево. А небольшое количество оставшегося пепла – это та часть, которая поступила не из воздуха, а из твердой земли.

Ричард Фейнман

Есть многое в природе, друг Горацио, что и не снилось нашим мудрецам.

Уильям Шекспир

Не то, чем кажется

Секунду спустя я умер. Я бросил педали и ударил по тормозам, но было уже поздно. Фары. Решетка радиатора. Сорок тонн стали, истошно вопящих, будто современный дракон. Я успел увидеть глаза водителя. Время для меня замедлилось, жизнь промелькнула перед глазами, а последней мыслью было: «Надеюсь, это просто ночной кошмар». Увы, нутром я чувствовал, что это – реальность.

Но как я мог быть уверен, что это не сон? Вдруг бы перед самым ударом я увидел нечто, возможное только во сне – скажем, что моя покойная учительница Ингрид, живая и здоровая, сидит на багажнике моего велосипеда? Или вдруг бы пятью секундами раньше в левом верхнем углу поля зрения появилось всплывающее окно с текстом: «Ты уверен, что стоит выезжать на перекресток, не взглянув направо?», а под ним пара кнопок: «Далее» и «Отмена»? Если бы я посмотрелся таких фильмов, как «Матрица» и «Тринадцатый этаж», то мог бы задуматься, не является ли вся моя жизнь компьютерной симуляцией, и поставить под вопрос свои представления о природе реальности. Однако я не пережил ничего подобного и погиб с твердой уверенностью, что проблема совершенно реальна. В конце концов, что может быть тверже и реальнее, чем сорокатонный грузовик?

Однако не все устроено так, как кажется на первый взгляд. Это касается и грузовиков, и реальности как таковой. Об этом не только рассуждают философы и писатели-фантасты, но и свидетельствуют результаты физических экспериментов. Уже столетие физики знают, что твердая сталь – это главным образом пустота. Атомные ядра, составляющие 99,95 % ее массы – это крошечные шарики, занимающие около 0,00000000000001 % ее объема, и этот почти вакуум воспринимается как твердый лишь за счет электрических сил, очень надежно удерживающих ядра на своих местах. Более того, ученые выяснили, что субатомные частицы, по-видимому, могут находиться одновременно в нескольких местах. Эта загадка составляет суть квантовой физики (гл. 7). Но если я сложен из таких частиц, а те могут находиться в двух местах сразу, не может ли такое произойти и со мной? На самом деле, за три секунды до аварии я подсознательно решал: смотреть ли мне только налево, куда я всегда поворачивал по пути в гимназию Блакебергс, поскольку на поперечной улице никогда не было движения – или взглянуть и направо, на всякий случай? В то утро 1985 года злополучное спонтанное решение привело меня на край гибели. Все зависело от того, попадет ли один-единственный атом кальция в конкретный синапс префронтальной коры моего головного мозга, вызвав возбуждение конкретного нейрона и отправку им электрического сигнала, который запустит целый каскад активности других нейронов, совместно кодирую-

щих мысль «Не беспокойся». Так что, если бы атом кальция изначально находился сразу в двух слегка различных положениях, то полсекунды спустя мои глаза смотрели бы сразу в двух направлениях, пару секунд спустя мой велосипед находился бы в двух местах одновременно, а еще немного погодя я был бы одновременно и жив, и мертв. Ведущие мировые физики, занимающиеся квантовой теорией, эмоционально рассуждают, действительно ли случается нечто такое, отчего наш мир расщепляется на параллельные вселенные с различными историями, или действительно ли уравнение Шредингера, главный квантовый закон движения, нуждается в поправках. Так умер ли я на самом деле? В данной реальности это едва со мной не случилось, но погиб ли я в другой вселенной, столь же реальной, где эта книга осталась ненаписанной? Если я одновременно жив и мертв, можем ли мы скорректировать наши представления о том, что такое реальность, чтобы все это приобрело смысл?

Если вам кажется, что написанное мной абсурдно и что физики мутят воду, предупреждаю: когда я подойду к рассказу, как я воспринял тот момент, будет еще хуже. Если я нахожусь в двух разных местах двух параллельных вселенных, то одна из моих копий выживет. Если применить те же рассуждения ко всем прочим способам, которыми я мог бы умереть в будущем, то, похоже, всегда будет по крайней мере одна параллельная вселенная, в которой я никогда не умру. Поскольку мое сознание существует только там, где я жив, означает ли это, что субъективно я бессмертен? Если да, то будете ли и вы ощущать себя бессмертным? Мы ответим на эти вопросы в гл. 8.

Удивляет ли вас, что физика видит реальность куда более странной, чем мы могли вообразить? На самом деле, это не так уж удивительно, если всерьез воспринимать дарвиновскую теорию эволюции! Эволюция наделила нас интуицией лишь в отношении тех аспектов физики, которые имели значение для выживания наших далеких предков, вроде параболических траекторий летящих камней (что объясняет наш интерес к бейсболу). Доисторическая женщина, слишком глубоко задумавшаяся о том, из чего в конечном счете состоит материя, могла не заметить подкрадывающегося тигра и выбыть из генофонда. Таким образом, теория Дарвина дает проверяемое предсказание: всякий раз, когда мы применяем технику, чтобы взглянуть на реальность за пределами человеческих масштабов, наша эволюционно выработанная интуиция дает сбой. Мы неоднократно проверяли это предсказание, и результаты безоговорочно свидетельствуют в пользу Дарвина. Эйнштейн понял, что при высоких скоростях время замедляется, и укорял Нобелевский комитет, посчитавший это открытие слишком странным для того, чтобы присудить автору премию именно за теорию относительности. При низких температурах жидкий гелий может течь вверх. При высоких температурах сталкивающиеся частицы меняют свою идентичность. Для меня электрон, который при столкновении с позитроном превращается в Z -бозон, кажется почти настолько же естественным, как пара автомобилей, сливающихся при столкновении в круизный лайнер. В микроскопических масштабах частицы, как ни удивительно, способны находиться в двух местах одновременно, и это приводит к описанным выше квантовым головоломкам. В астрономически огромных масштабах – вот сюрприз! – странности появляются вновь. Если вы интуитивно понимаете все аспекты черных дыр, то, я думаю, вы единственный в своем роде и вам следует немедленно отложить эту книгу и опубликовать свои открытия, прежде чем кто-либо уведет у вас из-под носа Нобелевскую премию за квантовую гравитацию. При переходе на еще большие масштабы нас ждут новые странности, поскольку реальность гораздо грандиознее всего, что можно увидеть в лучшие телескопы. Доминирующая сейчас теория о начале Вселенной, *теория космологической инфляции* (гл. 5), предполагает, что пространство не просто громадно, а бесконечно и содержит бесконечно много точных ваших копий и еще больше ваших «почти копий», проживающих все возможные варианты вашей жизни в параллельных вселенных двух типов. Если правильность этой теории подтвердится, то, даже окажись что-то не так с аргументом из квантовой физики (я привел его выше, когда

рассказал о своей копии на велосипеде, не добравшейся до школы), все равно будет существовать бесконечно много других Максов в солнечных системах где-то в далеком космосе, проживших точно такие же жизни вплоть до того же судьбоносного момента и решивших не смотреть направо.

Иными словами, открытия в физике поставили под вопрос некоторые из наших фундаментальных представлений о реальности и при проникновении в микрокосм, и при выходе в макрокосм. Многие представления о реальности подвергаются тяжелым испытаниям даже в промежуточных, соразмерных людям масштабах, когда мы средствами нейробиологии проникаем в наш мозг (гл. 11).

И последнее – по порядку, но не по значению: мы знаем, что математические уравнения открывают окно в механику природы, что метафорически проиллюстрировано на рис. 1.1. Но почему наш физический мир демонстрирует столь исключительную математическую упорядоченность, позволившую Галилею, супергерою от астрономии, объявить природу книгой, «написанной на языке математики», а нобелевскому лауреату Юджину Вигнеру говорить о «непостижимой эффективности математики в естественных науках»¹ как о загадке, требующей разрешения? Ответ на этот вопрос – главная цель этой книги. В гл. 10–12 мы рассмотрим удивительные связи между вычислениями, математикой, физикой и сознанием. Я также поделюсь с вами своей (на первый взгляд сумасшедшей) идеей: наш физический мир не только *описывается* математикой, он и *есть* математика, делающая нас самосознающими частями гигантского математического объекта. Это приводит нас к новому, последнему семейству параллельных вселенных, столь обширному и экзотическому, что рядом с ним бледнеют все упомянутые выше странности, и это вынуждает нас отбросить самые глубокие врожденные представления о реальности.

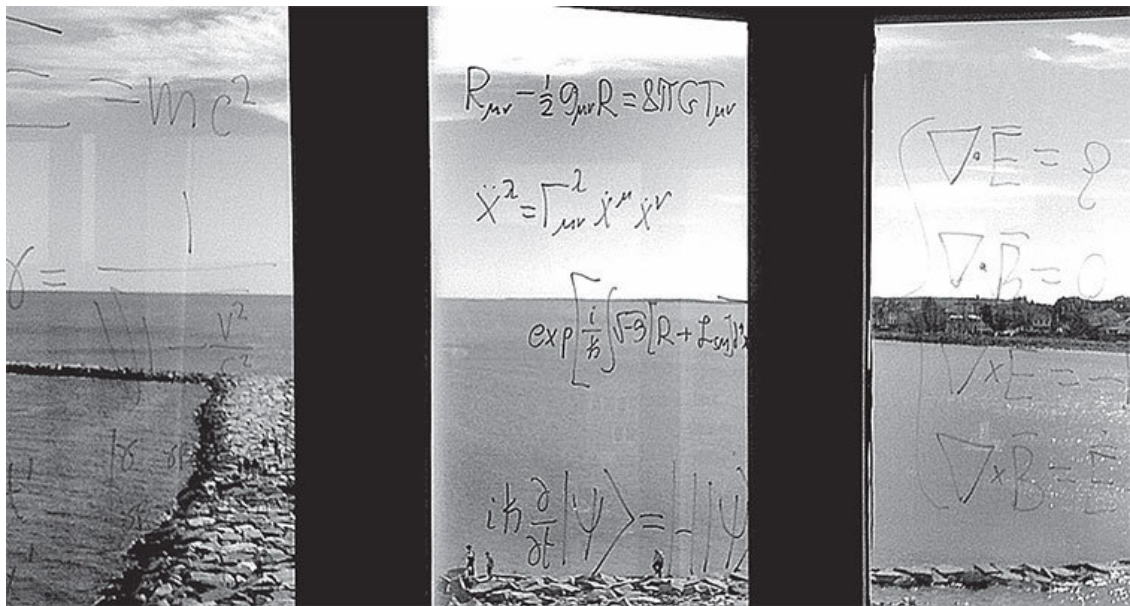


Рис. 1.1. Глядя на реальность сквозь призму физики, мы видим, что они описывают схемы и закономерности. Но для меня математика – это нечто большее, чем окно в мир. Я намерен убедить вас, что наш физический мир не только описывается математикой, но и сам является математикой, точнее – математической структурой.

¹ Так называлась знаменитая статья Юджина Вигнера. В русском переводе она впервые опубликована в № 3 журнала «Успехи физических наук» за 1968 год (<http://ufn.ru/ru/articles/1968/3/f/>). – Прим. пер. Далее, если не указано иное, – примечания автора.

Самый главный вопрос

Откуда все это взялось? Как закончится? Насколько все это велико? Вероятно, все человеческие культуры задавались этими вопросами и приходили к ответам в форме мифов, легенд и религиозных доктрин. Эти вопросы столь сложны, что в их отношении нет глобального консенсуса (рис. 1.2). Ответы сильнее всего образом разнятся, и по крайней мере некоторые из этих различий, по-видимому, отражают различия в образе жизни. Так, в мифах древних египтян, зависевших от разливов Нила, все, что ни есть в нашем мире, явилось из воды. А скандинавская мифология утверждает, что жизнь произошла из огня и льда.

Другие большие вопросы, затронутые древними культурами, не менее фундаментальны. *Что реально? Существует ли в реальности нечто большее, чем мы способны увидеть?* «Да», – ответил Платон. Древнегреческий философ сравнил людей с узниками, которые проводят всю жизнь в пещере, в оковах. Они смотрят на стену, на которую падают тени, и приходят к убеждению, что эти тени и есть реальность. Платон утверждал: то, что мы называем реальностью, – лишь ограниченное, искаженное представление о ней, и мы, чтобы приблизиться к ее пониманию, должны освободиться от ментальных оков.



Рис. 1.2. Многие космологические вопросы, которых мы касаемся в этой книге, веками завораживали мыслителей, но всеобщего согласия достичь так и не удалось. Представленная на рисунке классификация основывается на презентации аспиранта Массачусетского технологического института Дэвида Эрнандеса, сделанной в 2011 году на моем занятии по космологии. Следует учитывать, что упрощенные классификации гарантированно неточны: многие религиозные учения ветвятся, а некоторые попадают сразу в несколько категорий. Например, индуизм содержит элементы всех трех представленных концепций сотворения: согласно одной легенде, и бог-творец Брахма, и Вселенная появились из яйца, которое, в свою очередь, возникло из воды.

Некоторые ответы на вопрос: «Что такое реальность?»

На вопрос есть осмысленный ответ	<p>Земля, вода, огонь, воздух и квинтэссенция.</p> <p>Атомы в движении.</p> <p>Элементарные частицы в движении.</p> <p>Струны в движении.</p> <p>Квантовые поля в искривленном пространстве-времени.</p> <p>М-теория (можете подставить свою любимую прописную букву).</p> <p>Божественное творение.</p> <p>Социальный конструкт.</p> <p>Нейрофизиологический конструкт.</p> <p>Сон.</p> <p>Информация.</p> <p>Симуляция (а-ля “Матрица”).</p> <p>Математическая структура.</p> <p>Мультиверс IV уровня.</p>
На вопрос нет осмысленного ответа	<p>Реальность существует, но мы, люди, неспособны вполне ее познать: у нас нет доступа к “вещам в себе” (Иммануил Кант).</p> <p>Реальность принципиально непознаваема.</p> <p>Мы не только не знаем, что такое реальность, но и не смогли бы это выразить, если бы знали.</p> <p>Наука — это нарратив (ответ Жака Деррида и других постмодернистов).</p> <p>Реальность у нас в голове (конструктивистский ответ).</p> <p>Реальности не существует (солипсизм).</p>

Если занятия физикой чему-либо меня научили, так это тому, что Платон прав. Современная физическая наука предельно ясно показала: природа реальности не такая, какой она кажется. Но если так, что такое реальность? Какова связь между внутренней реальностью нашего сознания и внешней реальностью? Из чего в конечном счете все состоит? Как все устроено? Почему? Есть ли смысл у всего, и если да, то какой? И (позаимствую формулу у Дугласа Адамса) каков ответ на «главный вопрос жизни, Вселенной и всего такого?»

Мыслители предложили впечатляющий спектр ответов на вопрос, что такое реальность, а некоторые даже пытались отвести этот вопрос как таковой.

Эта книга (на самом деле и моя научная карьера) — личная попытка подойти к ответу на этот вопрос. Отчасти причина многоголосия состоит, очевидно, в том, что мыслители по-разному его интерпретировали. Слово «реальность» имеет много коннотаций. Я применяю его для обозначения фундаментальной природы внешнего физического мира, частью которого мы являемся, и поглощен поиском лучшего его понимания. Но в чем же состоит мой подход?

Будучи школьником, однажды вечером я начал читать «Смерть на Ниле» Агаты Кристи. Хотя я понимал, что будильник поставлен на семь утра, я не отложил книгу, пока около четырех ночи загадка не разрешилась. Детективные истории притягивали меня с детства, а когда мне было лет двенадцать, я с одноклассниками Андреасом Бетте, Маттиасом Боттнером и Улой Хансон открыл детективный клуб. Мы не поймали ни одного преступника, но

нас захватывала сама идея разгадывания загадок. Для меня вопрос, что такое реальность, представляет собой главную детективную историю, и мне невероятно повезло: у меня есть возможность тратить время на ее разгадывание. Я расскажу о случаях, когда любопытство заставляло меня просиживать до самого утра, не имея сил остановиться, пока загадку не удавалось разрешить. Вот только я не книгу читал, а пытался вывести математические уравнения, которые, как я знал, могут привести меня к ответу.

Я физик и применяю физический подход к тайнам реальности. Это значит, что я отталкиваюсь от великих вопросов – насколько велика Вселенная и из чего все состоит? – и работаю с ними как с детективной загадкой: комбинирую удачные наблюдения с рассуждениями и проверяю все версии.

Путешествие начинается

Физический подход? Не лучший ли это способ превратить нечто увлекательное в нечто скучное? Когда попутчик в самолете спрашивает меня, чем я занимаюсь, у меня есть два варианта ответа. Когда я не прочь поболтать, я говорю, что астрономией, и это неизменно приводит к интересной беседе². Если же я не склонен к разговору, то отвечаю, что физикой, и в ответ обычно слышу нечто вроде: «Ой, а для меня это был худший предмет в школе» – и меня не беспокоят до конца полета.

На самом деле физика была и моим наименее любимым предметом. Я до сих пор помню самый первый урок физики. Монотонным голосом учитель объявил, что мы будем изучать понятие плотности. Что плотность – это масса, деленная на объем, и поэтому, если масса такая-то, а объем такой-то, мы можем вычислить плотность. Все, что было после этого, помнится как в тумане. Всякий раз, когда у учителя срывался эксперимент, он ругал влажность и приговаривал: «С утра все работало». А еще я помню, как мои приятели не могли понять, почему у них ничего не выходит, пока я не признался, что сунул магнит под их осциллограф.

Когда пришло время получения высшего образования, я не захотел заниматься физикой и иными техническими дисциплинами, а сделал выбор в пользу Стокгольмской школы экономики и специализации в вопросах окружающей среды. Я хотел внести скромный вклад в то, чтобы сделать нашу планету более приятным местом, и чувствовал, что главная проблема не в отсутствии технических решений, а в том, что мы неправильно используем имеющиеся технологии. Я считал, что лучший способ влиять на людей – это действовать через их кошельки, и был захвачен идеей экономических стимулов, которые поставили бы эгоизм на службу общественному благу. Увы, очень скоро мои иллюзии потерпели крушение и я пришел к выводу, что экономика – это в основном форма интеллектуальной проституции: вы получаете вознаграждение, говоря власть имущим то, что они хотят услышать. Что бы ни хотел сделать политик, всегда найдется экономический советник, который обоснует, почему сделать нужно именно это. Франклин Рузвельт хотел увеличить государственные расходы, поэтому он прислушивался к Джону Мейнарду Кейнсу, а Рональд Рейган хотел сократить государственные расходы и слушал Милтона Фридмана.

Как раз тогда мой однокашник Йохан Олдхофф дал мне книгу, которая стала для меня судьбоносной – «Вы, конечно, шутите, мистер Фейнман!». Я никогда не встречался с Фейнманом, но именно благодаря ему мое внимание переключилось на физику. Хотя книга была, в общем-то, не о физике (автор подробнее рассказывает, например, о том, как вскрыть замок или закадрить девушку), между строк читалось, что этот человек влюблен в физику. Это заинтриговало меня. Если вы заметите заурядного парня, ведущего под руку сногшибательную женщину, то, вероятно, подумаете, что недопонимаете чего-то. Возможно, она видит его скрытые достоинства. Неожиданно я почувствовал то же самое по отношению к физике: что такое видит в ней Фейнман, что я упустил в школе?

Я был просто обязан разобраться. Я взял в отцовском книжном шкафу первый том «Фейнмановских лекций по физике» и начал читать: «Если бы в результате какой-нибудь катастрофы все накопленные научные знания оказались утрачены и к грядущим поколениям живых существ перешла бы только одна фраза, то какое утверждение, составленное из наименьшего количества слов, принесло бы наибольшую информацию?»

² Эта беседа иногда начинается так: «О, астрология! Я – Дева». Если дать более точную формулировку: «Космология», то я часто слышу: «О, космология!» – и далее следуют вопросы о карандашах и туши для глаз.

Ничего себе! Этот парень *совершенно* не похож на моего учителя физики! Фейнман продолжал: «Я считаю, что это – *атомная гипотеза*: все тела состоят из атомов – маленьких телец, которые находятся в непрерывном движении, притягиваются на небольшом расстоянии, но отталкиваются, если одно из них плотнее прижать к другому»³.

У меня в голове будто зажглась лампочка. Я сидел как замороженный. Я чувствовал себя так, словно получаю религиозный опыт. Наконец-то я врубился! На меня снизошло откровение, и вслед за Фейнманом я понял: физика – это самое увлекательное интеллектуальное приключение, какое только может быть, это поход за пониманием глубочайших загадок нашей Вселенной. Физика вовсе не превращает нечто волнующее в нечто скучное. Скорее она помогает нам видеть более ясно, делая мир еще более красивым и полным чудес. Когда осенью я еду на работу на велосипеде, я вижу красоту деревьев, окрашенных в золотой, оранжевый и красный цвета. Но взгляд на эти деревья через призму физики раскрывает еще большую красоту, которая замечательно схвачена в цитате Фейнмана, вынесенной в эпиграф этой главы. И чем пристальнее я вглядываюсь, тем больше изящества замечая: в гл. 3 мы откроем, что деревья в конечном счете появляются из звезд, а в гл. 8 увидим, что изучение объектов, из которых они сложены, указывает на существование параллельных вселенных.

В то время у меня была девушка, которая изучала физику в Королевском технологическом институте, и ее учебники казались мне гораздо интереснее моих. Наши отношения давно закончились, а вот моя любовь к физике жива до сих пор. Поскольку высшее образование в Швеции было бесплатным, я зачислился в ее университет, даже не извещая администрацию Стокгольмской школы экономики о своей двойной жизни. Так официально началось мое детективное расследование, и эта книга – отчет, написанный спустя четверть столетия.

Так что же такое реальность? Я дал этой главе столь дерзкое название не для того, чтобы высокомерно навязать готовый ответ (хотя в последней части книги мы рассмотрим весьма интригующие возможности), а затем, чтобы пригласить присоединиться к моим собственным поискам и разделить мои мысли и волнение, связанные с этими расширяющими сознание загадками. Я думаю, что и вы, подобно мне, придете к выводу: чем бы ни была реальность, она радикально отличается от того, чем мы ее считали. Я надеюсь, что вы, как и я, сочтете, что это сообщает повседневным неурядицам вроде штрафов за парковку и тоски другой масштаб, помогая легче переступить через них и в полной мере наслаждаться радостями и загадками жизни.

Когда я обсудил замысел этой книги с Джоном Брокманом, который впоследствии стал моим литературным агентом, он выразился предельно ясно: «Мне нужен не учебник, а ваша личная книга». Поэтому я написал своего рода научную автобиографию. Хотя она более про физику, чем про меня, это, безусловно, не привычная научно-популярная книжка, стремящаяся дать объективный обзор физики, в котором отражен устоявшийся консенсус и представлено столько же места для всех прочих точек зрения. Скорее, это личное расследование природы реальности, и, я надеюсь, вам понравится смотреть на нее моими глазами. Вместе мы изучим улики, которые я считаю самыми важными, и попробуем понять, на что они указывают.

³ Цит. по: Фейнман, Р., Лейтон, Р., Сэндс, М. *Фейнмановские лекции по физике*. Вып. 1. *Современная наука о природе. Законы механики*. М.: Мир, 1965. С. 23. – Прим. пер.

				Искушенный любитель научно-популярной литературы
Как читать эту книгу	Читатель, интересую- щийся наукой	↓	Физик	Название главы
Все крупнее и крупнее <i>Реальность в больших масштабах</i>	1	1	1	Что такое реальность?
	2	↓	↓	Наше место в пространстве
	3			Наше место во времени
	4			Вселенная в числах
	5			Наше космическое происхождение
Все мельче и мельче <i>Реальность в малых масштабах</i>	6	6	6	Добро пожаловать в мультиверс
	7	↓	↓	Космическое “лего”
	8	8	8	Мультиверс III уровня
Шаг назад <i>Является ли реальность математической?</i>	9	9	9	Внутренняя, внешняя и консенсус- ная реальности
	10	10	10	Физическая и математическая реальности
	11	11	11	Иллюзорно ли время?
	12	12	12	Мультиверс IV уровня
	13	13	13	Жизнь, Вселенная и все такое

Рис. 1.3. Если вы прочитали много современных научно-популярных книг и чувствуете, что понимаете, что такое искривленное пространство, Большой взрыв, космический микроволновый фон, темная энергия, квантовая механика и т. д., вы можете попробовать пропустить гл. 2, 3, 4 и 7, просмотрев только «Резюме» в конце каждой из них. Если вы профессиональный физик, можете пропустить и гл. 5. Однако многие концепции, которые могут показаться знакомыми, на удивление тонкие, и если вы не можете ответить на все вопросы 1–6 в гл. 2, то, я надеюсь, вы изучите первые главы.

<i>Основная тема</i>	<i>Статус</i>
Введение	
Насколько велик космос?	Общепринятое
История нашей Вселенной	
Точная космология	
Космологическая инфляция	
Параллельные вселенные I и II уровней	Спорное
Квантовая механика	Общепринятое
Квантовые параллельные вселенные	Спорное
Роль сознания	
Реальность как математика	Крайне спорное
Прояснение этой идеи	
Окончательный мультиверс	
Будущее Вселенной и человека	Спорное

Мы начнем путешествие с того, как недавние научные открытия трансформировали сам контекст вопроса, что такое реальность. Физика пролила свет на внешнюю реальность в самых крупных (гл. 2–6) и малых (гл. 7–8) масштабах. В части I мы рассмотрим вопрос, насколько велика Вселенная, и будем приближаться к ответу, переходя к все большим космическим масштабам. Одновременно мы займемся изучением нашей космической колыбели и двух типов параллельных вселенных, попутно обнаруживая признаки того, что пространство, по сути, является математическим. В части II мы займемся вопросом, из чего все состоит, и погрузимся в субатомный микрокосм. Мы рассмотрим третий тип параллельных вселенных и найдем, что фундаментальные «строительные блоки» материи также, в сущности, математические. В части III сделаем шаг назад и подумаем, что именно это говорит о фундаментальной природе реальности. Начнем с обоснования того, что наши неудачи в понимании сознания не мешают исчерпывающему пониманию внешней физической реальности. Затем займемся моей самой радикальной и спорной идеей, что фундаментальная реальность – чисто математическая; переведем такие понятия, как «случайность», «сложность» и даже «изменение» в статус иллюзий и найдем признаки существования четвертого, последнего уровня параллельных вселенных. Путешествие завершится в гл. 13, когда, вернувшись домой, мы рассмотрим, что все это значит для будущего жизни во Вселенной, для людей и вас лично.

Резюме

- Мне кажется, что самая важная в физике мысль о фундаментальной природе реальности – это мысль о том, что какой бы эта природа ни была, она сильно отличается от того, какой нам кажется.
- В части I книги мы будем исследовать физическую реальность во все более крупных масштабах, переходя от планет к звездам, галактикам, сверхскоплениям, нашей Вселенной в целом и двум возможным уровням параллельных вселенных.
- В части II мы исследуем физическую реальность во все более малых масштабах, переходя от атомов к все более весомым «строительным блокам», и повстречаемся с параллельными вселенными III уровня.
- В части III мы отступим на шаг и изучим фундаментальную природу этой странной физической реальности, рассмотрев при этом ту возможность, что в конечном счете она – чисто математическая структура, представляющая собой часть IV и последнего уровня параллельных вселенных.
- Слово «реальность» для разных людей означает совершенно разные вещи. Я использую это слово для обозначения фундаментальной природы внешнего физического мира, частью которого мы являемся.

Часть I. Все крупнее и крупнее

Глава 2. Наше место в пространстве

Космос велик. Действительно велик. Вы просто не поверите, насколько обширно, огромно, умопомрачительно велик космос.
Дуглас Адамс «Автостопом по Галактике»⁴

Космические вопросы

Мальчик поднимает руку, и я жестом предлагаю задать вопрос. «А космос тянется без конца?» – спрашивает он.

Вот это да! Я только что закончил небольшой рассказ об астрономии в «Детском уголке» в Уинчестере (Массачусетс, США), где мои дети проводят время после уроков, и вся очаровательная группа детсадовцев, сидя на полу, глядит на меня большими вопрошающими глазами, ожидая ответа. А этот пятилетний малыш только что задал вопрос, на который я не могу ответить! На самом деле, ответить на него не может никто на планете. И все же это не безнадежный метафизический вопрос, а серьезный, научный: теории, о которых я вам расскажу, дают на этот счет ясные предсказания, а уже идущие эксперименты могут пролить на него еще больше света. Я считаю, что это важнейший вопрос о фундаментальной природе физической реальности, и он приведет нас к двум типам параллельных вселенных (гл. 5).

Год за годом следя за мировыми новостями, я чувствовал, как во мне растет мизантропия, но всего за несколько секунд этот малыш укрепил мою веру в потенциал человечества. Если пятилетний ребенок может говорить такие вещи, представьте только, на какие достижения способны взрослые в подходящих обстоятельствах! Он также напомнил мне о важности обучения. Все мы от рождения наделены способностью удивляться, но в какой-то момент школа обычно умудряется вытравить ее из нас. Я чувствую, что важнейшая моя задача как учителя не изложить факты, а разжечь эту угасшую страсть к вопрошанию.

Я люблю вопросы. Особенно глобальные. Я чувствую себя счастливым, потому что могу тратить львиную долю своего времени на интересные вопросы. То, что я могу называть эту деятельность работой и зарабатывать так на жизнь, – большая удача, превосходящая мои самые смелые надежды. Вот список из шестнадцати вопросов, которые мне чаще всего задают:

1. Как может пространство не быть бесконечным?
2. Как бесконечное пространство может быть создано за конечное время?
3. Куда расширяется Вселенная?
4. Где именно в пространстве произошел наш Большой взрыв?
5. Произошел ли наш Большой взрыв в одной точке?
6. Если возраст нашей Вселенной всего 14 млрд лет, то как мы видим объекты на расстоянии 30 млрд световых лет?
7. Не нарушают ли галактики, удаляющиеся быстрее света, теорию относительности?
8. Галактики действительно удаляются от нас – или это пространство расширяется?
9. Расширяется ли Млечный Путь?
10. Найдены ли следы сингулярности Большого взрыва?

⁴ Пер. В. Филиппова. – Прим. пер.

11. Не нарушает ли закон сохранения энергии возникновение материи почти из ничего в ходе инфляции?
12. Что стало причиной нашего Большого взрыва?
13. Что было до нашего Большого взрыва?
14. Какова окончательная судьба нашей Вселенной?
15. Что такое темная материя и темная энергия?
16. Действительно ли мы несущественны для Вселенной?

На одиннадцать вопросов мы ответим в следующих четырех главах. Но сначала вернемся к детсадовскому вопросу, центральному для всей первой части книги: *тянется ли космос бесконечно?*

Насколько огромен космос?

Однажды отец дал мне совет: «Если ты задумался над сложным вопросом, на который не можешь ответить, займись сначала более простым вопросом, на который не можешь ответить». Последуем этому совету и выясним, какой минимальный размер должно иметь пространство, чтобы не противоречить наблюдениям. На рис. 2.1 показано, как поразительно выросли эти размеры: сегодня мы знаем, что пространство по крайней мере в миллиард триллионов (10^{21}) раз превышает наибольшие расстояния, знакомые древним охотникам и собирателям, – те, что они могли пройти за время своей жизни.

Более того, на рисунке видно, что расширение наших горизонтов было не уникальным событием, а повторялось многократно. Всякий раз, когда людям удавалось заглянуть дальше и построить карту более крупных структур Вселенной, мы обнаруживали, что все известное нам прежде является частью чего-то большего. Как показано на рис. 2.2, наша родина – это часть планеты, которая является частью Солнечной системы, которая является частью Галактики, которая является частью паттерна скоплений галактик, который является частью наблюдаемой Вселенной, которая является частью одного или более уровней параллельных вселенных.

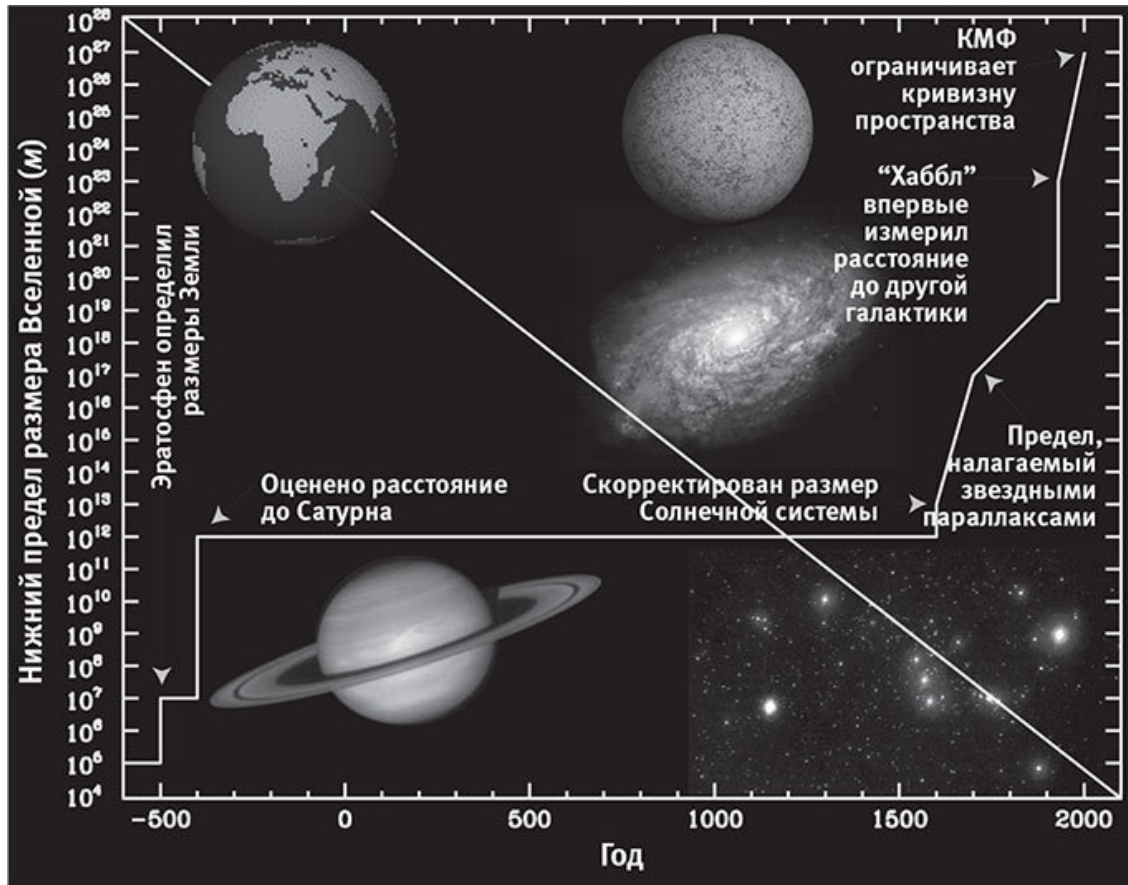


Рис. 2.1. Нижнее ограничение на размер нашей Вселенной постоянно растет. Заметьте, что шкала на вертикальной оси очень крутая: с каждым делением размеры возрастают в 10 раз.

Люди думали, что все видимое – это и есть все существующее, и высокомерно помещали себя в центр мироздания. Таким образом, недооценка была лейтмотивом наших поисков понимания космоса. И все же рис. 2.1 отражает и другую мысль, вдохновляющую меня: мы многократно недооценивали не только размеры космоса, но и силу человеческого разума, способного его понять. У наших пещерных предков был такой же большой мозг, как и у нас, и поскольку они не тратили вечера на просмотр телевизора, я уверен, что они задавались вопросами вроде: «Что это там такое в небе?» или «Откуда это все взялось?» Они пересказывали друг другу красивые мифы и легенды, но им и в голову не приходило, что они способны найти настоящие ответы на эти вопросы. И что секрет заключается не в освоении полетов в космос для изучения небесных тел, а в том, чтобы позволить взлететь разуму.

Нет лучшей гарантии неудачи, чем признать, что успех невозможен, а значит, не надо и пытаться. Задним числом кажется, что многие великие прорывы в физике могли случиться раньше, поскольку необходимые инструменты уже существовали. Проведем аналогию с хоккеем: люди не забивали шайбу в пустые ворота просто потому, что считали свою клюшку сломанной. В следующих главах я поделюсь впечатляющими примерами того, как Исаак Ньютон, Александр Фридман, Георгий Гамов и Хью Эверетт преодолели эту неуверенность. Мне очень нравится высказывание нобелевского лауреата Стивена Вайнберга: «Так часто бывает в физике – ошибка не в том, что мы слишком серьезно относимся к своим теориям, а в том, что не воспринимаем их достаточно серьезно».

Сначала выясним, как определить размеры Земли и расстояние до Луны, Солнца, звезд и галактик. На мой взгляд, это одна из самых ярких детективных историй всех времен, кото-

рая, можно сказать, породила современную науку. Так что я горю желанием поделиться ею с вами, как закуской перед основным блюдом – последними достижениями космологии. Как вы увидите, первые четыре вопроса не требуют ничего сложнее измерений углов. Они также проиллюстрируют, насколько важно удивляться, казалось бы, банальным наблюдениям – ведь они могут оказаться ключевыми уликами.

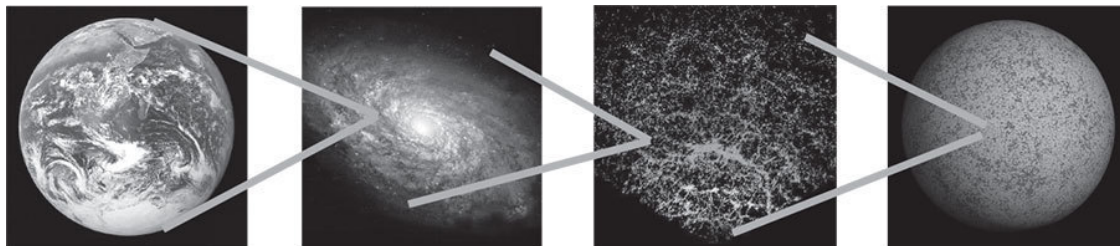


Рис. 2.2. Наша родина – это часть планеты (*слева*), которая является частью Солнечной системы, которая является частью Галактики (*посередине слева*), которая является частью паттерна скоплений галактик (*посередине справа*), которая является частью наблюдаемой Вселенной (*справа*), которая может быть частью одного или более уровней параллельных вселенных.

Размеры Земли

С древности люди замечали, что у корабля, уходящего за горизонт, корпус исчезает из виду раньше парусов. Это наводило на мысль, что поверхность океана искривлена и что Земля имеет сферическую форму, подобно Солнцу и Луне. Древние греки обнаружили прямое тому подтверждение, заметив, что Земля во время лунного затмения отбрасывает на Луну круглую тень (*рис. 2.3*). Хотя размеры Земли нетрудно оценить по виду парусных судов⁵, Эратосфен около 2,2 тыс. лет назад выполнил более точные измерения, догадавшись, как воспользоваться для этого измерением углов. Он знал, что в египетской Сиене в день летнего солнцестояния Солнце в полдень оказывалось прямо над головой, однако в Александрии, расположенной на 794 км севернее, оно в это время находилось на $7,2^\circ$ южнее зенита. Отсюда ученый вывел, что перемещение на 794 км соответствует прохождению $7,2^\circ$ из 360° окружности Земли, а значит, длина этой окружности составляет около $794 \text{ км} \times 360^\circ / 7,2^\circ \approx 39,7$ тыс. км, что удивительно близко к современному значению (40 тыс. км).

⁵ Радиус Земли составляет примерно $\frac{1}{2}d^2$, где d – максимальное расстояние, на котором можно увидеть парус высотой h , глядя с уровня моря.

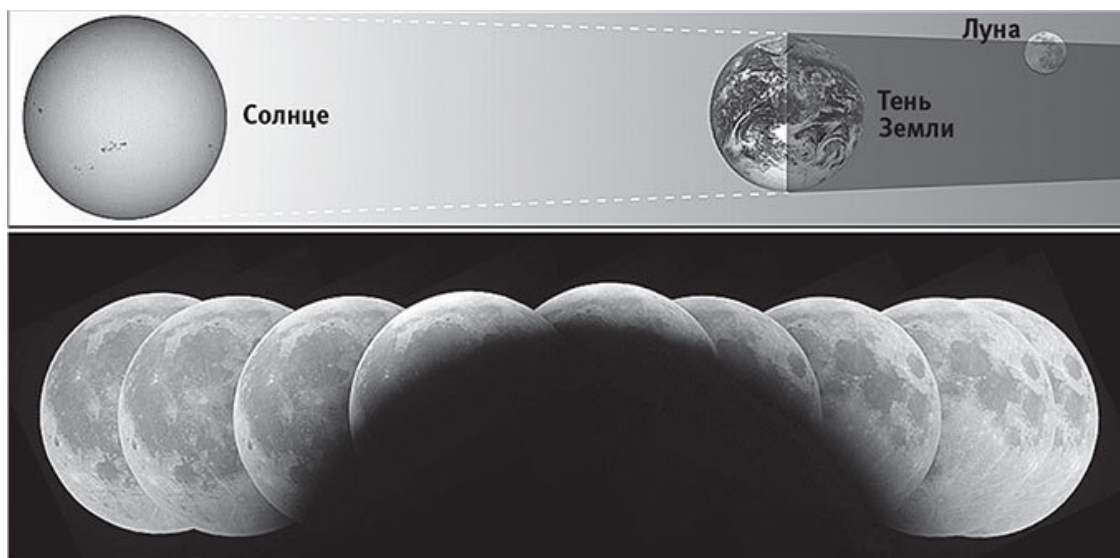


Рис. 2.3. Во время лунного затмения Луна проходит сквозь тень, отбрасываемую Землей (*вверху*). Более двух тысяч лет назад Аристарх Самосский сравнил размер Луны с размером земной тени во время лунного затмения и верно определил, что Луна примерно в 4 раза меньше Земли. (Мультиэкспозиционная фотография Скотта Иварта.)

Занятно, что Христофор Колумб глубоко заблуждался, положившись на позднейшие, менее точные расчеты и перепутав арабские мили с итальянскими, отчего пришел к выводу, что ему нужно проплыть всего 3,7 тыс. км, чтобы достичь Востока, тогда как действительное расстояние составляло 19,6 тыс. км. Ясно, что он не получил бы средства на экспедицию, если бы сделал правильные расчеты, и, очевидно, он бы не выжил, если бы ему не подвернулась Америка. Так что иногда везение оказывается важнее правоты.

Расстояние до Луны

Затмения долго порождали страх, трепет и мифы. (Колумб, попав на Ямайке в затруднительное положение, сумел испугать аборигенов, «предсказав» лунное затмение 29 февраля 1504 года.) Однако затмения дают и замечательную возможность оценить размеры космоса. Аристарх Самосский заметил (*рис. 2.3*): когда Земля оказывается между Солнцем и Луной и происходит лунное затмение, тень Земли, падающая на Луну, имеет искривленный край, причем круглая тень Земли в несколько раз больше Луны. Аристарх также понимал, что эта тень немного меньше самой Земли, поскольку Земля меньше; он учел это в своих вычислениях и пришел к выводу, что Луна примерно в 3,7 раза меньше Земли. Поскольку Эратосфен уже определил размер Земли, Аристарх просто поделил его на 3,7 и получил размеры Луны! По-моему, именно тогда человеческое воображение наконец оторвалось от Земли и начало завоевывать космос. Великое множество людей до Аристарха смотрело на Луну, но он первым смог определить ее размеры. Он совершил открытие благодаря силе своей мысли, а не полету на ракете.

Один научный прорыв нередко ведет к следующему. Определение размеров Луны сразу позволило определить расстояние до нее. Вытяните перед собой руку и посмотрите, какие предметы вы можете заслонить мизинцем. Угол, который он закрывает, составляет около 1° , и это примерно вдвое больше, чем нужно, чтобы закрыть Луну – проверьте сами, когда ее увидите. Чтобы объект перекрыл угол в полградуса, расстояние до него должно быть примерно в 115 раз больше его размеров. Если, глядя из окна самолета, вы можете половиной мизинца закрыть 50-метровый (олимпийского размера) плавательный бассейн,

то вы находитесь на высоте $115 \times 50 \text{ м} = 6 \text{ км}$. Аристарх рассчитал, что расстояние до Луны в 115 раз больше ее размера, что дало значение в 30 раз больше диаметра Земли.

Расстояние до Солнца и планет

А что можно сказать о Солнце? Попробуйте закрыть его мизинцем, и вы увидите, что оно перекрывает почти такой же угол, как и Луна: около половины градуса. Очевидно, что оно дальше Луны, поскольку во время солнечных затмений Луна закрывает его от нас (хотя и чуть-чуть), но насколько оно дальше? Это зависит от его размеров: например, если оно втрое больше Луны, то, чтобы перекрывать тот же угол, ему следует находиться в три раза дальше.

Аристарх Самосский смог дать разумный ответ и на этот вопрос. Солнце, Луна и Земля образуют прямоугольный треугольник в моменты, когда Луна оказывается в фазе первой или последней четверти, то есть когда Солнце освещает ровно половину обращенной к нам стороны Луны (рис. 2.4). Аристарх оценил угол между Луной и Солнцем в этот период время в 87° ⁶. Таким образом, ученый узнал длину стороны Земля – Луна треугольника Земля – Луна – Солнце и смог с помощью тригонометрических формул вычислить длину стороны Земля – Солнце, то есть расстояние между Землей и Солнцем. Он пришел к выводу, что Солнце находится примерно в 20 раз дальше Луны, а значит, оно в 20 раз крупнее ее. Иными словами, Солнце имело колоссальный размер – в пять с лишним раз больше Земли в поперечнике. Это подтолкнуло Аристарха к тому, чтобы (задолго до Николая Коперника) выдвинуть гелиоцентрическую гипотезу: он чувствовал, что разумнее считать Землю обращающейся вокруг более крупного Солнца, нежели наоборот.

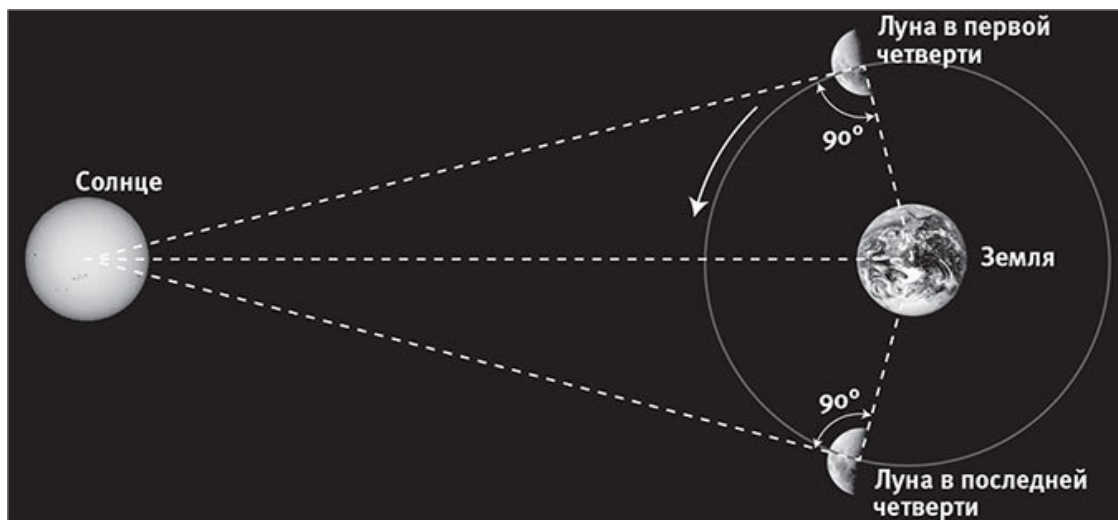


Рис. 2.4. Измерив угол между Солнцем и Луной в фазе первой или последней четверти, Аристарх Самосский получил возможность оценить расстояние до Солнца. (На этом рисунке масштаб не соблюден: Солнце примерно в 100 раз больше Земли и примерно в 400 раз дальше от нас, чем Луна.)

Эта история одновременно вдохновляет и предостерегает. Она учит тому, как важно найти оригинальный подход и верно оценивать погрешности измерений. Последнее у древних греков получалось хуже, и Аристарх, к сожалению, не исключение. Оказалось очень

⁶ При астрономических наблюдениях не видно, на каком расстоянии от нас находятся светила. Поэтому их рассматривают как точки на условной небесной сфере. Если из глаза наблюдателя провести лучи к двум светилам, то угол между этими лучами называют видимым расстоянием между светилами на небе. Его выражают в градусной мере. – Прим. пер.

трудно определить, когда Луна освещена ровно на 50 %, а правильное значение угла между Луной и Солнцем в этот момент составляет не 87° , а около $89,85^\circ$, что очень близко к прямому углу. Это делает треугольник (рис. 2.4) очень длинным и узким: в действительности Солнце почти в 20 раз дальше, чем подсчитал Аристарх, и примерно в 109 раз больше Земли в диаметре (так что в объеме Солнца уместилось бы более 1 млн таких планет, как Земля). К сожалению, эта грубая ошибка оставалась неисправленной в течение 2 тыс. лет. Когда за дело взялся Коперник, рассчитавший размеры и форму Солнечной системы, он правильно определил взаимное расположение и относительные размеры планетных орбит, но масштаб его модели Солнечной системы был занижен примерно в 20 раз. Это все равно, что перепутать настоящий дом с кукольным.

Расстояние до звезд

А что можно сказать о звездах? Насколько они далеки? И что они такое? Я думаю, что это одно из величайших в истории «глухих» детективных дел. Определение расстояний до Луны и Солнца было впечатляющим достижением, но тут, по крайней мере, имелась в качестве подсказки некоторая информация: они интересным образом меняли свое положение на небе, их форму и угловые размеры можно было измерять. Но звезда представляется совершенно безнадежным случаем! Она кажется тусклой белой точкой. Вы присматриваетесь и видите... всю ту же тусклую белую точку без малейших признаков формы и размера. Просто светящуюся точку. И, похоже, звезды не перемещаются по небу, если не считать видимого вращения всех звезд вместе, которое является иллюзией, вызванной вращением Земли.

Кое-кто в древности считал, что звезды – это маленькие отверстия в черной сфере, сквозь которые просачивается далекий свет. Джордано Бруно, напротив, предположил, что звезды подобны нашему Солнцу, но находятся очень далеко и, возможно, обладают собственными населенными планетами. Эти рассуждения не понравились католической церкви, и Бруно сожгли в 1600 году на костре.

В 1608 году неожиданно появился проблеск надежды: был изобретен телескоп. Галилео Галилей быстро его усовершенствовал и, посмотрев на звезды, увидел... лишь белые точки. Возвращаемся на исходную позицию. У меня есть звукозапись, на которой я ребенком играю «Ты свети, звезда, мерцай» на пианино моей бабушки Сигне. Еще недавно, в 1806 году, когда эта песня появилась, строчка «Кто ты в темной вышине?» продолжала волновать многих, и никто не мог, положив руку на сердце, сказать, что он знает ответ.

Если звезды – это действительно далекие солнца, как предполагал Бруно, то они должны находиться гораздо дальше Солнца, чтобы светить так тускло. Но насколько дальше? Это зависит от того, насколько ярки они на самом деле. Спустя 32 года после сочинения песенки немецкий математик и астроном Фридрих Бессель сделал открытие. Выставьте вверх большой палец на расстоянии вытянутой руки и несколько раз попеременно закройте левый и правый глаз. Палец будто перепрыгивает вправо и влево на определенный угол относительно далеких предметов. Теперь поднесите палец немного ближе к глазам, и вы заметите, что угловая величина «прыжка» выросла. Астрономы называют эту угловую величину *параллаксом*, и, очевидно, ее можно применить, чтобы определить расстояние до пальца. На практике вам не требуется заниматься математическими вычислениями, поскольку мозг выполняет их без усилий, и вы этого даже не замечаете. Тот факт, что два глаза фиксируют разные углы для объектов на разном расстоянии, существенен для понимания системы восприятия дальности в мозге, наделяющей нас трехмерным зрением.

Если бы наши глаза были расставлены шире, мы лучше воспринимали бы глубину на больших расстояниях. В астрономии можно применить тот же метод параллакса, притворяясь, будто мы гиганты с глазами, разнесенными на 300 млрд м, что соответствует диаметру

земной орбиты вокруг Солнца. Это можно сделать, сравнивая телескопические фотографии с шестимесячным интервалом, за который Земля перемещается на противоположную сторону своей орбиты. Бессель заметил, что положения звезд, за исключением одной, на снимках кажутся одинаковыми. Это звезда 61 Лебеда. Она, в отличие от других, смещалась на небольшой угол, показывая тем самым, что расстояние до нее почти в 1 млн раз больше, чем до Солнца, – это так далеко, что звездному свету требуется 11 лет, чтобы достичь нас, тогда как солнечный свет доходит к нам за 8 минут.

Вскоре были измерены параллаксы других звезд, так что стали известны расстояния до многих из них. Если вы ночью проследите за удаляющимся автомобилем, яркость его габаритных огней будет убывать обратно пропорционально квадрату расстояния до него (вдвое дальше – вчетверо слабее). Теперь, когда Бессель знал расстояние до звезды 61 Лебеда, он воспользовался законом обратных квадратов для вычисления ее светимости. Полученный результат оказался сопоставим со светимостью Солнца, что с запозданием подтвердило правоту Джордано Бруно.

Почти одновременно, в 1814 году, немецкий оптик Йозеф фон Фраунгофер изобрел *спектроскоп*, позволивший раскладывать белый свет на цвета и измерять их. Фраунгофер открыл в радуге загадочные темные линии (*рис. 2.5*) и выяснил, что их точные положения в цветовом спектре зависят от того, из чего сделан источник света, то есть они оказались своего рода спектральными отпечатками пальцев. В последующие десятилетия были измерены и занесены в каталоги спектры многих распространенных веществ. С помощью этой информации можно показать замечательный фокус на вечеринке и впечатлить друзей, определяя, что светится в их фонариках, лишь анализируя испускаемый ими свет и даже не подходя близко. Спектр солнечного света неожиданно показал, что Солнце, пылающий шар в небесах, содержит водород и некоторые другие элементы, хорошо известные на Земле. Более того, когда собранный телескопом звездный свет изучили с помощью спектроскопа, оказалось, что звезды в первом приближении состоят из той же смеси газов, что и Солнце. Это закрепило победу Бруно: звезды – это далекие солнца, сходные как по выделяемой энергии, так и по составу. Так за считанные десятилетия звезды превратились из непостижимых белых точек в гигантские шары горячего газа, химический состав которых можно определить.



Рис. 2.5. Радуга, сфотографированная моим сыном Александром, ведет не к горшку с золотом, а к золотой жиле информации об устройстве атомов и звезд. В гл. 7 мы узнаем, что соотношение интенсивности различных цветов объясняется тем, что свет состоит из частиц (фотонов), а положение и ширину многих темных линий можно вычислить с помощью квантово-механического уравнения Шредингера.

Спектр – это настоящая золотая жила астрономической информации, и всякий раз, когда вам приходит в голову, что вы выжали из него все, что можно, оказывается, что в нем закодировано что-нибудь еще. Спектр позволяет измерить температуру объекта, не прикасаясь к нему термометром. Вы и без прикосновения знаете, что раскаленный добела кусок металла горячее раскаленного докрасна, и, аналогично, беловатые звезды горячее красноватых. С помощью спектроскопа температуру можно определять очень точно. В качестве неожиданного бонуса теперь эта информация позволяет определить размеры звезды, подобно тому, как отгадывание одного слова в кроссворде помогает отгадать другое. Температура показывает, сколько света испускает каждый квадратный метр звездной поверхности. Поскольку можно вычислить общее количество испускаемого звездой света (по расстоянию до нее и видимому блеску), теперь можно определить и площадь поверхности звезды в квадратных метрах и узнать, насколько она велика.

Спектр звезды также содержит скрытые подсказки о ее движении, заключающиеся в небольших сдвигах частоты (цвета) излучения за счет так называемого эффекта Доплера – того самого, который превращает сигнал проезжающего мимо автомобиля в характерное «вжи-и-и-и-у-у-у...»: частота выше, когда автомобиль приближается к вам, а затем становится ниже, когда он начинает удаляться. В отличие от Солнца, большинство звезд состоит в устойчивых парных отношениях, кружась друг вокруг друга по постоянной орбите. Часто это кружение можно заметить благодаря эффекту Доплера, который заставляет спектральные линии звезд двигаться взад и вперед при каждом обороте. Величина этого смещения показывает скорость движения, а наблюдая за двумя звездами, можно иногда измерить расстояние между ними. В совокупности эта информация позволяет показать еще один замечательный фокус: мы можем взвешивать звезды, не помещая их на весы, а применяя ньютоновы законы движения и тяготения для вычисления того, насколько массивными должны быть звезды, чтобы двигаться по наблюдаемым орбитам. В некоторых случаях доплеровские смещения позволяют обнаружить планеты, обращающиеся вокруг звезды. Если планета проходит на фоне звезды, небольшое уменьшение звездного блеска позволяет определить размер планеты, а небольшое изменение в спектральных линиях показывает, есть ли у планеты атмосфера и из чего она состоит. Спектры – это благодатный дар природы. Определение ширины спектральных линий у звезд заданной температуры позволяет измерить газовое давление. А по тому, как спектральные линии расщепляются на две или более линий, можно измерить напряженность магнитного поля на поверхности звезды.

Подведем итоги. Вся имеющаяся у нас информация о звездах получена от доходящего до Земли слабого света, однако вдумчивая детективная работа позволила нам извлечь из него сведения о расстоянии до звезд, их размерах, массе, составе, температуре, давлении, магнетизме и о наличии у них планетных систем. То, что человеческий разум смог узнать все это из, казалось бы, непостижимых белых точек, – это триумф, который, я думаю, заставил бы гордиться собой даже Шерлока Холмса и Эркюля Пуаро!

Расстояние до галактик

Моя бабушка Сигне умерла в возрасте 102 лет. Я некоторое время раздумывал о ее жизни, и меня поразило, что она выросла в другом мире. Когда она пошла в колледж, известная нам Вселенная представляла собой лишь Солнечную систему и облако звезд вокруг нее. Она и ее друзья, вероятно, думали об этих звездах как о невообразимо далеких объектах: свет от ближайших из них идет к нам несколько лет, а от самых далеких – тысячи лет. Все это по современным меркам может считаться нашим уютным космическим двориком.

Если в ее колледже были астрономы, они могли рассуждать о *туманностях* – размытых облакоподобных объектах в ночном небе, среди которых попадались красивые спираль-

ные формы, вроде изображений на знаменитом полотне Ван Гога «Звездная ночь». Что это за объекты? Многие астрономы считали их скучными межзвездными газовыми облаками, но некоторые придерживались более радикальных взглядов – они полагали, что это «островные вселенные», которые сегодня мы называем *галактиками* – огромные группы звезд, находящиеся столь далеко, что они не видны по отдельности в телескоп и поэтому кажутся туманной дымкой. Чтобы разрешить этот спор, астрономам требовалось измерить расстояние до некоторых туманностей. Но как это сделать?

Метод параллакса, который работал для ближайших звезд, не годился для туманностей: они настолько далеко, что их параллактические углы слишком малы для измерения. Как еще можно измерить большие расстояния? Если посмотреть в телескоп на далекую лампочку, можно заметить, что на ней напечатано «100 ватт», и это все, что вам нужно: просто воспользуйтесь законом обратных квадратов и вычислите, как далеко она должна находиться, чтобы иметь наблюдаемую яркость. Астрономы называют такие полезные объекты известной светимости *стандартными свечами*. Применяя вышеупомянутый детективный метод, астрономы с сожалением обнаружили, что звезды вовсе не стандартизированы: некоторые светят в миллион раз ярче Солнца, а другие в тысячу раз слабее. Однако если вы сможете, наблюдая звезду, увидеть, что на ней написано « 4×10^{26} ватт» (корректная маркировка для нашего Солнца), у вас появится стандартная свеча и возможность вычислить расстояние до нее точно так же, как до лампочки. К счастью, природа снабдила нас особым типом полезных в этом отношении звезд – их называют *цефеидами*. Это переменные звезды, светимость которых колеблется во времени из-за того, что они меняются в размерах. В 1912 году гарвардский астроном Генриетта Соун Ливитт обнаружила, что темп их пульсаций может служить ваттметром: чем больше дней проходит между двумя последовательными пульсациями, тем больше излучается ватт световой энергии.

У цефеид есть также то преимущество, что, будучи достаточно яркими, они видны на огромных расстояниях (некоторые из них светят в 100 тыс. раз ярче Солнца). Американский астроном Эдвин Хаббл открыл несколько таких звезд в Туманности Андромеды – диффузном пятнышке размером с Луну, которое можно увидеть невооруженным глазом, если забраться подальше от городских огней. Используя калифорнийский телескоп Хукера (его 2,5-метровое зеркало было тогда крупнейшим в мире), он измерил периоды их пульсации, рассчитал с помощью формулы Ливитт, какой они обладают светимостью, сравнил с их видимым блеском и вычислил расстояния до них. Когда он рассказал о своих результатах на конференции в 1925 году, у многих отвисли челюсти: он доказал, что Туманность Андромеды – это галактика примерно в 1 млн световых лет от нас, в тысячу раз дальше самых далеких звезд, которые моя бабушка видела на ночном небе! Теперь мы знаем, что Туманность Андромеды находится еще дальше – примерно в 3 млн световых лет, так что Хаббл невольно продолжил традицию ошибочной недооценки расстояний, идущую от Аристарха Самосского и Коперника.

Хаббл и другие астрономы продолжали открывать все более далекие галактики. Они раздвинули наши горизонты с миллионов до миллиардов световых лет, а мы в гл. 5 раздвинем их до триллионов световых лет и даже дальше.

Что такое пространство?

Так тянется ли космос бесконечно? К вопросу можно подойти двояко: путем наблюдений и теоретически. Пока мы следовали первому подходу, рассматривая, как хитроумные измерения открывали все более далекие области космоса без видимых признаков конца. Однако и теоретики достигли значительного прогресса. Прежде всего, как может пространство *не* тянуться бесконечно? Я объяснил детям, что было бы странно вдруг встретить знак,

как на рис. 2.6, предупреждающий о достижении конца космоса. Я размышлял об этом, когда сам был ребенком: а что за этим знаком? Мне казалось, что беспокоиться о достижении конца космоса столь же глупо, как древним мореплавателям бояться упасть с края Земли. Так что я попросту заключил, что пространство бесконечно и тянется вечно. Еще Евклид пришел к выводу, что геометрия является частью математики и что бесконечное трехмерное пространство можно описать столь же строго, как и другие математические структуры вроде числовых множеств. Древнегреческий ученый разработал красивую математическую теорию бесконечного трехмерного пространства, а также его геометрических свойств, и люди долго считали ее единственным логически возможным способом существования нашего физического пространства.

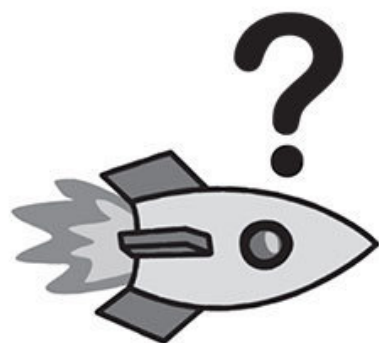


Рис. 2.6. Трудно представить себе, что пространство может быть конечным. Если оно где-то заканчивается, то что находится дальше, за его краем?

Однако в середине XIX века математики Карл Фридрих Гаусс, Янош Бойяи и Николай Лобачевский независимо друг от друга открыли, что существуют и другие логические возможности для однородного трехмерного пространства. Бойяи в восторге писал отцу: «Из ничего я создал странный новый мир». Новые пространства подчиняются новым правилам: так, они более не обязаны быть бесконечными, каковым представлялось пространство Евклиду, а углы треугольника не обязательно дают в сумме 180° . Представьте себе треугольники на двумерных поверхностях трехмерных фигур. Сумма трех их углов больше 180° на сфере (рис. 2.7, слева), 180° на цилиндре (в середине) и меньше 180° на гиперboloиде (справа). Более того, двумерная поверхность сферы конечна, хотя на ней нет ничего похожего на край.

Этот пример показывает, что правила евклидовой геометрии могут нарушаться на поверхности, если она не плоская. Однако идеи Гаусса и других математиков были еще радикальнее: пространство может быть искривленным само по себе, даже если оно не является поверхностью чего-либо! Предположим, вы – слепой муравей, желающий знать, по какой из фигур на рис. 2.7 вы ползаете. Вы чувствуете себя так, будто живете в двумерном пространстве, поскольку не можете выйти в третье измерение (оторваться от поверхности), но это не препятствует вашей детективной работе: вы по-прежнему можете определить прямую линию (как кратчайший путь между двумя точками), а значит, и суммировать величины трех углов треугольника. Например, если вы получите 270° , то воскликнете: «Это больше 180° , значит, я на сфере!» Чтобы еще больше впечатлить друзей-муравьев, вы даже можете рас-

считать, как далеко нужно пройти по прямой, чтобы вернуться в исходную точку. Иными словами, все обычные для геометрии объекты – точки, прямые, углы, кривые и т. д. – можно строго определить, оставаясь в двумерном пространстве безо всяких ссылок на третье измерение. Это означает, что математики могут строго определить кривизну двумерной поверхности, даже если третьего измерения не существует: двумерное пространство может быть искривленным само по себе, не являясь поверхностью чего-либо.

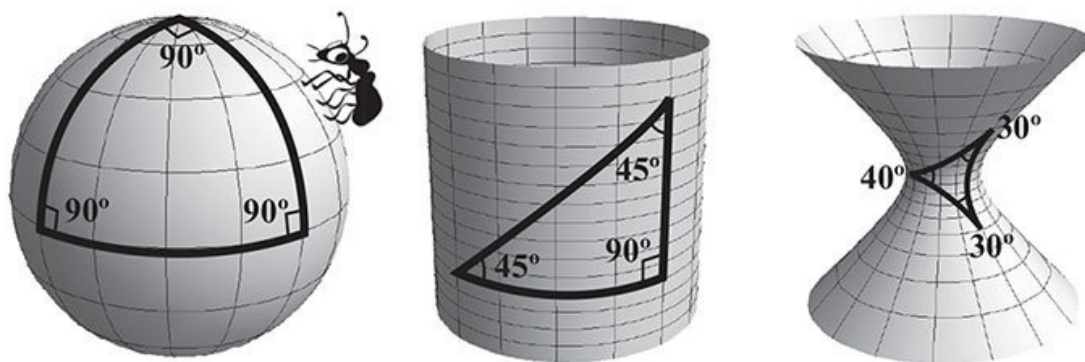


Рис. 2.7. Если нарисовать треугольники на этих поверхностях, сумма их углов окажется больше 180° (слева), 180° (посередине) и меньше 180° (справа). Эйнштейн считал, что в нашем трехмерном физическом пространстве для треугольников возможны все эти варианты.

Вероятно, математическое открытие неевклидовых пространств полтора столетия назад казалось большинству людей не более чем абстракцией, не имеющей практического отношения к нашему физическому миру. Затем Эйнштейн выдвинул общую теорию относительности, которая, по сути, утверждала, что мы – муравьи. Теория Эйнштейна позволяет нашему трехмерному пространству быть искривленным без всякого скрытого четвертого измерения, в котором оно искривлялось бы. Так что на вопрос, в пространстве какого типа мы живем, нельзя ответить, исходя из одной логики, как надеялись сторонники Евклида. Решить эту задачу можно, лишь выполнив измерения, например построив в космосе огромный треугольник (скажем, из лучей света) и проверив, равна ли сумма его углов 180° . В гл. 4 я расскажу, как мы с коллегами развлекались, проделывая это. Ответ оказался близок к 180° для треугольников размером с Вселенную, но значительно превосходящим 180° , если большую часть треугольника занимает нейтронная звезда или черная дыра. Так что форма нашего физического пространства сложнее, чем в трех примерах на рис. 2.7.

Вернемся к детскому вопросу о конечности пространства. Мы видим, что теория Эйнштейна позволяет пространству быть конечным далеко не таким глупым способом, как на рис. 2.6: оно может быть конечным за счет искривленности. Например, если наше трехмерное пространство искривлено подобно поверхности четырехмерной гиперсферы, то, будь у нас возможность достаточно далеко уйти по прямой линии, мы в конце концов вернулись бы домой с противоположной стороны. Мы не упали бы с края трехмерного пространства, поскольку у него нет края, как нет края и у сферы, по которой ползет муравей (рис. 2.7).

В действительности, Эйнштейн позволяет нашему трехмерному пространству быть конечным, даже если оно не искривлено. Цилиндр на рис. 2.7 в математическом смысле плоский: если нарисовать треугольник на бумажном цилиндре, сумма его углов составит 180° . Чтобы убедиться в этом, вырежьте из цилиндра треугольник: он ровно ляжет на стол. Со сферой или гиперboloидом это не получится сделать без складок или разрывов бумаги. Но хотя цилиндр на рис. 2.7 кажется плоским для муравья, ползущего по небольшому

участку, цилиндр замкнут на себя: муравей может вернуться домой, обойдя его вокруг по прямой линии. Математики называют подобные характеристики связности пространства его *топологией*. Они дали определение плоскому пространству, замкнутому на себя по всем измерениям, и назвали такое пространство *тором*. Двумерный тор имеет такую же топологию поверхности, как у баранки. Эйнштейн допускает, что физическое пространство, в котором мы живем, представляет собой трехмерный тор и является в таком случае плоским и конечным. Или бесконечным.

Обе эти возможности прекрасно согласуются с лучшей имеющейся у нас теорией о пространстве – общей теорией относительности Эйнштейна. Но какое оно? В гл. 4 и 5 мы найдем свидетельство того, что пространство все-таки бесконечно. Но поиск ответа на детский вопрос приводит нас к другой проблеме: чем в действительности *является* пространство? Хотя все мы сначала думаем о пространстве как о чем-то физическом, образующем ткань нашего материального мира, теперь мы видим, что математики говорят о пространствах как о *математических* сущностях. Для них изучение пространства – то же самое, что изучение геометрии, а геометрия – просто часть математики. Вполне можно считать, что пространство – это математический объект в том смысле, что все внутренне присущие ему свойства – такие как размерность, кривизна и топология – математические. Мы рассмотрим этот аргумент в гл. 10.

В этой главе мы, изучив свое положение в пространстве, обнаружили, что Вселенная гораздо больше, чем казалось нашим предкам. Чтобы по-настоящему понять, что происходит на огромных расстояниях, можно вести наблюдения с помощью телескопов. Однако определить свое место в пространстве недостаточно. Нам необходимо знать и свое место во времени.

Резюме

- Раз за разом люди убеждались, что физическая реальность гораздо больше, чем мы представляли, что известный нам мир входит в состав куда более грандиозных структур: нашей планеты, Солнечной системы, Галактики, сверхскопления галактик и т. д.

- Общая теория относительности (ОТО) Эйнштейна допускает, что пространство может тянуться бесконечно.

- ОТО допускает альтернативные варианты: пространство конечно, но не имеет границы, так что если вы будете двигаться достаточно долго и быстро, то сможете вернуться с противоположной стороны.

- Ткань нашего физического мира, пространство само по себе может быть чисто математическим объектом в том смысле, что все имманентно присущие ему свойства (размерность, кривизна и топология) – математические.

Глава 3. Наше место во времени

Подлинное знание – это знание пределов своего неведения.
Конфуций

Высшая форма невежества – отвергать что-то, о чем вы ничего не знаете.
Уэйн Дайер

Откуда взялась Солнечная система? Однажды в школе, во втором классе, мой сын Филипп вступил в полемику по этому вопросу. Разговор был примерно таким:

– Я думаю, Солнечную систему создал Бог, – сказала одноклассница.

– Мой папа говорит, что она возникла из гигантского молекулярного облака, – перебил Филипп.

– А откуда взялось гигантское молекулярное облако? – спросил другой мальчик.

– Может быть, Бог создал гигантское молекулярное облако, а после гигантское молекулярное облако породило Солнечную систему, – сказала девочка.

Бьюсь об заклад: с тех пор, как на Земле появились люди, они вглядываются в ночное небо и удивляются, откуда все взялось. Как и в прошлом, есть вещи, которые мы знаем, и вещи, которых мы не знаем. Нам многое известно о том, что существует здесь и сейчас, а также мы довольно много знаем о событиях, близко отстоящих в пространстве и времени – скажем, что находится у нас за спиной или что мы ели на завтрак. Двигаясь вдаль и в прошлое, мы в конце концов сталкиваемся с пределами своего знания. В предыдущей главе мы видели, как человеческая изобретательность постепенно отодвигала этот предел все дальше в пространстве. Теперь рассмотрим, как люди отодвигали эту границу во времени.

Почему Луна не падает на Землю? Ответ на этот вопрос станет для нас отправной точкой.

Как появилась Солнечная система?

Всего четыре столетия назад поиски ответа на этот вопрос казались безнадежными. Было открыто местоположение важнейших объектов, видимых невооруженным глазом: Солнца, Луны, Меркурия, Венеры, Марса, Сатурна и Юпитера. Работа Николая Коперника, Тихо Браге, Иоганна Кеплера и других астрономов также позволила разобраться в движении этих объектов. Оказалось, что Солнечная система напоминает отлаженный часовой механизм. Не было признаков того, что он в некоторый момент был запущен и однажды остановится. Но действительно ли он вечный? Если нет, откуда он появился? Насчет этого люди оставались в неведении.

В искусственных часовых механизмах, создававшихся в то время на продажу, законы, управляющие движением зубчатых колес, пружин и других деталей, были вполне ясны и позволяли рассчитать их поведение в будущем и в прошлом. Можно было предсказать, что часы продолжат тикать с постоянной частотой, а также что они в конце концов остановятся из-за трения, если их не завести. Осмотрев их, можно было, скажем, узнать, что их заводили в прошлом месяце. Существуют ли аналогичные точные законы, описывающие и объясняющие движение небесных тел, со своими подобными трению эффектами, которые постепенно изменяют Солнечную систему и могут указать, когда и как она образовалась?

Казалось, что ответ на этот вопрос – твердое «нет». Здесь, на Земле, мы добились прочного понимания того, как движутся в пространстве предметы – от брошенного камня до

валуна, запущенного катапультий, или пушечного ядра. Однако законы, управляющие небесными телами, казались отличными от законов, управляющих объектами здесь, на Земле. Если Луна подобна гигантскому камню, то почему она не падает, как обычные камни? Классический ответ состоял в том, что Луна – это небесное тело, а небесные тела подчиняются иным законам. Скажем, она не подвержена земному притяжению и поэтому не падает. Некоторые шли дальше и предлагали следующее объяснение: небесные объекты ведут себя так, потому что они идеальны. Они имеют идеальную сферическую форму, поскольку именно сфера – идеальная фигура. Они движутся по круговым орбитам, поскольку окружность тоже идеальна. А падение стало бы столь неидеальным событием, насколько это вообще возможно. На Земле несовершенство повсеместно: трение замедляет движение, огонь сжигает, люди – смертны. В небесах, напротив, движение кажется не подверженным трению, Солнце не прогорает, и вообще нет никаких признаков конца.

Но эта безупречная репутация небес не выдержала испытания. Анализируя измерения Тихо Браге, Иоганн Кеплер установил, что планеты движутся не по окружностям, а по эллипсам, которые представляют собой вытянутые, а значит, не столь совершенные модификации окружностей. В свои телескопы Галилей увидел, что совершенство Солнца нарушается безобразными черными пятнами, а Луна – это не гладкая сфера, она покрыта горами и гигантскими кратерами. Почему же она не падает?

В конце концов на этот вопрос ответил Исаак Ньютон. Он выдвинул гипотезу насколько простую, настолько и радикальную: небесные тела подчиняются тем же законам, что и объекты на Земле. Да, конечно, Луна не падает, как брошенный камень, – но что если обычный камень тоже можно бросить так, чтобы он не падал? Ньютон знал, что камни падают наземь, а не улетают вверх, к Солнцу, и связал это с большей удаленностью Солнца и с тем, что гравитационное притяжение объекта ослабевает с расстоянием. Так можно ли метнуть камень вверх так, чтобы он ускользнул от земного притяжения прежде, чем тому хватит времени, чтобы поменять направление его движения на обратное? Сам Ньютон не мог этого сделать, но он понял, что гипотетическая суперпушка справилась бы с этим, придав камню достаточную скорость. Это значит, что судьба запущенного по горизонтали ядра зависит от его скорости (*рис. 3.1*): оно врежется в землю, только если его скорость меньше некоей магической величины. Если стрелять ядрами, придавая им все большую скорость, они, прежде чем упасть, будут пролетать все дальше, пока не достигнут скорости, при которой они будут сохранять высоту над Землей постоянной, не падая, а обращаясь вокруг Земли по окружности, – как Луна! Зная силу притяжения у земной поверхности из экспериментов с падающими камнями, яблоками и т. д., Ньютон смог вычислить магическую скорость: она составила колоссальные 7,9 км/с. Предположив, что Луна подчиняется тем же законам, что и пушечное ядро, ученый рассчитал скорость, необходимую ей, чтобы удерживаться на круговой орбите. Единственное, чего не хватало Ньютону – правила, позволяющего понять, насколько слабее земное притяжение в окрестностях Луны. Более того, поскольку Луна затрачивает один месяц на прохождение окружности, длину которой вычислил Аристарх, Ньютон уже знал ее скорость: около 1 км/с, как у пули из автомата М16. И тут он сделал замечательное открытие: если предположить, что сила гравитации ослабевает обратно пропорционально квадрату расстояния от центра Земли, то скорость, которая позволяет Луне двигаться по круговой орбите, точно совпадает с ее измеренной скоростью! Ньютон открыл закон гравитации и обнаружил, что он универсален, то есть применим не только здесь, на Земле, но и в небесах.

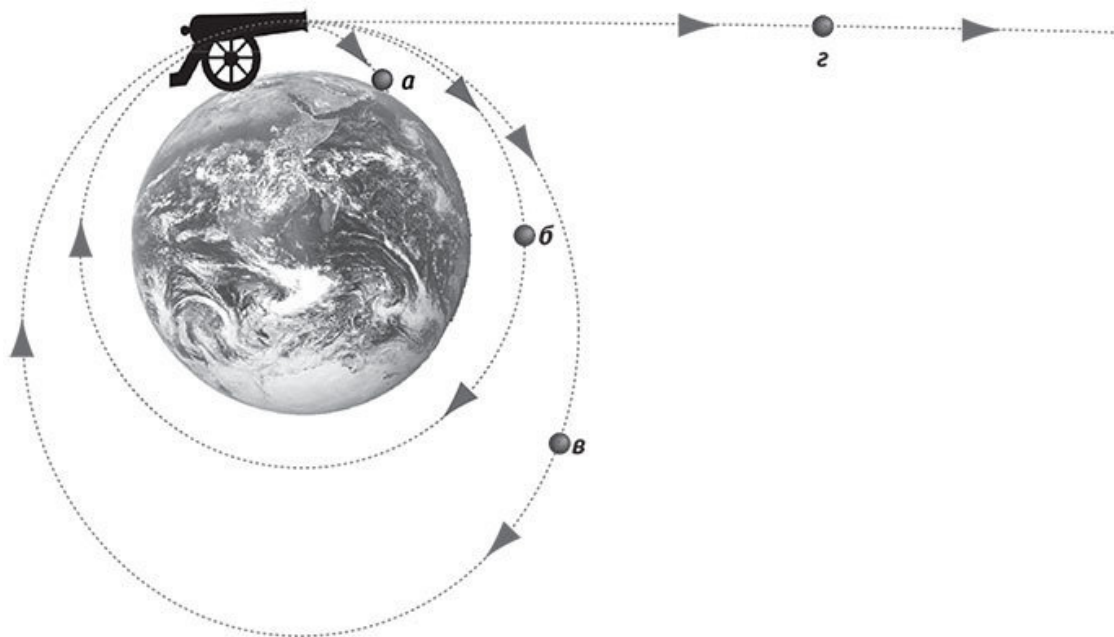


Рис. 3.1. Пушечное ядро (z), выпущенное со скоростью более 11,2 км/с, улетает от Земли и никогда не возвращается (если пренебречь сопротивлением воздуха). При чуть меньшей скорости ($в$) оно выходит на эллиптическую орбиту вокруг Земли. Если выстрелить горизонтально со скоростью 7,9 км/с ($б$), орбита ядра будет идеальной окружностью, а если стрелять с меньшей скоростью ($а$), оно в конце концов упадет на Землю.

Внезапно все элементы головоломки встали на свои места. Ньютон, применяя закон тяготения вкупе с математическими законами движения, которые он сформулировал ранее, смог объяснить движение не только Луны, но и планет вокруг Солнца. Он даже сумел математически доказать, что в общем случае орбиты являются эллипсами, а не окружностями. Кеплер считал это обстоятельство необъяснимым.

Как и большинство великих прорывов в физике, законы Ньютона дали ответ на гораздо большее число вопросов, чем те, которые привели к их открытию. Например, они объяснили приливы: гравитационное притяжение Луны и Солнца сильнее действует на морские воды, которые ближе к ним, заставляя воду плескаться по мере вращения Земли. Законы Ньютона также показывают, что общее количество энергии сохраняется, так что если где-нибудь появилась энергия, она не могла появиться из ниоткуда, а должна была поступить откуда-нибудь. Приливы растрачивают массу энергии (часть ее можно собрать с помощью приливных электростанций), но откуда берется вся эта энергия? Большой частью из вращения Земли, которое замедляется трением: если вы иногда чувствуете, что вам не хватает времени в сутках, просто подождите 200 млн лет, и тогда день удлинится до 25 часов!

Следовательно, трение воздействует даже на движение планет, и это отменяет идею вечности Солнечной системы. В прошлом Земля должна была вращаться быстрее, и можно рассчитать, что система Земля – Луна не старше 4–5 млрд лет: в противном случае Земля должна была бы в прошлом вращаться настолько быстро, что центробежные силы разорвали бы ее на части. Вот, наконец, и первый намек на происхождение Солнечной системы: у нас есть оценка времени совершения преступления!

Ньютоновский прорыв подтолкнул человеческий ум к покорению космоса: он показал, что мы можем сначала открывать физические законы, производя эксперименты здесь, на Земле, а затем экстраполировать эти законы для объяснения того, что происходит в небесах. Хотя Ньютон сначала применил этот подход только к движению и гравитации, идея рас-

пространялась со скоростью степного пожара, и со временем ее стали применять к свету, газам, жидкостям, твердым телам, электричеству и магнетизму. Люди экстраполировали свои открытия не только на макромир, на космос, но и на микромир, обнаруживая, что многие свойства газов и других веществ можно объяснить, применяя к атомам, из которых те состоят, ньютоновские законы движения. Научная революция началась. Она приблизила и Промышленную революцию, и информационную эру. Прогресс, в свою очередь, позволил построить мощные компьютеры, которые помогают науке развиваться, решая физические уравнения и находя ответы на многие интересные вопросы, прежде ставившие нас в тупик.

Законы физики можно применять по-разному. Часто мы хотим применять имеющиеся знания для предсказания будущего, как при прогнозировании погоды. Однако уравнения точно так же можно решать и в обратную сторону, применяя современные знания, чтобы пролить свет на прошлое, как при реконструкции затмения, которое Колумб наблюдал на Ямайке. Третий способ состоит в том, чтобы вообразить гипотетическую ситуацию и применить физические уравнения для расчета того, как она будет изменяться с течением времени, – так, например, при моделировании запуска ракеты к Марсу определяется, достигнет ли она намеченной цели. Этот третий подход дал новые ключи к загадке происхождения Солнечной системы.

Представьте себе огромное газовое облако в открытом космосе: что с ним произойдет с течением времени? Законы физики предсказывают схватку между двумя силами, которые определяют его судьбу: гравитация будет пытаться сжать его, а давление будет стремиться его рассеять. Если гравитация начинает брать верх, сжимая облако, то оно будет нагреваться (мой велосипедный насос по той же причине при использовании нагревается), что, в свою очередь, повысит давление, препятствующее дальнейшему нарастанию гравитации. Облако может долгое время оставаться стабильным – когда гравитация и давление уравновешивают друг друга, – но это непростое перемирие в конце концов нарушается. Нагретое газовое облако светится, излучая часть тепловой энергии, поддерживающей в нем давление. Это позволяет гравитации сжать облако сильнее – и т. д. Запрограммировав в компьютерах законы гравитации и физики газов, можно во всех деталях смоделировать эту гипотетическую битву. В конце концов центральная часть облака станет настолько горячей и плотной, что превратится в термоядерный реактор: атомы водорода будут сливаться в атомы гелия, поскольку мощная гравитация не позволит им разлететься. Так рождается звезда. Внешние части образующейся звезды уже достаточно горячи, чтобы ярко светиться, и их излучение начинает выдувать прочь остатки газового облака, делая новорожденную звезду видимой для наших телескопов.

Перемотка. Повторное воспроизведение. В процессе постепенного сжатия газового облака любое, даже самое слабое его вращение ускоряется, как это происходит с фигуристкой, которая начинает крутиться быстрее, когда прижимает руки к телу. Центробежные силы, вызванные ускоряющимся вращением, мешают гравитации сжать газовое облако в точку. Вместо этого она придает ему форму, напоминающую пиццу – так пекарь по соседству с моей начальной школой раскручивал тесто для пиццы, чтобы придать ему форму диска. Основные ингредиенты всех космических «пицц» – водород и гелий, но если среди них также находится место более тяжелым атомам вроде углерода, кислорода и кремния, то пока в центре газовой «пиццы» формируется звезда, ее внешние части могут скомкаться в несколько холодных объектов – *планет*. Они станут видны, как только новорожденная звезда сдует остатки «теста». Поскольку все вращение (*угловой момент*) связано с вращением исходного облака, все планеты Солнечной системы обращаются вокруг Солнца в одном направлении (против часовой стрелки, если смотреть со стороны Северного полюса), и в том же направлении примерно за месяц поворачивается вокруг своей оси само Солнце.

Это объяснение происхождения Солнечной системы поддерживается сегодня не только теоретическими расчетами, но и телескопическими наблюдениями множества других планетных систем, «пойманных с поличным» на различных стадиях процесса рождения. Наша Галактика содержит огромное число гигантских молекулярных облаков – газовых облаков, содержащих молекулы, помогающих им рассеивать тепло, охлаждаться и сжиматься. В некоторых случаях мы наблюдаем совсем юные звезды, окруженные пиццеобразными газовыми протопланетными дисками, еще почти нетронутыми. Недавнее открытие множества планетных систем вокруг других звезд принесло астрономам массу новых данных, позволяющих улучшить понимание происхождения Солнечной системы.

Если именно такой процесс сопровождал рождение Солнечной системы, то *когда* именно он имел место? Еще в начале прошлого столетия было широко распространено мнение, что Солнце образовалась всего 20 млн лет назад, поскольку за большее время потеря энергии в форме излучения привела бы к гравитационному сжатию Солнца до гораздо меньших размеров, чем мы наблюдаем. Аналогично было подсчитано, что если подождать значительно дольше, рассеялась бы и большая часть внутреннего тепла Земли, ответственного за вулканические извержения и геотермальные источники.

Источник солнечного тепла оставался загадкой до 30-х годов, когда ученые открыли термоядерные реакции. Но еще прежде того, благодаря открытию в 1896 году радиоактивности, были опровергнуты бытовавшие представления о возрасте Земли. Появился замечательный новый метод его уточнения. Атомы самого распространенного изотопа урана спонтанно распадаются на торий и другие, более легкие, элементы, с такой скоростью, что половина их разрушается за 4,47 млрд лет. Радиоактивный распад уже миллиарды лет производит достаточно тепла для поддержания земного ядра в разогретом состоянии, и это объясняет, каким образом наша планета остается теплой, несмотря на то, что она гораздо старше 20 млн лет. Мало того, измеряя долю распавшихся атомов урана в горных породах, можно определить возраст этих пород. Так было показано, что некоторые образцы, найденные на хребте Джек-Хиллс в Западной Австралии, имеют возраст более 4,404 млрд лет. Рекордный для метеоритов возраст составляет 4,56 млрд лет. Это подтверждает, что и наша планета, и остальная Солнечная система образовались около 4,5 млрд лет назад – в полном согласии с более грубыми оценками, основанными на приливном торможении.

Таким образом, применение законов физики дало людям качественный и количественный ответ на один из главных вопросов наших предков: *как и когда возникла Солнечная система?*

Как появились галактики?

Итак, мы отодвинули границу нашего знания на 4,5 млрд лет в прошлое. Тогда Солнечная система образовалась в результате гравитационного коллапса гигантского молекулярного облака. Но одноклассник моего сына Филиппа спрашивал: *откуда взялось это гигантское молекулярное облако?*

Образование Галактики

Вооруженные телескопами, карандашами и компьютерами астрономы нашли убедительный ответ и на эту загадку, хотя ряд важных пробелов еще предстоит восполнить. По сути, схватка гравитации и давления, в ходе которой сформировалась пиццеобразная Солнечная система, повторяется в гораздо большем масштабе: сжимается куда более крупная заполненная газом область совокупной массой в миллионы или даже триллионы масс Солнца. Такой коллапс не приводит к образованию увеличенной версии Солнечной системы с мегазвездой, окруженной мегапланетами. Вместо этого происходит фрагментация на

огромное число газовых облаков меньшего размера, из которых образуются отдельные планетные системы: так рождается галактика. Солнечная система – одна из сотен миллиардов в одной из этих пищеобразных галактик, которая называется Млечным Путем. Мы находимся примерно на полпути от его центра (рис. 2.2), вокруг которого совершаем оборот за пару сотен миллионов лет.

Иногда галактики сталкиваются друг с другом. Эти космические дорожно-транспортные происшествия не так страшны, как может показаться, поскольку звезды, как правило, проходят друг мимо друга. В итоге галактики сливаются, а большинство их звезд объединяется в новую, более крупную галактику. Как Млечный Путь, так и наша ближайшая крупная соседка, Туманность Андромеды, – пищеобразные галактики, которые называют спиральными из-за восхитительных рукавов (рис. 2.2). Когда сталкиваются две спиральные галактики, результат сначала кажется беспорядочным, а затем формируется округлая капля из звезд, называемая эллиптической галактикой. Такая судьба ждет и нас, поскольку через несколько миллиардов лет нам предстоит столкновение с Туманностью Андромеды. Неизвестно, будут ли наши потомки называть свой дом Млечномедой, но мы твердо знаем, что это будет эллиптическая галактика: телескопы позволили увидеть множество подобных столкновений на разных стадиях, и результаты этих наблюдений вполне согласуются с теоретическими предсказаниями.

Если галактики образовались за счет слияния более мелких галактик, насколько малы были те, первоначальные? Эти поиски были темой первого исследовательского проекта, который меня по-настоящему озадачил. Ключевой частью моих вычислений было определение того, как химические реакции в газе порождают молекулы, способные приводить к снижению давления за счет излучения тепловой энергии. Но каждый раз, когда мне казалось, что вычисления окончены, я обнаруживал, что применяемые мной формулы молекул содержат серьезную ошибку, делающую все расчеты неверными и заставляющие начать все сначала. Через четыре года после того, как научный руководитель Джо Силк впервые предложил мне этим заняться, я был настолько раздосадован, что подумывал заказать футболку с надписью «Я ненавижу молекулы» и изображением молекулы водорода, моего главного врага, перечеркнутой толстой красной линией, как на знаке «Курение запрещено». Но затем удача мне улыбнулась: перебравшись в Мюнхен на позицию постдока, я встретил студента по имени Том Абель, который только что завершил поистине энциклопедические расчеты всех молекулярных формул, которые мне требовались. Он присоединился к нашей команде в качестве соавтора, и 24 часа спустя дело было сделано. Мы предсказывали, что масса самых первых галактик составляла «всего» около 1 млн масс Солнца. Нам повезло: этот результат в основном согласуется с гораздо более сложными компьютерными моделями, которыми профессор Том занимается сейчас в Стэнфорде.

Возможно, наша Вселенная расширяется

Самое грандиозное шоу на Земле, в рамках которого поколения живых организмов рождаются, взаимодействуют и умирают, началось около 4,5 млрд лет назад. Кроме того, мы открыли, что это часть еще более грандиозного спектакля, в котором поколения галактик рождаются, взаимодействуют и умирают в космической «экосистеме». Так вот, не может ли быть в этой постановке третьего уровня, на котором могут рождаться и умирать целые вселенные? В частности, нет ли признаков того, что наша Вселенная имела начало во времени? Если да, как и когда это произошло?

Почему галактики не падают? С ответа на этот вопрос начинается наш следующий рывок, отодвигающий предел знания еще дальше в прошлое. Мы видели, что Луна не падает на Землю, потому что обращается вокруг нее с высокой скоростью. Вселенная во всех направлениях населена галактиками, и очевидно, что для них это объяснение не подходит.

Не все они обращаются вокруг нас. И если Вселенная вечна и в целом статична (то есть далекие галактики не движутся быстро), почему же они не упадут на нас, как случилось бы с Луной, если бы она вдруг остановилась?

Конечно, во времена Ньютона никто не знал о галактиках. Но если, подобно Джордано Бруно, представить себе бесконечную статическую Вселенную, однородно заполненную звездами, то должно иметься хотя бы примерное объяснение, позволяющее не волноваться, что они на нас упадут. Законы Ньютона утверждают, что к каждой звезде приложена большая (в действительности бесконечная) сила гравитации, действующая в равной мере во всех направлениях, и можно заключить, что эти противоположно направленные силы погасят друг друга, оставив все звезды в неподвижности.

В 1915 году это объяснение было опровергнуто новой теорией гравитации – общей теорией относительности⁷. Ее автор Альберт Эйнштейн понимал, что статическая бесконечная Вселенная, однородно заполненная материей, не укладывается в новые уравнения гравитации. И как же он поступил? Он, безусловно, усвоил главный урок Ньютона: надо смело экстраполировать свои уравнения и представить, какого рода Вселенная будет им удовлетворять, а затем выяснить, какие наблюдения позволяют проверить, действительно ли мы живем в такой Вселенной. По иронии судьбы, даже Эйнштейн, один из самых изобретательных ученых всех времен, чей принцип состоял в том, чтобы подвергать сомнению самые несомненные допущения и авторитеты, не решился усомниться в собственном авторитете и собственной уверенности в том, что мы живем в вечной, неизменной Вселенной. Вместо этого он совершил, как впоследствии сам признавался, свою величайшую ошибку: изменил уравнения, добавив дополнительный член, позволяющий Вселенной быть статической и вечной. Двойная ирония состоит в том, что сегодня этот дополнительный член, похоже, вновь появился в уравнениях в форме космической темной энергии, которую мы еще обсудим, но на этот раз он имеет иной смысл и не делает нашу Вселенную статической.

Человеком, которому, наконец, хватило смелости и способностей, чтобы довериться уравнениям Эйнштейна, оказался русский физик и математик Александр Фридман. Он решил их в самом общем случае для Вселенной, однородно заполненной материей, и обнаружил нечто шокирующее: большинство решений *не было* статическим, а изменялось во времени! Статическое решение Эйнштейна было не просто исключением из обычного поведения, но и являлось неустойчивым: почти статическая Вселенная не могла оставаться в таком состоянии длительное время. Если Ньютон показал, что естественное состояние Солнечной системы – пребывать в движении (Земля и Луна просто не могут вечно оставаться в неподвижности), то Фридман продемонстрировал, что естественное состояние нашей Вселенной – движение.

О каком именно движении шла речь? Фридман открыл, что самым естественным состоянием для Вселенной является *расширение* или *сжатие*. Если она расширяется, то все объекты внутри нее отдаляются друг от друга, как шоколадные крошки на поднимающемся кексе (рис. 3.2). В этом случае в прошлом все они должны были располагаться ближе друг к другу. На самом деле в простейшем фридмановском решении для расширяющейся Вселенной в прошлом есть определенный момент, когда все, что мы наблюдаем сегодня, находилось в одном и том же месте, создавая там бесконечную плотность. Иными словами, у нашей Вселенной есть начало, и ее рождение представляло собой взрыв чего-то бесконечно плотного. Большой взрыв.

⁷ Бесконечное однородное распределение звезд в пространстве является неустойчивым и в классической теории гравитации. Это, по-видимому, понимал еще Ньютон, а детально исследовал американский астроном Джеймс Джинс в 1902 году. – Прим. пер.

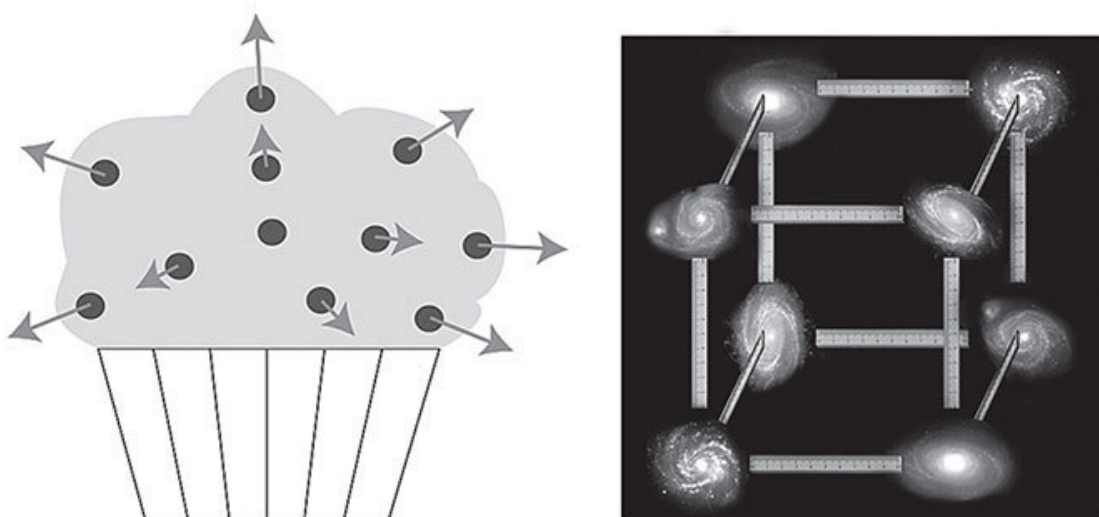


Рис. 3.2. Далекие галактики удаляются друг от друга, как шоколадные крошки на поднимающемся кексе (*слева*): с точки зрения любой из них, все остальные удаляются со скоростью, пропорциональной расстоянию до них. Но если считать, что пространство растягивается, как поверхность кекса, то не галактики движутся относительно пространства, а само пространство меняется так, что все расстояния равномерно увеличиваются (*справа*), как если бы мы переобозначили отметки на всех линейках, сделав из миллиметров сантиметры.

Реакцией на фридмановский Большой взрыв была оглушительная тишина. Хотя его статья была опубликована в одном из наиболее престижных физических журналов Германии и обсуждалась Эйнштейном и иными учеными, в итоге она была, по большому счету, проигнорирована и не оказала практически никакого влияния на господствующую картину мира того времени. Игнорирование великих озарений – давняя традиция в космологии (на самом деле, науки в целом): мы уже обсуждали гелиоцентризм Аристарха и далекие солнечные системы Бруно, а дальше в этой и в следующих главах мы встретим еще много таких примеров. В случае Фридмана, я думаю, причина отчасти была в том, что он опередил свое время. В 1922 году известная Вселенная, по сути, ограничивалась галактикой Млечный Путь (на самом деле, лишь небольшой ее частью, которую люди могли наблюдать), а она не расширяется, поскольку сотни миллиардов ее звезд удерживаются на орбитах гравитационным притяжением. Это ответ на девятый вопрос из списка в предыдущей главе: *расширяется ли Млечный Путь?* Фридмановское расширение относится лишь к таким большим масштабам, в которых можно игнорировать сгущение материи в галактики, а галактик – в скопления. На рис. 2.2 видно, что на больших расстояниях – около 100 млн световых лет – распределение галактик становится довольно однородным, что позволяет применять фридмановские решения для однородной Вселенной, а значит, галактики, разделенные таким большим расстоянием, должны удаляться друг от друга. Но сам факт *существования* других галактик был установлен Хабблом только в 1925 году, тремя годами позднее! Тут бы и настал звездный час Фридмана. К сожалению, его дни были сочтены: в тот самый год он умер от брюшного тифа в возрасте всего 37 лет.

Для меня Фридман – один из величайших, но, увы, недооцененных героев космологии. Пока я писал этот отрывок, я перечитал первоисточник, статью Фридмана 1922 года, которая заканчивается интригующим примером огромной, в 5 миллиардов триллионов масс Солнца, вселенной, для которой он рассчитал время жизни: около 10 млрд лет – того же порядка, что и общепризнанный сегодня возраст Вселенной. Фридман не объясняет, откуда он взял

это значение задолго до открытия галактик, но это, безусловно, достойное окончание выдающейся статьи выдающегося человека.

Вселенная расширяется

Через пять лет история повторилась: аспирант Массачусетского технологического института, бельгийский священник и астрофизик Жорж Леметр вновь опубликовал независимо переоткрытое им фридмановское решение для Большого взрыва. И вновь научное сообщество фактически проигнорировало его.

В конце концов идея Большого взрыва была воспринята не из-за новой теоретической работы, а из-за новых измерений. Когда Эдвин Хаббл убедился в существовании других галактик, следующим естественным его шагом стало изучение их распределения в пространстве и движения. Как правило, довольно легко измерить скорость, с которой объект приближается к вам или удаляется, поскольку это движение вызывает сдвиг линий в спектре. Красный свет имеет наименьшую частоту среди всех цветов радуги, и если галактика удаляется от нас, все ее спектральные линии будут испытывать *красное смещение*, то есть сдвигаться ближе к красному концу спектра, и чем выше ее скорость, тем сильнее будет это смещение. Если же галактика приближается, то ее цвета, напротив, будут испытывать *голубое смещение* к более высоким частотам.

Если бы галактики просто беспорядочно двигались в пространстве, то примерно половина из них имела бы красное смещение, а остальные – голубое. К удивлению Хаббла, почти все изученные им галактики имели красное смещение. Почему они разбегаются от нас? Они нас не любят? Мы что-то не то сказали? Вдобавок Хаббл открыл, что чем больше расстояние d , тем выше скорость v , с которой галактика удаляется от нас. Это выражается формулой $v = Hd$, которую сейчас называют законом Хаббла. Здесь H – постоянная Хаббла, которую сам Хаббл в эпохальной статье 1929 года скромно обозначил буквой K . Интересно, что Жорж Леметр в своей незамеченной статье 1927 года показал, как из решения, описывающего расширяющуюся Вселенную, вытекает закон Хаббла: если все в мире расширяется, удаляясь от всего прочего, то и далекие галактики разбегаются от нас согласно именно такому закону.

Если галактика радиально удаляется, значит, раньше она находилась очень близко. Давно ли это было? Глядя на автомобиль, удирающий после ограбления банка, можно, разделив пройденное расстояние на скорость, оценить, как давно он отъехал от банка. Если сделать это для удаляющихся галактик, закон Хаббла дает одинаковый ответ – $d/v = 1/H$ – для всех них. Современные измерения дают оценку этой величины $1/H \approx 14$ млрд лет, то есть открытие Хаббла свидетельствует, что около 14 млрд лет назад имело место нечто весьма впечатляющее – огромное количество материи было сжато до очень высокой плотности. Чтобы получить более точный ответ, нужно принять во внимание ускорение (замедление, равномерное движение) автомобиля (Вселенной) с момента оставления места преступления. Мы, делая сейчас расчеты с применением уравнения Фридмана и данных современных измерений, обнаруживаем, что требуется очень незначительная, на несколько процентов, корректировка: после Большого взрыва наша Вселенная примерно половину времени замедлялась, а остальное время ускорялась, так что соответствующие поправки примерно компенсируют друг друга.

Что означает расширение Вселенной?

После того как были опубликованы измерения Хаббла, они убедили даже Эйнштейна: наша Вселенная официально стала расширяющейся. Но что означает *расширение* Вселенной? Здесь мы подходим еще к четырем вопросам, сформулированным в начале гл. 2.

Вопрос первый: *действительно ли галактики удаляются от нас – или это пространство расширяется?* Весьма удобно, что теория гравитации (общая теория относительности)

Эйнштейна считает эти две точки зрения эквивалентными и в равной мере правильными (рис. 3.2), так что думайте об этом так, как вам кажется более естественным⁸.

Согласно первой точке зрения, пространство не меняется, а галактики движутся сквозь него, как шоколадные крошки на поднимающейся сдобной булке под действием добавленного в тесто разрыхлителя. Все галактики (шоколадные крошки) удаляются друг от друга, и чем больше расстояние между ними – тем быстрее. В частности, если вы встанете на конкретную крошку (галактику), вы увидите, что движение всех остальных относительно нее подчиняется закону Хаббла: все они удаляются от вас радиально, и с увеличением расстояния вдвое их скорость также удваивается. Примечательно, что все выглядит совершенно одинаково независимо от того, с какой шоколадной крошки (галактики) вести наблюдение, так как если у распределения галактик нет границы, то расширение не имеет центра – оно кажется одинаковым отовсюду.

Согласно второй точке зрения, пространство подобно тесту сдобной булки: оно расширяется так, что шоколадные крошки относительно теста неподвижны, а галактики не двигаются сквозь пространство. То есть можно считать галактики покоящимися в пространстве (рис. 3.2, справа), при этом все расстояния между ними изменяются. Это все равно, что поменять отметки на воображаемых линейках, соединяющих галактики, сделав их из миллиметровых сантиметровыми, отчего все межгалактические расстояния станут в 10 раз больше прежних.

Это дает ответ еще на один вопрос: *не нарушают ли галактики, удаляющиеся быстрее света, теорию относительности?* Закон Хаббла $v = Hd$ говорит, что галактики будут удаляться от нас быстрее скорости света c , если расстояние до них больше $c/H \approx 14$ млрд световых лет, и у нас нет оснований сомневаться, что такие галактики существуют. Не противоречит ли это утверждению Эйнштейна о том, что никакой объект не может двигаться быстрее света? Ответ – и да, и нет. Это нарушает специальную теорию относительности 1905 года, но не противоречит общей теории относительности 1915 года, которая стала последним словом Эйнштейна по данному вопросу. Следовательно, все в порядке. Общая теория относительности ослабила световой барьер: если специальная теория относительности утверждает, что никакие два объекта не могут двигаться быстрее света друг относительно друга *ни при каких обстоятельствах*, то общая говорит, что они не могут двигаться быстрее света друг относительно друга, *когда они находятся в одном и том же месте*. Однако галактики, удаляющиеся со сверхсветовой скоростью, находятся очень далеко от нас. Если настаивать на том, что пространство расширяется, можно перефразировать это соображение: ничему не позволено двигаться быстрее света *сквозь пространство*, но само пространство может растягиваться с какой ему угодно скоростью.

Кстати, о далеких галактиках. Я видел газетные статьи, где говорилось о галактиках, отстоящих от нас на 30 млрд световых лет. *Если возраст нашей Вселенной всего 14 млрд лет, то как мы видим объекты в 30 млрд световых лет?* Каким образом их свету хватило времени, чтобы добраться до нас? Более того, они удаляются от нас быстрее света, что делает абсурдным сам разговор о возможности их увидеть. Ответ в данном случае состоит в том, что мы видим эти далекие галактики не там, где они находятся теперь, а там, где они были, когда испускали свет, который сейчас доходит до нас. Точно так же, как Солнце мы видим таким, каким оно было 8 минут назад, и в том месте, где оно было 8 минут назад, далекие галактики мы можем видеть такими, какими они были 13 млрд лет назад, и в тех местах, где они были тогда, – примерно в 8 раз ближе к Земле, сравнительно с их нынешним положением. Так что свету из таких галактик достаточно пройти сквозь пространство всего 13 млрд световых лет,

⁸ Математически этим точкам зрения соответствует выбор разных систем отсчета, а теория Эйнштейна позволяет произвольно выбирать систему отсчета в пространстве и времени.

а разница добирается за счет растяжения пространства. Это похоже на то, как по бегущей дорожке в аэропорту можно пройти 20 метров, сделав всего 10 шагов.

Как расширяется Вселенная?

Не случится ли там, вдали, куда направлено разбегание галактик, какого-нибудь космического ДТП, когда они врежутся в то, что находится там, куда они расширяются? Если наша Вселенная расширяется согласно уравнениям Фридмана, такой проблемы не существует: как показано на рис. 3.2, расширение выглядит одинаково повсюду в космосе, так что подобных проблемных мест быть не может. Если принять ту точку зрения, что далекие галактики удаляются сквозь статическое пространство, причина, по которой они никогда не сталкиваются с более далекими галактиками, состоит в том, что те удаляются еще быстрее: вам не удастся врезаться сзади в разгоняющийся «Порше», если сами вы сидите за рулем ископаемого «Форда-Т». Если же считать, что пространство расширяется, то объяснение состоит просто в том, что его объем не сохраняется. Новости с Ближнего Востока приучили нас к той мысли, что нельзя получить больше места иным путем, кроме как отобрав его у кого-нибудь. Однако общая теория относительности утверждает прямо противоположное: дополнительный объем может быть создан в определенной области между некоторыми галактиками без того, чтобы он расширялся в другие области. Этот объем просто остается между галактиками (рис. 3.2, справа).

Космическая классная комната

Как бы безумно это ни звучало, представление о расширении Вселенной логически последовательно и поддерживается астрономическими наблюдениями. Со времени Эдвина Хаббла подтверждающих эту теорию наблюдений стало гораздо больше благодаря современным технологиям и новым открытиям. Самый фундаментальный вывод состоит в том, что изменениям подвержена вся Вселенная: отодвинув рубеж наших знаний на миллиарды лет, мы обнаружили Вселенную, которая еще не настолько сильно расширилась и поэтому была плотнее и гуще населена. Таким образом, мы обитаем не в скучном статическом пространстве, аксиоматизированном Евклидом, а в динамичном эволюционирующем пространстве, которое пережило своего рода детство и даже, возможно, рождение – около 14 млрд лет назад.

Радикально усовершенствованные телескопы усилили наше зрение настолько, что теперь мы можем непосредственно наблюдать за эволюцией пространства. Представьте, что вы выступаете с презентацией перед большой аудиторией. Внезапно вы замечаете нечто забавное. Ближайший к вам ряд кресел занят людьми примерно вашего возраста. Однако в десятом ряду вы видите лишь подростков. За ними – кучку маленьких детей, а ряд позади них занят младенцами. Вглядываясь во Вселенную, мы видим нечто подобное. Вблизи множество больших, зрелых галактик, похожих на нашу, а очень далеко мы видим в основном маленькие юные галактики, которые не кажутся вполне развитыми. А за ними и вовсе нет галактик, лишь темнота. Поскольку свету требуется больше времени, чтобы прийти издаля, заглядывание на большие расстояния равносильно наблюдению прошлого. Темнота позади галактик – это эпоха до образования всех галактик. В то время пространство было заполнено водородом и гелием в виде газа, тяготение которого еще не успело превратить его сгущения в галактики, а поскольку этот газ прозрачен, как гелий в воздушных шарах, он невидим в телескоп.

Но есть загадка: во время презентации вы неожиданно замечаете, что из-за последнего пустого ряда поступает энергия – задняя стена аудитории не вполне темная, а испускает слабое излучение в виде микроволн! Почему? Мы видим именно такое свечение, когда заглядываем очень далеко во Вселенной.

Откуда приходят микроволны?

Для меня главный урок Ньютона и Фридмана сводится к максиме: «Экстраполируйте смелее». Берите законы физики, как вы их понимаете, применяйте их к еще не исследованным ситуациям и смотрите, не предскажут ли они что-нибудь такое, что можно наблюдать. Ньютон взял законы движения, которые Галилей открыл для Земли, и экстраполировал их на Луну и другие небесные тела. Фридман взял законы движения и гравитации, которые Эйнштейн открыл, опираясь на данные о Солнечной системе, и экстраполировал их на всю Вселенную. Кажется, эта максима должна стать распространенным научным методом. В частности, можно было бы ожидать, что после 1929 года, когда фридмановская идея расширяющейся Вселенной получила признание, ученые по всему миру станут соревноваться друг с другом в систематическом изучении того, что случится, если экстраполировать ее в прошлое. Ну, если вы так подумали, то ошиблись... Как бы ученые ни настаивали, что они заняты рациональным поиском истины, они, как и все люди, имеют слабости: ученые испытывают предубеждения, зависят от чужого мнения и повинуются стадному инстинкту. Чтобы преодолевать эти недостатки, требуется нечто большее, чем просто талант к вычислениям.

Для меня следующим космологическим супергероем, который сделал необходимые выводы, был еще один русский ученый – Георгий Гамов. Научным руководителем его диссертации в Ленинграде был не кто иной, как Александр Фридман. Хотя Фридман умер на втором году совместной работы, Гамов унаследовал как идеи, так и интеллектуальную смелость Фридмана.

Космический плазменный экран

Раз Вселенная расширяется, значит, в прошлом она должна была иметь большую плотность. Но всегда ли она расширялась? Вероятно, нет: работа Фридмана допускает, что когда-то Вселенная могла сжиматься, и все вещество, двигавшееся к нам, постепенно замедлилось, остановилось и начало ускоряться – но уже направляясь от нас. Такой космический отскок мог случиться, только если плотность вещества была гораздо ниже известного теперь значения. Гамов решил систематически исследовать другую возможность, более общую и радикальную: расширение, имеющее начало. Как он объяснял в книге 1946 года, если уподобить космическую драму кинофильму и запустить его в обратную сторону, мы увидим, как плотность Вселенной беспрестанно возрастает. Поскольку межгалактическое пространство заполнено водородом, по мере продвижения назад во времени этот газ будет становиться все плотнее, а значит, все горячее. Если нагревать ледяной куб, он расплавится. Если продолжать нагревать жидкую воду, она превратится в газ – пар. Аналогично, если продолжать нагревать газообразный водород, он перейдет в четвертое состояние – плазму. Почему? Дело в том, что атом водорода – это просто электрон, обращающийся вокруг протона, а газообразный водород – это просто скопление таких атомов, сталкивающихся друг с другом. Когда температура поднимается, атомы движутся быстрее и сталкиваются друг с другом сильнее. Если становится достаточно горячо, удары оказываются настолько разрушительными, что атомы распадаются на части, а электроны и протоны начинают двигаться независимо. Водородная плазма – это и есть «суп» из свободных электронов и протонов.

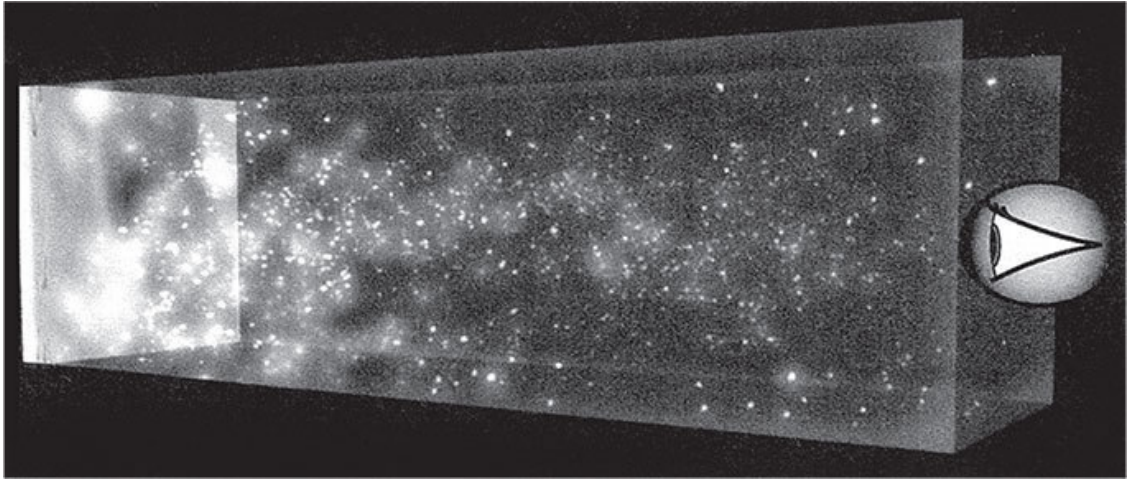


Рис. 3.3. Свету от далеких источников требуется время, чтобы достичь Земли, поэтому, заглядывая вдаль, мы смотрим и вглубь времен. За самыми далекими галактиками мы видим непрозрачную стену светящейся водородной плазмы, излучению которой потребовалось около 14 млрд лет, чтобы дойти до нас. В то время водород, который заполняет пространство сегодня, был разогрет настолько, что представлял собой плазму. Нашей Вселенной тогда было всего около 400 тыс. лет. (На основе рисунка группы *NASA/WMAP*.)

Иными словами, Гамов предсказал, что наша Вселенная началась с горячего Большого взрыва и что плазма некогда заполняла весь космос. Причем особенно интересно, что предсказание проверяемо: если холодный газообразный водород прозрачен и невидим, то горячая водородная плазма непрозрачна и ярко светится, подобно поверхности Солнца. Это означает, что когда мы заглядываем дальше в космос (*рис. 3.3*), мы видим сначала старые галактики, за ними молодые галактики, затем прозрачный газообразный водород, а затем стену сияющей водородной плазмы. Мы не сможем увидеть, что за этой стеной, поскольку она непрозрачна, а значит, скрывает все, что было до нее. Более того, как показано на *рис. 3.4*, мы должны видеть это во всех направлениях, поскольку, куда бы мы ни взглянули, мы смотрим назад во времени. Получается, мы должны увидеть окружающую нас гигантскую плазменную сферу.

В книге 1946 года Гамов, излагая теорию Большого взрыва, предсказал, что у нас должна иметься возможность наблюдать эту плазменную сферу. Он поручил своим ученикам Ральфу Альферу и Роберту Херману проработать этот вопрос, и несколько лет спустя они опубликовали статью, в которой предсказали, что эта сфера будет светиться с температурой около 5° выше абсолютного нуля, а значит, в основном будет испускать микроволны, а не видимый свет. К сожалению, Альферу и Херману не удалось убедить астрономов искать фоновое космическое микроволновое излучение, и их работа была почти забыта, как и фридмановское открытие расширения Вселенной.

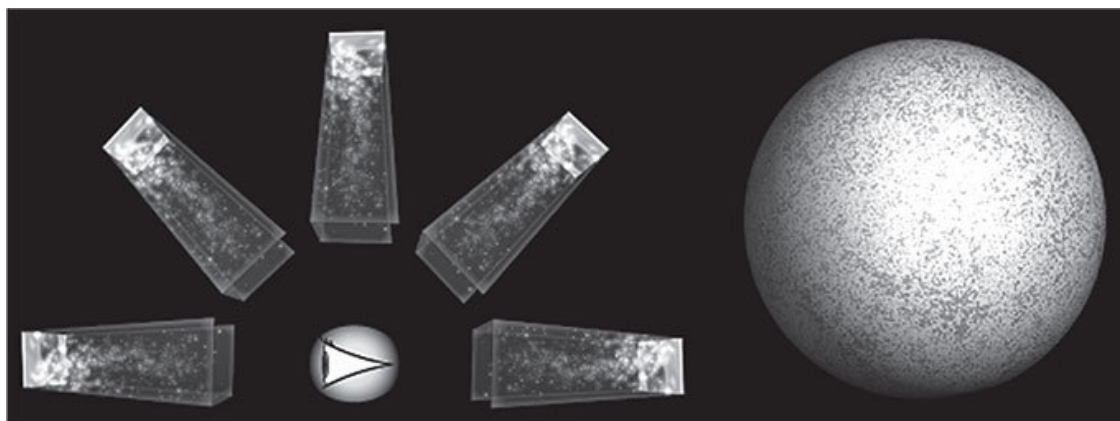


Рис. 3.4. Все выглядит так, как если бы мы находились в центре гигантской плазменной сферы. Мы видим плазменную стену с предыдущего рисунка во всех направлениях.

Как увидеть послесвечение

К 1964 году группа принстонских ученых поняла, что доступный для наблюдения микроволновый сигнал должен существовать, и планировала начать его поиски, но ее неожиданно опередили. В том году Арно Пензиас и Роберт Вильсон испытывали в «Белл лабораториз» в штате Нью-Джерси самый совершенный в то время микроволновый телескоп. Они обнаружили нечто загадочное: телескоп регистрировал сигнал, который они не могли объяснить, причем сигнал не менялся, куда бы ни направляли аппарат. Странно! Ученые предполагали регистрировать сигналы только при наведении на конкретные объекты на небе, например на Солнце или на спутник с микроволновым передатчиком. Но вместо этого складывалось впечатление, что все небо светится с температурой 3° по абсолютной шкале — очень близкой к 5° , предсказанным Гамовым и его коллегами. Радиоастрономы стали проверять локальные источники шума — на время подозрения пали на голубей, которые гнездились в телескопе и оставляли там помет. Как-то раз я обедал с Арно. Он рассказал, что голубей посадили в деревянный ящик с пищей и послали в отдаленный кампус «Белл лабораториз», чтобы птиц выпустили там. К сожалению, голуби вернулись. В книге Арно уклончиво сказано, что физики все-таки «избавились» от голубей. Я, напоив его вином, выяснил правду: это было сделано с применением огнестрельного оружия... Голубей устранили, но загадочный сигнал остался: Пензиас и Вильсон открыли космический микроволновый фон, слабое послесвечение нашего Большого взрыва⁹.

Это открытие стало сенсацией и было отмечено Нобелевской премией по физике 1978 года. Из вычислений Гамова и его учеников следовало, что плазменная сфера на рис. 3.4 должна быть примерно вдвое холоднее солнечной поверхности, а ее горячее излучение шло через космос 14 млрд лет, прежде чем достигло нас, и по пути оно остыло в тысячу раз — до наблюдаемых 3° выше абсолютного нуля, — потому что пространство тысячекратно расширилось. Иными словами, вся Вселенная была когда-то горячей, как звезда, а дикая тысячекратная экстраполяция, примененная Гамовым в его теории Большого взрыва, была проверена и подтверждена.

«Детские фото» Вселенной

Когда плазменная сфера была обнаружена, началась гонка: кто первый сделает ее фотографии? Поскольку температура излучения была почти одинаковой во всех направлениях, изображения Пензиаса и Уилсона выглядели как на белых шуточных открытках с подпи-

⁹ В русском обиходе долго доминировало наименование «реликтовое излучение», подчеркивающее происхождение космического микроволнового фона именно от Большого взрыва. — *Прим. пер.*

сю «Сан-Франциско в тумане». Чтобы получить интересные фотографии, которые можно было бы считать первыми «детскими снимками» Вселенной, нужно было увеличить контрастность, регистрируя малейшие изменения от места к месту. Такие вариации должны существовать: если бы в прошлом условия везде были идентичными, то по законам физики они бы оставались идентичными и сейчас, а это прямо противоречит картине, которую мы наблюдаем (галактики в одних местах и пустота в других).

Однако сделать «детские фотографии» оказалось настолько трудно, что для этого понадобилось почти 30 лет. Для подавления измерительных шумов Пензиас и Уилсон воспользовались жидким гелием, охлаждавшим детектор до температуры, близкой к температуре космического микроволнового фона. Но флуктуации температуры от места к месту на небе, как оказалось, должны составлять тысячные доли процента, так что для получения «детских фотографий» требовалась в 100 тыс. раз более высокая чувствительность, чем была доступна Пензиасу и Уилсону. Экспериментаторы по всему миру принимали этот вызов — и терпели поражение. Одни говорили, что это безнадежно, другие отказывались сдаваться. Первого мая 1992 года, когда я был аспирантом, по молодому еще интернету разнесся слух: Джордж Смут собирается объявить о результатах самого амбициозного эксперимента того времени по изучению микроволнового фона, который выполнялся спутником НАСА под названием *COBE* (*Cosmic Background Explorer*). Моего научного руководителя Джо Силка пригласили представить доклад Джорджа, и прежде чем он улетел в Вашингтон, я спросил, что он думает об этом открытии. Джон предположил, что они не увидели космические флуктуации, а просто зарегистрировали радиошум нашей Галактики.

Но, вопреки ожиданиям, Смут взорвал бомбу, которая изменила не только мою карьеру, но и космологию как науку. Он со своей командой действительно обнаружил флуктуации! Стивен Хокинг назвал это «самым важным открытием в космологии за целое столетие, если не вообще», поскольку «детские фотографии» 400-тысячелетней Вселенной несут важнейшую информацию о нашем космическом происхождении.

«Золотая лихорадка»

Теперь, когда *COBE* нашел золото, началась лихорадка. Как видно на рис. 3.5, карта неба, составленная *COBE*, размытая. Низкое разрешение изображений не позволило показать детали размером менее 7° . Естественно, следующим шагом стало детальное наблюдение небольшого участка неба с высоким разрешением и низким уровнем шума. На таких картах высокого разрешения закодирован ответ на некоторые ключевые космологические вопросы. Я люблю фотографировать (в возрасте 12 лет мне удалось, разнося по Стокгольму рекламки, накопить денег на первую камеру), так что задача фотографирования Вселенной меня сразу увлекла. Кроме того, мне нравилось возиться со снимками и компьютерной графикой, будь то иллюстрации для школьной стенгазеты «Кураре» или изображения для условно-бесплатной компьютерной игры *FRAC* (трехмерный клон «Тетриса»), доход от которой позволил мне объехать мир в 1991 году. Так что я бывал счастлив, когда экспериментаторы позволяли мне вместе с ними превращать данные в карты неба.

Моей первой удачей стала встреча с молодым принстонским профессором Лайманом Пейджем. Мне понравилась его веселая мальчишеская улыбка, и после его доклада на конференции я набрался смелости предложить ему сотрудничество. Пейдж понравился мне еще больше, когда я узнал, что до аспирантуры он годами бороздил Атлантику под парусом. В итоге профессор доверил мне данные, полученные с помощью микроволнового телескопа в канадском городе Саскатун, которым он со своей группой три года сканировал участок неба непосредственно возле Северного полюса.

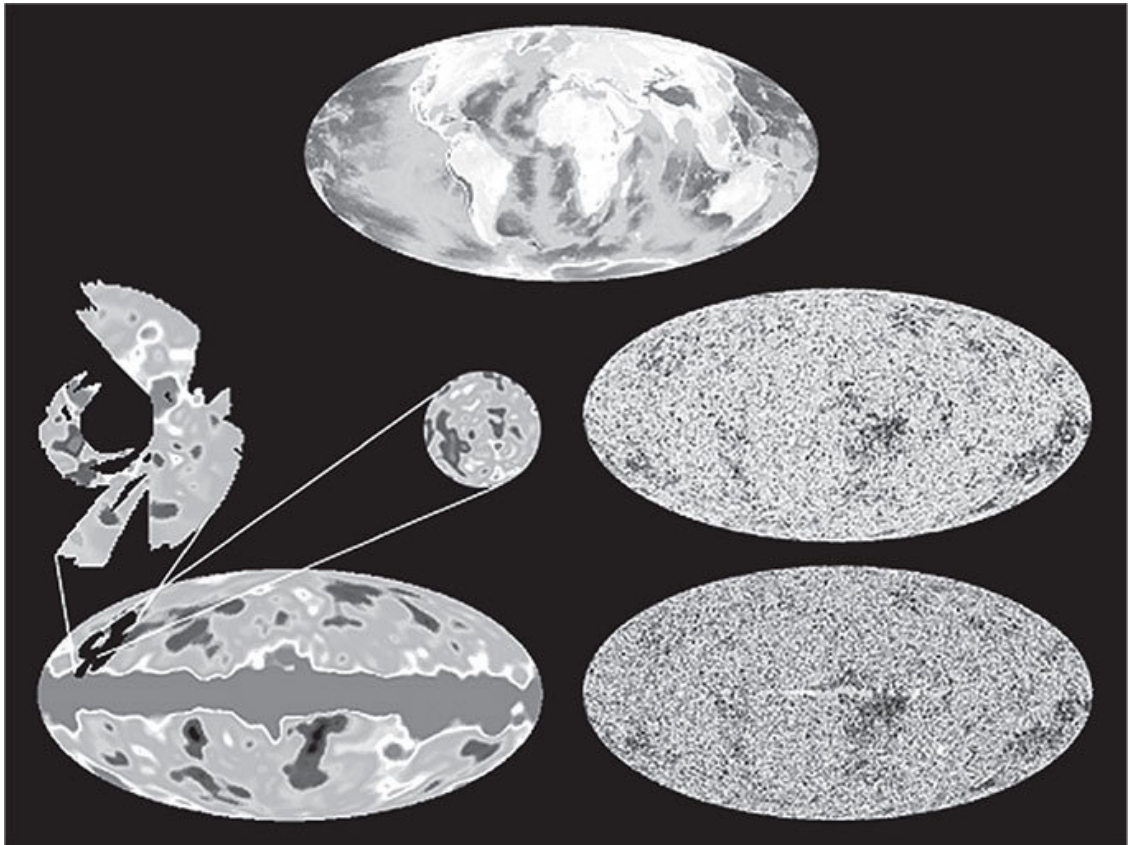


Рис. 3.5. Когда демонстрируется карта неба целиком, удобно проецировать ее на плоскую поверхность так же, как это делается с картой Земли (*вверху*): просто интерпретируется она как взгляд вверх, а не вниз, в землю. “Детское фото” нашей Вселенной, полученное *COBE* (*внизу слева*) было нечетким. Это обусловило повторение экспериментов по рассмотрению участков неба с более высоким разрешением (*посередине слева*). Позднее спутники *WMAP* и “Планк” построили карты всего неба с высоким разрешением (*справа*) – 3 мегапиксела и 50 мегапикселей соответственно. Эти небесные карты повернуты относительно карты Земли так, что центральная горизонтальная линия соответствует не плоскости земного экватора, а плоскости Галактики (*серая полоса слева внизу*); Северный полюс Земли указывает на центр саскатунской карты. (Карта Земли: Патрик Дайнин.)

Преобразование данных в карту оказалось делом удивительно сложным: они представляли собой не фотографии неба, а длинные таблицы чисел, указывающих, сколько вольт получено при сложении и вычитании сигналов от различных участков неба всевозможными способами. Правда, это занятие оказалось на редкость увлекательным и потребовало от меня максимального напряжения и всех моих знаний в области теории информации и вычислительных методов. Я провел много вечеров в своем мюнхенском кабинете постдока, пока не довел до ума саскатунскую карту (*рис. 3.5*), подгадав как раз к большой космологической конференции во Французских Альпах. Я прочитал уже сотни докладов, но лишь некоторые отпечатались в памяти как волшебные моменты. Это как раз один из тех случаев. Когда я поднялся на подиум и оглядел аудиторию, сердце мое забилося: она была заполнена людьми, многих из которых я знал по работам, но большинство понятия не имело, кто я такой. Они ехали в Альпы скорее затем, чтобы покататься на лыжах, а не выслушивать новичков вроде меня. Однако явившихся очень волновало все, что касалось изучения космического микроволнового фона, и я чувствовал гордость. Из сегодняшнего дня 1996 год видится как докембрий: мы делали доклады, пользуясь пачками целлулоидных «прозрачек».

В моей колоде был туз – слайд с изображением саскатунской карты (рис. 3.5) в виде увеличенного фрагмента карты *COBE*. Я почувствовал возбуждение аудитории. Во время перерыва после доклада люди толпились у проектора, задавая вопросы и требуя снова и снова показывать тот слайд. Дик Бонд, один из авторов космологии микроволнового фона, сказал мне с улыбкой: «Поверить не могу, что Лайман поделился с вами данными!»

Я чувствовал, что космология вступила в золотой век и движется по замечательной спирали: открытия притягивают людей и гранты, а это, в свою очередь, ведет к новым открытиям. Уже в следующем месяце, в апреле 1996 года, было одобрено финансирование двух новых спутников с кардинально улучшенными по сравнению с *COBE* разрешением и чувствительностью. Одним из них стал проект *WMAP*, открытый НАСА по инициативе Лаймана Пейджа и его близких коллег, а вторым – европейский проект «Планк» (в ходе подготовки грантовой заявки я имел удовольствие делать для него вычисления и прогнозы). Поскольку космические экспедиции требуют многолетнего планирования, группы по всему миру включились в гонку, стремясь опередить *WMAP* и «Планк» или, по крайней мере, получить до их запуска какие-нибудь легкодоступные результаты. Вот почему саскатунский проект оказался первым из многих, с которыми я имел удовольствие сотрудничать в деле анализа данных. Я работал с экспериментаторами из проектов *HASME*, *QMAP*, *Tenerife*, *POLAR*, *PIQ* и *Boomerang*, получая из их данных «детские фото» Вселенной. В основном я стремился стать посредником между теорией и экспериментом. Я чувствовал, что космология превращается из бедной данными дисциплины в область, где данных больше, чем люди могут обработать, и решил создать инструменты, позволяющие извлекать все возможное из этой лавины данных. В частности, я опирался на теорию информации, чтобы выяснить, сколько полезных данных о Вселенной содержится в заданном наборе данных. Обычно в мегабайтах, гигабайтах или терабайтах измерений имеется небольшое число битов космологической информации, сложным образом зашифрованных и скрытых в огромном количестве шума от электроники детектора, атмосферных помех, галактического излучения и т. д. Хотя существовал идеальный математический способ извлечения этой иголки из стога сена, на практике он обычно оказывался слишком трудоемким и требовал миллионов лет компьютерных вычислений. Я публиковал различные методы анализа данных, которые не всегда были идеальными, но позволяли извлекать почти всю информацию достаточно быстро с точки зрения наших практических задач.

Я по многим причинам люблю космический микроволновый фон. Например, я благодарен ему за первый брак, за сыновей Филиппа и Александра. Я встретил Анжелику де Оливейра Косту, свою (теперь уже бывшую) жену, когда она приехала из Бразилии в Беркли в качестве аспирантки Джорджа Смута. Нам довелось тесно сотрудничать не только в деле перемены подгузников, но и во многих из упомянутых проектов по анализу данных. Одним из них был *QMAP*, телескоп, запущенный на высотном аэростате Лайманом Пейджем, Марком Девлином и их коллегами, чтобы избавиться от большей доли микроволнового шума, вызываемого атмосферой.

Первое мая 1998 года, уже около двух часов ночи, а дела обстоят весьма скверно. До вылета на космологическую конференцию в Чикаго, где я должен рассказать о новых результатах *QMAP*, осталось всего семь часов, но мы с Анжеликой, погруженные в сомнения, еще сидим в кабинете в Принстонском институте перспективных исследований. До сих пор от экспериментов в области космического микроволнового фона требовалась полная уверенность в том, что не сделано ошибок и не упущено ничего важного. Ключом к достоверности в науке служит получение независимых экспериментальных подтверждений ваших результатов. Но, поскольку люди смотрели в разных направлениях и пользовались инструментами с разным разрешением, прежде нельзя было сравнить изображения неба, полученные в двух

разных экспериментах, и проверить, согласуются ли они. Вплоть до этого момента карты, построенные телескопами в Саскатуне и *QMAP*, имели значительное перекрытие на небе вдоль полосы бананообразной формы (рис. 3.5). Мы с Анжеликой в смятии смотрели на дисплей: карты Саскатуна и *QMAP* совершенно не согласовывались! Щурясь так и сяк, мы пытались убедить себя, что это несоответствие – лишь инструментальный шум. Но выдавать желаемое за действительное можно лишь до определенного предела. Столько сделано – и тут выясняется, что по крайней мере одна из этих карт полностью ошибочна. И как делать об этом доклад?! Это обернулось бы позором не только для нас, но и для всех, кто участвовал в экспериментах.

Неожиданно Анжелика обнаруживает подозрительный знак «минус», наличие которого в программе, грубо говоря, приводит к тому, что карта *QMAP* отображается вверх ногами. Мы исправляем его, перезапускаем программу и недоверчиво поглядываем друг на друга, пока на экран выводится новая карта. Теперь согласие между двумя картами просто потрясающее! Поспав несколько часов, мы летим в Чикаго. Я на ходу готовлю доклад, несусь от арендованного автомобиля к аудитории Фермилаба¹⁰ и едва успеваю к началу своего выступления. Я настолько возбужден, что до самого вечера не осознаю своей новой ошибки: автомобиль исчез.

– Где вы его поставили? – спрашивает охранник.

– Да вот тут, прямо напротив гидранта, – отвечаю я, и тут до меня доходит – ну надо же! – второй раз за день...

Космический мяч для пляжного волейбола

«Золотая лихорадка» – добыча данных из микроволнового фона – продолжалась много лет. Было поставлено более 20 различных экспериментов, и каждый из них ее подхлестывал (о некоторых я расскажу). А затем пришел черед *WMAP*. В два часа дня 11 марта 2003 года аудитория была переполнена: мы не отрывались от экрана, где участники *WMAP* в прямом эфире телевидения НАСА рассказывали о своих результатах. Если наземные и аэростатные эксперименты могли нанести на карту лишь часть неба, то спутник *WMAP* картографировал всю небесную сферу, как ранее *COBE*, но с радикально выросшими чувствительностью и разрешением. Я чувствовал себя как в детстве, на новогодней елке, когда наконец приехал Санта-Клаус, – только этого момента я с нетерпением ждал не месяцы, а годы. Ожидание того стоило: полученные изображения ошеломляли. При этом самоотверженные ученые прошли путь от выделения финансирования до получения результатов менее чем за 6 лет – втрое быстрее, чем *COBE*. Руководитель проекта *WMAP* Чак Беннет чуть не умер, выдерживая график. Другой ключевой участник проекта Дэвид Спергел рассказал мне, что у Чака случился инфаркт и он провел три недели в больнице.

Наконец, они открыто разместили все данные в интернете, и космологи всего мира смогли попробовать самостоятельно проанализировать их. Теперь пришло время вкалывать мне. Измерения *WMAP* были безупречны, но загрязнены радишумом нашей Галактики: на карте *COBE* (рис. 3.5) он выглядит как горизонтальная полоса. Неприятность в том, что такое микроволновое загрязнение от нашей и других галактик охватывает все небо, даже если где-то его уровень слишком низок, чтобы быть заметным. Однако это загрязнение имеет цвет, отличный от цвета сигнала (его интенсивность по-другому зависит от частоты), а *WMAP* получил изображение неба на пяти частотах. Группа *WMAP* использовала эту дополнительную информацию для очистки, но я раздумывал над куда лучшим методом, основанном на теории информации, который дал бы более чистую карту с более высоким разрешением

¹⁰ Национальная ускорительная лаборатория им. Энрико Ферми (Фермилаб) в Чикаго – крупный исследовательский центр, специализирующийся в области физики высоких энергий и астрофизики. – *Прим. пер.*

(рис. 3.5, внизу справа). Спустя месяц работы вместе с Анжеликой и моим старым другом Эндрю Гамильтоном мы отправили статью в журнал, и жизнь стала возвращаться в нормальное русло. Я развлекался, изготавливая карту микроволнового фона в виде мяча (рис. 3.4). Карта так понравилась команде *WMAP*, что они сделали собственную версию и напечатали ее на мяче для пляжного волейбола, который теперь украшает мой кабинет. Я зову его «своей Вселенной», поскольку это каноническое изображение границы, охватывающей все, что мы в принципе можем наблюдать.

«Ось зла»

Важнейшие космологические данные зашифрованы в размерах пятен, заметных на космическом микроволновом фоне (ниже я объясню подробнее). Кроме того, мы можем представить двумерную карту микроволнового фона как сумму множества *мультиполей* (рис. 3.6). (Аналогично можно раскладывать звуки и цвета на частоты.) Карты-мультиполи, по сути, отражают вклад пятен разного размера, и еще со времен *COBE* складывалось впечатление, что со вторым мультиполем, называемым *квадруполем*, творится нечто странное: самые крупные пятна на карте были видны хуже, чем ожидалось. Однако никому не удавалось получить *карту* этого квадруполя и посмотреть, что с ним происходит: для этого требовалась карта всего неба, а микроволны от нашей Галактики загрязняли части неба так, что восстановить изображение было невозможно.

Так было прежде, но наша карта казалась настолько чистой, что, возможно, могла использоваться для всего неба. Как-то раз, глубокой ночью, незадолго до того, как мы собирались подавать статью о карте, когда Анжелика и дети уже спали, да я и сам собирался на боковую, мне стало любопытно, как выглядит пресловутый квадруполь, и я решил написать компьютерную программу, выстраивающую его изображение. Когда изображение наконец появилось на дисплее (рис. 3.6, слева), оно заинтриговало меня. Паттерн не просто был слабым, как и ожидалось (флуктуации температуры в горячих и холодных пятнах близки к нулю), – вместо случайной мешанины пятен, как предсказывала теория, он образовывал забавный одномерный пояс, окружающий небо. Я уже засыпал, но решил вознаградить себя за ночное программирование и отладку еще одним изображением, так что поменял в программе число 2 на 3 и перезапустил ее, чтобы нарисовать третий мультиполь, называемый *октуполем*. Ого! Что за?.. Появился другой одномерный пояс (рис. 3.6, посередине), по-видимому, совпадающий по ориентации с квадруполем. Но наша Вселенная не должна быть такой! В отличие от человеческих портретов, на изображениях Вселенной не предполагалось никакого выделенного направления вроде «верха»: они должны выглядеть, как ни поверни, примерно одинаково. Но на «детских снимках» Вселенной на дисплее были полосы, как у зебры, вытянутые в одном направлении. Подозревая, что в моей программе ошибка, я поменял 3 на 4, но рисунок четвертого мультиполя (рис. 3.6, справа) выглядел как ожидалось: случайные пятна без выделенного направления.



Рис. 3.6. Когда карта *WMAP*, представленная на рис. 3.5, раскладывается на сумму мультиполей, показывающих пятна все меньших размеров, то на первых двух мультиполях (слева и посередине) видно загадочную симметрию относительно некоего направления,

названного «осью зла». Различные цвета показывают, насколько теплее или холоднее среднего небо в данном направлении. Шкала размечена в микрокельвинах, миллионных долях градуса.

Дважды все перепроверив, мы с Анжеликой упомянули о неожиданном открытии в своей статье, посвященной карте. Я был поражен – такой поднялся шум. (Об этом рассказывала газета «Нью-Йорк таймс», и редакция даже прислала к нам фотографа.) Мы стали изучать явление подробнее, как и другие группы (одна назвала выделенное направление «осью зла»). Кто-то доказывал, что это статистическая флуктуация или галактическое загрязнение. Другие утверждали, что это явление еще загадочнее, чем считали мы, находя с применением другого метода дополнительные аномалии даже для мультиполей 4 и 5. Некоторые экзотические объяснения, вроде того, что мы живем в небольшой «вселенной-баранке», где пространство замкнуто на себя, были впоследствии отброшены, но и по сей день я озадачен «осью зла» не меньше, чем в ту первую ночь.

Совершеннолетие микроволнового фона

В 2006 году нас с Анжеликой пригласили в Стокгольм, чтобы помочь отметить присуждение Нобелевской премии по физике за открытие *COBE*. Как часто бывает, в команде *COBE* были трения по вопросу о научном вкладе участников. Премию разделили Джордж Смут и Джон Мазер, и я с облегчением увидел их умиротворяющий подход к делу. Они смогли пригласить команду *COBE* приехать и погреться в лучах заслуженной славы. Чувствовалось, что нескончаемая череда вечеринок помогла преодолеть трещины в отношениях, подчеркивая очевидное – все участники не просто помогли двум коллегам получить премию, а совершили нечто гораздо более важное: «детские фотографии» Вселенной породили целое исследовательское направление и начали новую эру в космологии. (Как бы мне хотелось, чтобы Гамов, Альфер и Херман тоже были там!)

21 марта 2013 года я проснулся в пять утра в напряженном ожидании и сразу настроился на прямую интернет-трансляцию из Парижа, где команда спутника «Планк» показывала свои первые изображения микроволнового фона. За 10 лет *ACBAR*, *ACT*, Южный полярный телескоп¹¹ и т. д. углубили наши знания о микроволновом фоне, но это была крупнейшая веха со времен *WMAP*. Пока я брлся, Джордж Эфстатию рассказывал о результатах. Мне вспомнился март 1995 года, когда Джордж пригласил меня в Оксфорд поработать с ним над новым методом анализа данных «Планка». Это был первый раз, когда меня пригласили в исследовательскую коллаборацию, и я был очень за это благодарен. Мы разрабатывали новую технику очистки загрязненных изображений, которая должна была помочь в обосновании финансирования «Планка» Европейским космическим агентством. И вот результаты наконец станут известны постаревшему на 18 лет Максу!

Когда Джордж показал карту неба, полученную «Планком», я отложил бритву, чтобы вывести на дисплей и очищенную карту *WMAP*. «Они так похожи! – подумалось мне. – И „ось зла“ на месте!» Я поместил обе карты на рис. 3.5, чтобы вы могли их сравнить. Как видите, крупные детали изумительно совпадают, но на карте «Планка» гораздо больше крошечных пятнышек. Значительное увеличение чувствительности и разрешения позволило разобрать детали, слившиеся на карте *WMAP*. Карта «Планка» определенно оправдывала ожидания! Я спроецировал ее на сферу. Благодаря превосходному качеству «Планк» факти-

¹¹ *Arcminute Cosmology Bolometer Array Receiver (ACBAR)* – мультиспектральный микроволновый приемник, разработанный для двухметрового телескопа *Viper* на Южном полюсе. *Atacama Cosmology Telescope (ACT)* – шестиметровый микроволновый телескоп, установленный в чилийской пустыне Атакама на высоте 5190 м над уровнем моря. Южный полярный телескоп (*South Pole Telescope, SPT*) – десятиметровый телескоп микроволнового и миллиметрового диапазона, установленный на станции «Амундсен – Скотт» на Южном полюсе. – *Прим. пер.*

чески предоставил контрольные данные для оценки работы *WMAP*, и после обработки мне стало ясно, что команда *WMAP* заслужила «пять с плюсом» (как и команда самого «Планка»). Однако я думаю, что главный сюрприз, который преподнес «Планк», состоит в том, что не обнаружилось никаких сюрпризов: в основном он подтвердил космологическую картину, которая у нас уже была, но с гораздо большей точностью. Исследования космического микроволнового фона вступили в пору зрелости.

Итак, мы отодвинули пределы наших знаний на 14 млрд лет – до 400 тыс. лет после Большого взрыва – и увидели, что все появилось из заполнявшей космос горячей плазмы. В те времена не было ни людей, ни планет, ни даже звезд с галактиками – только атомы, сталкивающиеся друг с другом и излучающие свет. До разгадки происхождения этих атомов мы еще не добрались.

Как появились атомы?

Космический «термоядерный реактор»

Смелая экстраполяция Гамова предсказала космический микроволновый фон, а теперь у нас были и восхитительные «детские фото» Вселенной. Но, словно этого было недостаточно, Гамов продолжил свою экстраполяцию еще дальше в прошлое и вывел из нее другие следствия. Чем дальше в прошлое – тем горячее. Около 400 тыс. лет после Большого взрыва заполнявший пространство водород оказался разогрет до нескольких тысяч градусов. Это всего вдвое меньше, чем *на поверхности* нашего Солнца, и поэтому он вел себя так же, как водород на Солнце – светился, порождая космический фон микроволнового излучения. Гамов предположил, что через минуту после Большого взрыва температура водорода составляла около 1 млрд градусов. Это горячее, чем *в ядре* Солнца, а значит, водород должен был делать то же самое, что и водород в солнечном ядре – участвовать в термоядерных реакциях, превращаясь в гелий. Однако расширение и охлаждение Вселенной вскоре выключило космический «термоядерный реактор», охладив его до температуры, при которой он не смог работать, так что у него не было времени, чтобы весь водород превратить в гелий. С подачи Гамова его ученики Альфер и Херман выполнили детальные расчеты этих реакций, однако, поскольку работали они еще в конце 40-х годов, им сильно не доставало современных компьютеров.

Но как проверить это предсказание, если первые 400 тыс. лет жизни Вселенная была непрозрачной и все, что случилось тогда, скрыто от нашего зрения вуалью космического плазменного экрана, порождающего микроволновый фон? Гамов увидел здесь сходство с теорией существования динозавров: их нельзя увидеть непосредственно, но можно посмотреть на окаменелости. Поверяя вычисления группы Гамова с использованием современных данных и компьютеров, можно вывести: когда Вселенная была термоядерным реактором, она успела переработать в гелий 25 % своей массы. Когда вы измеряете долю гелия в далеком межгалактическом газе, изучая с помощью телескопа его спектр, вы обнаруживаете, что его там... эти самые 25 %! Меня эта находка впечатляет столь же сильно, как открытие бедра тираннозавра. Это прямое свидетельство того, что в прошлом происходили безумные вещи: в данном случае все было *безумно* горячим. Причем гелий – это не единственная «окаменелость». Первичный нуклеосинтез, как стали называть теорию Гамова, также предсказывал, что каждый из примерно 300 тыс. атомов должен быть дейтерием, а каждый пятиллионный атом – литием. Сейчас оба соотношения измерены и полностью согласуются с теоретическими предсказаниями.

Большой взрыв под вопросом

Впрочем, успех дался нелегко. Теорию Большого взрыва встретили прохладно. Даже название «Большой взрыв» придумал один из оппонентов Гамова, Фред Хойл¹². В 1950 году за теорией Гамова числилось два важных предсказания, причем оба неверных: о возрасте Вселенной и о распространенности элементов. Первоначальные хаббловские измерения космологического расширения предсказывали, что нашей Вселенной не более 2 млрд лет, и геологов не устраивало, что Вселенная моложе их горных пород. Кроме того, Гамов, Альфер и Херман надеялись, что первичный нуклеосинтез породит практически все наблюдаемые вокруг нас атомы в правильных пропорциях, но ему не удалось произвести даже близкое к нужному количество углерода, кислорода и других обычных для нас элементов – получились только гелий, дейтерий и ничтожное количество лития.

Теперь мы знаем, что Хаббл сильно ошибся в оценке расстояния от нас до галактик. Из-за этого он заключил, что Вселенная расширяется в 7 раз быстрее, чем на самом деле, и, следовательно, она в 7 раз моложе, чем в действительности. В 50-х годах, благодаря улучшенным измерениям, эта ошибка стала исправляться. Недовольные геологи получили подтверждение своей правоты и поостыли.

Второй «провал» теории Большого взрыва также исправили примерно в это время. Гамов провел новаторские исследования термоядерных реакций в звездах. Согласно этой работе, а также исследованиям других ученых, звезды производят почти только гелий – как сейчас Солнце. (Гамов надеялся, что первичный нуклеосинтез может объяснить, откуда взялись все остальные элементы.) Однако в 50-х годах физики-ядерщики открыли, как казалось, случайное совпадение между уровнями ядерной энергии гелия, бериллия, углерода и кислорода, благодаря которому усиливались термоядерные реакции. Фред Хойл первым понял, что это совпадение позволяет звездам на поздних стадиях жизни превращать гелий в углерод, кислород и большинство других элементов, из которых состоим мы. Более того, стало ясно, что звезды завершают жизнь, взрываясь и возвращая многие из порожденных атомов обратно в газовые облака, которые порождают новые звезды, планеты и, в конце концов, нас. Иными словами, мы связаны с небесами теснее, чем думали наши предки: мы созданы из звездной пыли. Мы живем во Вселенной, а Вселенная живет в нас. Эта догадка превратила гамовскую теорию первичного нуклеосинтеза из провала в потрясающий успех: в первые минуты Вселенная создала гелий с добавками дейтерия и лития, а звезды породили все остальные атомы¹³. Загадка происхождения атомов была разрешена. И тут – везет так везет, – едва отношение к теории горячей Вселенной наконец стало теплеть, как мир космологии взбудоражило подтверждение в 1964 году другого гамовского предсказания – послесвечения Большого взрыва в форме космического микроволнового излучения.

Что такое Большой взрыв?

Мы отодвинули границу наших знаний в прошлое почти на 14 млрд лет, к тому времени, когда вся Вселенная была раскаленным термоядерным реактором. Когда я говорю, что верю в гипотезу Большого взрыва, то имею в виду, что я убежден в истинности следующего утверждения, и не более того:

Все, что мы можем наблюдать сейчас, когда-то было горячее солнечного ядра и расширялось так быстро, что менее чем за секунду вдвое увеличивалось в размерах.

¹² Русский перевод – «большой взрыв» – не отражает иронии, которую в этот термин вкладывали его изобретатели – противники идеи. Название должно было звучать примерно как «большой бах». – *Прим. науч. ред.*

¹³ Звезды увеличивают содержание гелия сверх 25 %, возникших после первичного нуклеосинтеза. Мы можем разделить эти два источника гелия благодаря телескопам: чем дальше в прошлое – тем меньше мы видим гелия. Его содержание стремится к 25 %, когда мы заглядываем во время до образования большинства звезд.

Этот взрыв, определенно, был достаточно большим, чтобы оправдать прописную букву в своем названии. Учтите, однако: мое определение, очень осторожное, ничего не говорит о том, что было до взрыва. Например, эта гипотеза *не* подразумевает, что возраст нашей Вселенной в тот момент составлял секунду, или что некогда она была бесконечно плотной, или она возникла из некоей сингулярности, в которой не действовала наша математика. На заданный в прошлой главе вопрос – есть ли у нас доказательство существования сингулярности в момент Большого взрыва? – имеется простой ответ: *нет!* Конечно, если мы экстраполируем уравнения Фридмана настолько далеко во времени, насколько они позволяют, они перестанут работать при бесконечно плотной сингулярности примерно за секунду до начала первичного нуклеосинтеза. Однако квантово-механическая теория (гл. 7) говорит, что эта экстраполяция перестает работать раньше, чем достигается сингулярность. Я думаю, очень важно различать то, чему есть надежные подтверждения, и то, что пока находится в области спекуляций. Хотя мы располагаем некоторыми интересными теориями (гл. 5), следует прямо заявить, что мы ничего не знаем наверняка. Вот нынешний рубеж наших знаний. Вообще-то мы даже не уверены, что наша Вселенная действительно имела начало, а не занималась непонятно чем вечно до первичного нуклеосинтеза.

Короче говоря, мы отодвинули границу знания на удивление далеко во времени, уяснив ход космической истории (рис. 3.7). Через 1 млн лет после Большого взрыва пространство было заполнено почти однородным прозрачным газом. Если рассматривать космическую драму в обратном порядке, мы увидим, как газ становится все горячее, его атомы сталкиваются друг с другом все активнее, пока они не распадаются на ядра и свободные электроны и не образуют плазму. Затем мы увидим, как атомы гелия, сталкиваясь, разбиваются на протоны и нейтроны. А те разбиваются на кварки. Тут мы пересекаем границу знания и входим в сферу научных спекуляций: в гл. 5 мы исследуем то, что на рис. 3.7 названо «инфляцией» и «квантовой пеной». Если мы вернемся к миллиону лет после Большого взрыва и запустим время вперед, то увидим, как гравитация увеличивает небольшие сгущения газа, превращая их в галактики, звезды и все разнообразные космические структуры, которые мы наблюдаем сегодня.

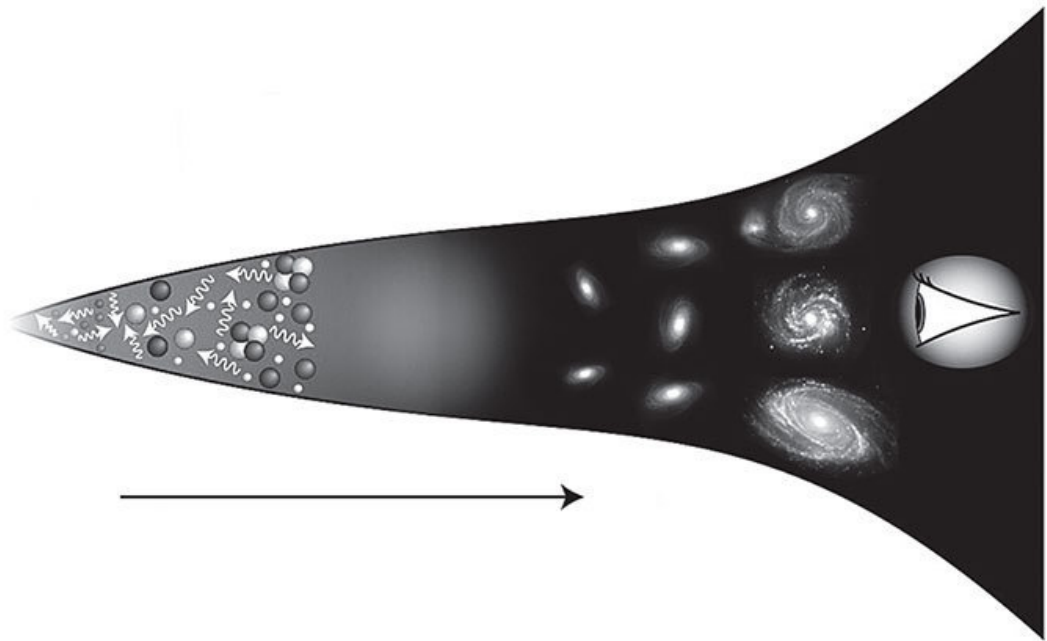


Рис. 3.7. Хотя мы мало что знаем о рождении Вселенной, мы хорошо представляем себе, что случилось в следующие 14 млрд лет. По мере того, как Вселенная расширялась и

охлаждалась, кварки объединялись в протоны (ядра водорода) и нейтроны, которые, в свою очередь, сливались в ядра гелия. Затем ядра, захватывая электроны, образовывали атомы, а гравитация сложила из атомов галактики, звезды и планеты.

Но гравитация может лишь усиливать малые флуктуации, превращая их в крупные, и не способна порождать флуктуации из ничего. Идеально гладкую и однородную среду гравитация сохранит таковой навсегда. Она не в силах образовать никаких уплотнений, не говоря уже о галактиках. Это означает, что в ранней Вселенной должны были существовать небольшие зародышевые флуктуации, которые гравитация могла усиливать и которые послужили своего рода космическими чертежами, определяющими, где будут формироваться галактики. Откуда могли появиться эти флуктуации? Мы увидели, откуда во Вселенной атомы, но что можно сказать о происхождении величественного паттерна, в который выстроились галактики? Откуда взялась крупномасштабная структура Вселенной? Из множества космологических вопросов, которыми задавались люди, этот кажется мне самым важным. В следующих двух главах я поясню, почему я так считаю.

Резюме

- Свету из далеких источников требуется время, чтобы достичь Земли, поэтому телескопы позволяют нам увидеть ход истории космоса.
- Около 14 млрд лет назад наша Вселенная была горячее, чем нынешнее ядро Солнца, и расширялась настолько быстро, что меньше чем за секунду удваивалась в размерах. Я называю это «Большим взрывом».
- Хотя нам неизвестно, что происходило до Большого взрыва, мы уже многое знаем о произошедшем с тех пор – о расширении пространства и кластеризации вещества.
- В течение нескольких минут Вселенная была гигантским термоядерным реактором и, подобно солнечному ядру, превращала водород в гелий и другие элементы, пока космологическое расширение не сделало ее разреженной и холодной в достаточной мере, чтобы термоядерные реакции остановились.
- Расчеты показывают, что около 25 % водорода превратилось в гелий. Измерения прекрасно согласуются с этим предсказанием и данными о других легких элементах.
- Еще через 400 тыс. лет расширения и разрежения водородно-гелиевая плазма охлаждалась настолько, что стала прозрачным газом. Мы видим этот переход как далекую плазменную стену, слабое свечение которой известно как космический микроволновый фон (за его изучение присудили две Нобелевских премии).
- За миллиарды лет гравитация превратила нашу Вселенную из однородной и скучной в комковатую и интересную. Гравитация усилила незначительные флуктуации, которые мы наблюдаем на космическом микроволновом фоне, и сформировала из них планеты, звезды, галактики и наблюдаемую сейчас крупномасштабную структуру Вселенной.
- Теория космологического расширения предсказывает, что галактики должны удаляться от нас в соответствии с определенной формулой, которая согласуется с тем, что мы действительно наблюдаем.
- Вся история Вселенной с высокой точностью описывается простыми физическими законами, которые позволяют определять будущее на основании прошлого, и наоборот.
- Физические законы, управляющие историей нашей Вселенной, описываются с помощью математических уравнений. Поэтому самое точное описание нашей космической истории – математическое.

Глава 4. Вселенная в числах

Космологи часто ошибаются, но никогда не сомневаются.
Лев Ландау

Теоретически теория и практика – одно и то же, но на практике – совсем разные вещи.
Альберт Эйнштейн

Уменя буквально челюсть отвисла. Я стоял на обочине, лишившись дара речи. Я ежедневно смотрел на небо, всю свою жизнь, но никогда прежде по-настоящему его не видел. Было около пяти утра. Я остановился на обочине шоссе через Аризонскую пустыню, чтобы свериться с картой. И оказался пригвожден к месту: то, что я увидел над головой, ничуть не походило на мутное стоковое небо с редкими проблесками тусклых звезд, под которым я вырос. Из тысяч сверкающих точек складывались прекрасные узоры, а поперек небосвода, как величественное галактическое шоссе, тянулся Млечный Путь.

Этому впечатляющему виду способствовали сухой пустынный воздух и высота 2 км над уровнем моря, но, я думаю, вы тоже можете забраться достаточно далеко от городской подсветки, чтобы посмотреть на звездное небо. Чем поразительно звездное небо? Отчасти самими звездами, их огромным числом. Но и еще кое-чем – звездными узорами. Наши предки были так ими заинтригованы, что придумали для их объяснения мифы, а жители некоторых регионов планеты складывали из звезд созвездия, изображавшие мифологических персонажей. Звездное небо не похоже на ткань в горошек, звезды сгруппированы иначе. Самой крупной группировкой звезд из увиденных мною той ночью была галактика Млечный Путь. Ученые с помощью телескопов обнаружили, что другие галактики также складываются в сложные паттерны, образуя группы – скопления галактик, – а также колоссальную волокнистую структуру, тянущуюся на сотни миллионов световых лет. Откуда взялись эти паттерны? Каково происхождение этой грандиозной космической структуры?

В конце прошлой главы мы указали на дестабилизирующее влияние гравитации. Это заставило задуматься о происхождении крупномасштабной структуры Вселенной. Иными словами, интеллектуальный поиск привел нас к тому же вопросу, которым мы задаемся эмоционально, когда восхищаемся видом звездного неба: откуда взялась такая структура?

Требуется точная космология

Мы пока не достигли полного понимания того, как возникла наша Вселенная, и не знаем точно, что происходило до эпохи, когда она была гигантским термоядерным реактором, менее чем за секунду увеличивающимся в размерах вдвое. И все же мы многое знаем о случившемся за 14 млрд лет. *Расширение* и *кластеризация* – эти основные процессы, управляемые гравитацией, превратили горячий однородный кварковый «суп» в наполненный звездами космос. Разбирая в прошлой главе историю Вселенной, мы видели, что в процессе расширения концентрация и температура элементарных частиц постепенно снижались, что позволяло частицам группироваться, образуя все более крупные структуры – атомные ядра, атомы, молекулы, звезды, галактики. Нам известны четыре фундаментальных взаимодействия, и три из них по очереди становились движущей силой процесса кластеризации: сильное ядерное взаимодействие породило ядра, электромагнитное взаимодействие создало атомы и молекулы, и, наконец, гравитация образовала грандиозные структуры, украшающие ночное небо.

Но как именно гравитация это сделала? Когда вы останавливаете велосипед на переходе, то гравитация сразу заявляет о себе: вы начинаете заваливаться вбок и вынуждены выставить ногу. Суть неустойчивости в том, что слабые флуктуации усиливаются. Например, чем дальше от равновесного положения находится остановившийся велосипед, тем сильнее гравитация тянет вас в том же неверном направлении. А в космосе происходит вот что: чем дальше Вселенная отходит от идеальной однородности, тем интенсивнее гравитация усиливает сгущивание вещества. Если некая область космоса сравнительно плотнее своих окрестностей, то ее гравитация усиливается, позволяя ей еще быстрее аккрецировать массу. (Точно так же проще делать деньги, когда у вас их уже много.) Четырнадцать миллиардов лет вполне достаточно, чтобы гравитационная неустойчивость превратила нашу Вселенную из скучной в интересную, усилив даже малейшие флуктуации плотности до огромных сгущений, таких как галактики.

В 1990 году, когда я поступил в аспирантуру и впервые столкнулся с космологией, детали этой картины расширения и кластеризации все еще оставались неясными. Специалисты спорили, 10 или 20 млрд лет нашей Вселенной, продолжая давнюю дискуссию о том, насколько быстро она расширяется сейчас, и оставался открытым более трудный вопрос о скорости расширения в прошлом. История кластеризации оставалась еще более темной: попытки добиться точного соответствия теории и наблюдений показывали, что мы не понимаем, из чего состоит 96 % нашей Вселенной! После эксперимента *COBE* было установлено, что сгущивание через 400 тыс. лет после Большого взрыва составляло всего 0,002 %. Стало ясно, что гравитации не хватило бы времени, чтобы усилить эту едва заметную кластеризацию до современной крупномасштабной структуры, если бы некая невидимая материя не создавала дополнительное тяготение.

Эта загадочное вещество называют *темной материей*, хотя эпитет *невидимая* кажется более подходящим: она скорее прозрачная, и вы даже не заметите, как она проходит сквозь руку. И вправду, темная материя из космоса, сталкиваясь с Землей, по-видимому, проходит нашу планету насквозь, не взаимодействуя с ней. Но будто одной этой странности, темной материи, было недостаточно, так что ученым пришлось ввести в оборот вторую загадочную субстанцию, *темную энергию*, чтобы добиться согласия теоретических предсказаний с наблюдаемыми параметрами расширения и кластеризации. Считается, что темная энергия влияет на космологическое расширение, совершенно не затрагивая кластеризацию, и всегда остается идеально однородной.

Простейшим кандидатом на роль темной энергии была *космологическая постоянная* – упоминавшийся выше подгоночный параметр, который Эйнштейн ввел в свою теорию гравитации (и назвал его позднее самой серьезной своей ошибкой). Существование темной материи предположил в 1934 году Фриц Цвикки, чтобы объяснить дополнительное гравитационное притяжение, удерживающее скопления галактик от распада. А Вера Рубин в 60-х годах открыла, что спиральные галактики вращаются настолько быстро, что они разлетелись бы на части, если бы не содержали невидимую гравитирующую массу. Эти идеи были встречены довольно скептически: если ты утверждаешь, что необъяснимые явления связаны с сущностью, которая невидима и способна буквально просачиваться сквозь стены, то не пора ли верить в привидения? К тому же древняя история знает тревожный прецедент: поняв, что планетные орбиты не являются идеальными окружностями, Птолемей усложнил свою теорию, заставив планеты двигаться по меньшим окружностям (эпициклам), которые, в свою очередь, двигались по окружностям. Последующее открытие более точных законов тяготения отменило эпициклы, предсказав, что орбиты планет не круговые, а эллиптические. Возможно, необходимость в темной материи и темной энергии также исчезнет, если открыть еще более точный закон тяготения? И можно ли воспринимать всерьез современную космологию?

Так выглядит темная материя:	А так — темная энергия:

Рис. 4.1. И темная материя, и темная энергия невидимы, то есть отказываются взаимодействовать со светом и иными электромагнитными явлениями. Мы догадываемся об их существовании лишь по причине их гравитационного влияния.

Такого рода вопросами мы задавались, когда были аспирантами. Чтобы ответить, требовались гораздо более точные измерения, которые превратили бы космологию из дисциплины умозрительной, небогатой эмпирическими данными, в точную науку. К счастью, произошло именно это.

Точные флуктуации микроволнового фона

Как видно на рис. 3.6, «детскую фотографию» нашей Вселенной, полученную в ходе наблюдений космического микроволнового фона, можно разложить на сумму компонентных карт, называемых *мультиполями*, которые, по сути, отражают вклад пятен различных размеров. На рис. 4.2 показана общая величина флуктуаций для каждого мультиполя. Эта кривая называется спектром мощности микроволнового фона, и в ней закодирована ключевая космологическая информация, которую содержит карта. Когда вы смотрите на карты неба (рис. 3.4), вы видите пятна разных размеров, как на псе-далматинце: некоторые пятна всего около 1° в поперечнике, другие — 2° , и т. д. Спектр мощности содержит информацию о том, сколько имеется пятен каждого размера.

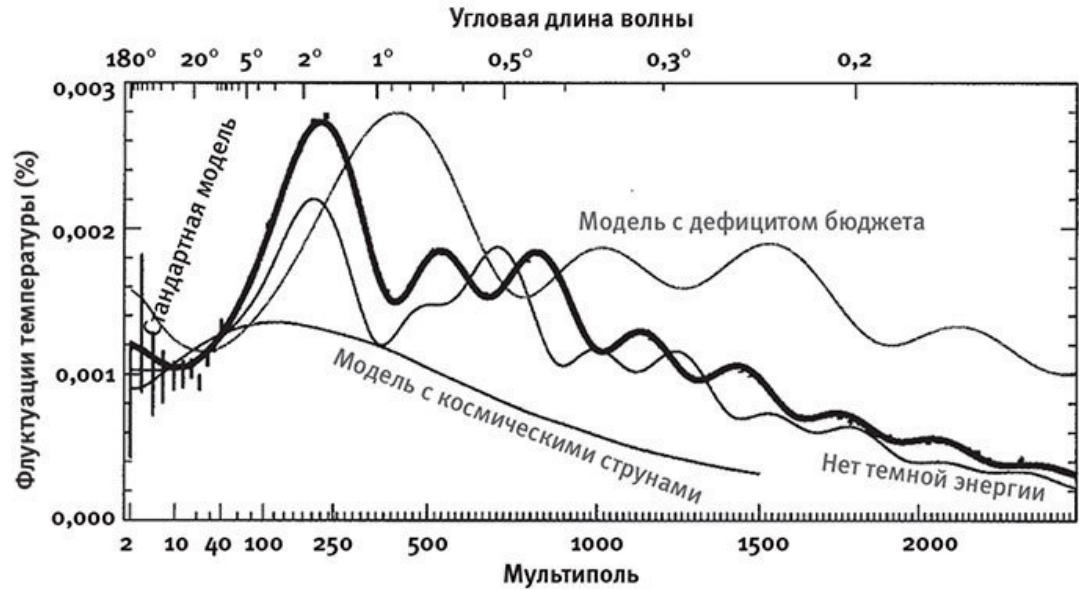


Рис. 4.2. Точные измерения зависимости флуктуаций космического микроволнового фона от углового масштаба исключают многие популярные прежде теоретические модели, но прекрасно согласуются с кривыми, которые предсказаны современной стандартной моделью. Этот график позволяет оценить замечательные аспекты современной космологии, не

беспокоясь о деталях: высокоточные измерения существуют, они полностью согласуются с теоретическими предсказаниями.

Но самое замечательное то, что спектр мощности можно не только измерить, но и предсказать: для любой математически заданной модели расширения и кластеризации Вселенной можно точно рассчитать вид спектра мощности. Как показано на рис. 4.2, предсказания для разных моделей сильно различаются. Доступные сегодня измерения с высокой степенью надежности исключают все теоретические модели, представленные на рис. 4.2, кроме одной (несмотря на то, что в годы моей аспирантуры за каждой «убитой» моделью стоял кто-нибудь из моих уважаемых коллег, и порою не один). Предсказываемая форма спектра мощности сложным образом зависит от всего, что влияет на космологическую кластеризацию (включая плотность атомов, плотность темной материи, плотность темной энергии и природу первичных флуктуаций), так что если мы скорректируем допущения обо всех этих вещах так, чтобы предсказания совпадали с измерениями, мы не только подтвердим, что модель работает, но и измерим эти важные физические величины¹⁴.

Телескопы и компьютеры

Когда в аспирантуре я впервые узнал о космическом микроволновом излучении, никаких измерений спектра мощности еще не было. Затем команда *COBE* дала первый набросок этой трудноуловимой извивающейся кривой, определив, что ее высота в левой части составляет около 0,001 % и что она идет примерно горизонтально. Данные *COBE* содержали больше информации о спектре мощности, но никто ее не выделил, поскольку для этого требовались трудоемкие манипуляции с таблицами чисел – матрицами, – занимавшими до 31 мегабайта памяти. В 1992 году эта величина была устрашающей. С однокурсником Тедом Банном мы придумали коварный план. У нашего профессора Марка Дэвиса был компьютер с объемом памяти более 32 мегабайт, который мы называли «волшебной горошиной», и ночь за ночью я логинился на него в предрассветные часы, когда никто не следил, и запускал анализ наших данных. Через несколько недель подпольной работы мы опубликовали статью с наиболее точными на тот момент данными о форме кривой спектра мощности.

Этот проект позволил мне понять, что достижения компьютерной техники способны вывести астрономию на новый уровень – подобно тому, как телескопы изменили ее лицо. Судите сами: ваш нынешний компьютер настолько мощен, что мог бы повторить наши с Тедом вычисления за несколько минут. Я решил, что если экспериментаторы вкладывают так много труда в сбор данных о Вселенной, люди вроде меня просто обязаны взять из этих данных все, что только возможно. Это стало лейтмотивом моей работы в следующее десятилетие.

Я был одержим задачей, как наилучшим образом определить спектр мощности. Существовали быстрые методы, которые давали погрешности и отличались другими недостатками. Затем мой друг Эндрю Гамильтон разработал оптимальный метод, но, к сожалению, его требования к компьютерному времени росли как шестая степень числа пикселей на карте неба, так что длительность определения спектра мощности по карте *COBE* превысила бы возраст Вселенной.

¹⁴ Параметры, определяющие форму кривой спектра мощности, являются в значительной мере «подгоночными»: мы не в состоянии их измерить. Вместо этого мы подбираем такие их значения, чтобы соответствующая им кривая прошла через точки, отвечающие наблюдениям. При этом критически важно, конечно, что кривую спектра мощности можно заставить пройти через все эти точки за счет выбора всего нескольких параметров. Это и свидетельствует о разумности выбранной модели, и указывает на значения этих параметров, действительно реализованных в нашей Вселенной. – *Прим. науч. ред.*

21 ноября 1996 года. В Принстонском институте перспективных исследований в штате Нью-Джерси тихо и темно. Я провожу еще одну ночь в кабинете. Меня волнует возможность замены метода шестого порядка Эндрю Гамильтона методом третьего порядка, позволяющим оптимально определить спектр мощности *COBE* менее чем за час, и я хочу закончить статью к завтрашней конференции. Профессиональные физики загружают свои только что написанные статьи на общедоступный сайт <http://arXiv.org>, чтобы коллеги могли прочесть их прежде, чем тексты надолго увязнут в процессе журнального рецензирования и публикации. Однако у меня была манера загружать статьи *до* завершения работы над ними – сразу после наступления суточного дедлайна для подачи таких препринтов. Таким образом, я оказывался первым в списке статей следующего дня. Недостаток в том, что если не успеть закончить статью за 24 часа, то я опозорюсь на весь мир, опубликовав сырой черновик, который станет вечным памятником моей глупости. На этот раз моя стратегия дала сбой, и ранние пташки в Европе наткнулись на недоделанный раздел обсуждения в моей статье, который я закончил лишь около четырех утра. На конференции мой друг Ллойд Нокс представил похожий метод, который он разработал совместно с Эндрю Яффе и Диком Бондом в Торонто, но еще не подготовил для публикации. Когда я рассказывал о своих результатах, Ллойд, ухмыльнувшись, сказал Дику: «Тегмарк – быстрые пальчики!» Наш метод оказался чрезвычайно полезным и с тех пор применяется практически во всех измерениях спектра мощности микроволнового фона. Мы с Ллойдом, похоже, шли по жизни параллельными курсами: нам одновременно приходили в голову одинаковые идеи (впрочем, он обогнал меня с выводом замечательной формулы для шума на картах микроволнового фона), в одно и то же время у нас родилось двое сыновей, и даже развелись мы синхронно.

Золото в холмах

По мере совершенствования экспериментов, компьютеров и методов результаты измерения кривой спектра мощности (*рис. 4.2*) становились все точнее. Как видно на рисунке, предсказываемая форма кривой отчасти напоминает холмы Калифорнии. Если обмерить много немецких догов, пуделей и чау-чау и нарисовать их распределение по размеру, получится кривая с тремя пиками. А если измерить множество пятен космического микроволнового фона (*рис. 3.4*) и нарисовать их распределение по размерам, окажется, что пятна определенного размера встречаются особенно часто. Наиболее заметный пик на *рис. 4.2* соответствует пятнам с угловым размером около 1° . Почему? Эти пятна были порождены звуковыми волнами, распространявшимися по космической плазме почти со скоростью света, а поскольку плазма просуществовала 400 тыс. лет после Большого взрыва, эти пятна выросли в размерах примерно до 400 тыс. световых лет. Если посчитать, под каким углом на нашем небосводе 14 млрд лет спустя видно сгущение размером 400 тыс. световых лет, получится около 1° . Если, конечно, пространство не искривлено...

Существует не один вид однородного трехмерного пространства (*гл. 2*): кроме плоской разновидности, которую аксиоматизировал Евклид и мы изучали в школе, существуют искривленные пространства, где углы подчиняются иным правилам. В школе меня учили, что углы треугольника на листе бумаги дают в сумме 180° . Но если нарисовать треугольник на искривленной поверхности апельсина, то в сумме они дадут больше 180° , ну а если на седле, сумма окажется меньше 180° (*рис. 2.7*). Аналогично, если наше физическое пространство искривлено подобно сферической поверхности, то угол, охватываемый каждым пятном микроволнового фона, окажется больше, а значит, пики на кривой спектра мощности сместятся влево. Если же пространство имеет седловидную кривизну, пятна будут казаться меньше, и пики сместятся вправо.

Я считаю одной из самых красивых идей в эйнштейновской теории гравитации ту, что геометрия – это не только математика, но и физика. В частности, уравнения Эйнштейна показывают: чем больше материи в пространстве, тем сильнее последнее искривляется. Эта кривизна пространства заставляет предметы двигаться не по прямым линиям, а искривлять свою траекторию в сторону массивных объектов – таким образом, гравитация объясняется как проявление геометрии. Это открывает совершенно новый способ взвешивания Вселенной: надо просто измерить первый пик спектра мощности космического микроволнового фона. Если его положение покажет, что пространство плоское, уравнения Эйнштейна скажут, что средняя космическая плотность составляет около 10^{-26} кг/м³, что соответствует примерно 10 мг в расчете на объем Земли или примерно 6 атомам водорода на кубический метр. Если пик смещен левее, то плотность выше, и наоборот. Из-за путаницы, связанной с темной материей и темной энергией, измерение совокупной общей плотности имеет огромное значение, и экспериментальные группы по всему миру стремились получить данные об этом первом пике, который, как ожидалось, будет обнаружить проще всего: крупные пятна легче измерить.

Я уловил первые признаки этого пика в 1996 году в статье, написанной по материалам Саскатунского проекта, инициатором которого был Барт Неттерфилд, ученик Лаймана Пейджа. «Вау!» – подумал я и опустил ложку с мюсли, чтобы во всем разобраться. Умом я понимал, что теория, стоящая за пиками спектра мощности, очень элегантна, однако нутром чувствовал, что человеческие экстраполяции не могут работать так хорошо. Через три года Эмбер Миллер, также ученица Лаймана Пейджа, инициировала более точные измерения первого пика и обнаружила, что он находится примерно в том месте, где должен быть в случае плоской Вселенной. Но почему-то тогда казалось, что это слишком хорошо, чтобы быть правдой. Наконец, в апреле 2000 года я вынужден был признать правоту этих ученых. Микроволновый телескоп *Boomerang* на высотном аэростате размером с футбольное поле за 11 суток облетел Антарктиду и получил самые точные в то время данные для определения спектра мощности, показавшие красивый пик ровно на том месте, которое соответствует плоской Вселенной. Так мы узнали совокупную плотность нашей Вселенной (усредненную по всему пространству).

Темная энергия

Эти измерения привели к интересной ситуации с бюджетом космической материи. Как видно на рис. 4.3, совокупный бюджет известен нам по положению первого пика, но мы также знаем плотность обычной материи и плотность темной материи по данным об их гравитационном влиянии на космическую кластеризацию. Однако вся эта материя дает лишь около 30 % общего бюджета, а значит, 70 % должны представлять собой некую форму материи, не подверженной кластеризации, – так называемую темную энергию.



Рис. 4.3. Бюджет космической материи. Положения пиков спектра мощности микроволнового фона на горизонтальной оси указывают на то, что пространство плоское, а общая плотность материи (усредненная по всей Вселенной) примерно в миллион триллионов триллионов (10^{30}) раз ниже плотности воды. Высоты пиков говорят нам о том, что на обычную и темную материю приходится примерно 30 % общей плотности, а еще 70 % должно приходиться на нечто другое.

Только что я рассказал много интересных вещей, но не произнес главное слово: *сверхновые*. Совершенно независимые данные, полученные в ходе изучения космологического расширения, а не кластеризации, привели к тому же 70-процентному значению для темной энергии. Мы уже говорили о применении переменных звезд цефеид в качестве стандартных свечей для измерения космических расстояний. Но теперь космологи заполучили в качестве инструмента другую, значительно более яркую, стандартную свечу, которую можно видеть не только в миллионах, но даже в миллиардах световых лет. Это колоссальные космические взрывы, называемые сверхновыми типа I^a , которые за несколько секунд могут испускать больше энергии, чем 100 миллионов миллиардов солнц.

Помните первую строфу песенки «Ты свети, звезда, мерцая»? Когда Джейн Тейлор записала строчку «...как алмаз, ночь украшая», она даже не догадывалась, насколько права: Солнце через 5 млрд лет умрет, закончив свои дни белым карликом (он представляет собой гигантский шар, состоящий – как и алмаз – в основном из атомов углерода). Сейчас во Вселенной полно белых карликов. Многие постоянно наращивают массу, заглатывая газ соседних умирающих звезд-компаньонов, вокруг которых они обращаются. Как только у них официально фиксируется избыточный вес (при достижении 1,4 массы Солнца), у них случается звездный эквивалент инфаркта: они теряют стабильность и испытывают гигантский термоядерный взрыв – превращаются в сверхновую типа I^a . Поскольку эти «космические бомбы» имеют почти одинаковую массу, неудивительно, что и по мощности они примерно равны.

Более того, небольшие вариации в мощности взрыва связаны с его спектром, а также скоростью нарастания и спада вспышки. Эти параметры можно измерить, что позволило астрономам превратить сверхновые типа I^a в точные стандартные свечи. Этим методом воспользовались Сол Перлмуттер, Адам Рисс, Брайан Шмидт, Роберт Киршнер и их коллеги для точного измерения расстояний до множества сверхновых типа I^a с одновременным определением скорости их удаления по красным смещениям. На основе этих измерений ученые подготовили самую точную для своего времени реконструкцию скорости расширения Вселенной в прошлом. В 1998 году они объявили о замечательном открытии, которое принесло им в 2011 году Нобелевскую премию по физике: в течение 7 млрд лет замедляясь, космо-

гическое расширение затем вновь стало ускоряться и ускоряется до сих пор! Если вы подбросите камень, тяготение планеты будет замедлять его удаление от Земли, так что космологическое ускорение демонстрирует странную гравитационную силу, которая проявляется не в притяжении, а в отталкивании. Теория гравитации Эйнштейна предсказывает, что темная энергия обладает как раз таким антигравитационным эффектом, а группа, исследовавшая сверхновые, обнаружила, что 70-процентная доля темной энергии в составе космической материи объясняет их наблюдения.

50-процентный средний уровень

Мне нравится быть ученым: это дает возможность работать с замечательными людьми. Чаще всего моим соавтором был дружелюбный аргентинец Матиас Салдарриага. Мы с бывшей женой звали его за глаза «Великий Салда», соглашаясь, что единственная вещь, которая превосходит его талант, – это его чувство юмора. Он участвовал в написании компьютерных программ, которые использовались для предсказания кривых спектра мощности (вроде тех, что на рис. 4.2), а однажды поспорил на авиабилет до Аргентины, что все его предсказания ошибочны и не существует ни одного пика. Готовясь к получению результатов проекта *Boomerang*, он ускорил свои вычисления и насчитал огромную базу данных моделей, с которыми можно было сравнивать измерения. Так что, когда данные стали доступны *Boomerang*, я вновь загрузил на <http://arXiv.org> неоконченную статью и имел удовольствие вкалывать сутки подряд, чтобы завершить ее к воскресному вечеру. Обычная (атомарная) материя испытывает столкновения там, где темная материя проходит насквозь, и эти два типа материи по-разному движутся в космосе. А значит, они по-разному влияют на кривую спектра мощности микроволнового фона (рис. 4.2). Команда *Boomerang* сообщила об едва заметном втором пике, и мы с Матиасом определили, что в таком случае атомы должны составлять по крайней мере 6 % общего бюджета космической материи. Однако первичный нуклеосинтез (космический термоядерный реактор, который мы обсуждали в гл. 3) идет, только если на атомы приходится 5 % – значит, где-то ошибка! В эти сумасшедшие дни я оказался в Альбукерке, куда приехал делать доклад, и был по-настоящему взволнован, рассказывая аудитории об этих новых уликах, которые нам подбросила Вселенная. Мы с Матиасом едва успели к дедлайну, и наша статья появилась в интернете непосредственно перед статьей, в которой команда *Boomerang* анализировала собственные данные: придирчивый компьютер задержал их по дурацкой причине – подпись к иллюстрации оказалась на одно слово длиннее положенного.

Перекрестная проверка – неприятная штука, когда имеешь дело с налоговой инспекцией, но в науке это хорошая вещь. Проект *Boomerang* дал космологам возможность провести две перекрестные проверки бюджета космической материи:

1. Мы измерили долю темной энергии двумя разными способами (по сверхновым типа I^a и по пикам космического микроволнового излучения), и результаты сошлись.
2. Мы измерили долю обычной материи двумя разными способами (по первичному нуклеосинтезу и по пикам космического микроволнового излучения), и результаты не сошлись, так что по крайней мере один из методов был ошибочным.

Пик возвращается

Год спустя в шикарном зале для пресс-конференций в Вашингтоне я сажу в кресле, как приклеенный, чувствуя себя так, словно с минуты на минуту в комнату войдет Санта-Клаус, да не один, а целых три. Первым был Джон Карлстром, сообщивший результаты, полученные микроволновым телескопом *DASI* на Южном полюсе. После разглагольствова-

ний об уже известных мне технических деталях – бум! – выясняется, что получен самый замечательный график спектра мощности из всех, какие мне встречались – с тремя отчетливыми пиками. Затем появился Санта № 2: Джон Рал из *Boomerang*. Опять разглагольствования, и снова – бум! Еще один замечательный спектр мощности с тремя пиками, прекрасно согласующийся с измерениями *DASI*. Причем некогда невзрачный второй пик заметно подрос после того, как они усовершенствовали конструкцию телескопа. Наконец, Санта № 3: Пол Ричардс сообщил результаты измерений в ходе аэростатного эксперимента *MAXIMA*, которые согласовывались с остальными данными. Я был в восторге. Столько лет я мечтал об уликах, закодированных в микроволновом фоне, и вот они! Это было так дерзко – считать, что мы знаем, что именно Вселенная делала всего через несколько сотен тысяч лет после Большого взрыва, – и все же мы оказались правы. В эту ночь я быстро перезапустил свою программу подбора модели с новыми данными о микроволновом фоне, и теперь, когда второй пик стал выше, мой код предсказал 5 % атомов – в полном согласии с теорией первичного нуклеосинтеза. Перекрестная атомная проверка из провала превратилась в успех, порядок в космосе был восстановлен. Этот порядок сохранился до сих пор: *WMAP*, «Планк» и другие проекты измерили кривую спектра мощности еще точнее, но, как видно на рис. 4.2, в трех первых экспериментах все было определено правильно.

Точные данные о кластеризации галактик

К 2003 году фон космического микроволнового излучения стал, пожалуй, величайшим в истории успехом космологии. Многие увидели в нем панацею, способную решить все наши проблемы и измерить все ключевые параметры космологических моделей. Это впечатление было ошибочным. Допустим, проведя измерения, вы определили, что мой вес составляет 90 кг. Очевидно, этой информации недостаточно, чтобы узнать мой рост и объем талии, поскольку вес зависит от обоих этих параметров: я могу оказаться высоким и тощим или низким и упитанным. Мы сталкиваемся с похожими проблемами, когда пытаемся измерить ключевые параметры Вселенной. Например, характерные размеры пятен микроволнового фона, соответствующие положениям пиков спектра мощности на горизонтальной оси (рис. 4.2), зависят и от кривизны пространства (которая увеличивает либо уменьшает эти пятна), и от плотности темной энергии (которая изменяет скорость расширения Вселенной, а значит, и расстояние до плазменной поверхности с ее пятнами, что также заставляет их казаться крупнее или мельче). Поэтому, хотя многие журналисты заявляли, что такие эксперименты, как *Boomerang* и *WMAP* продемонстрировали плоскую геометрию пространства, на самом деле это не так: Вселенная может быть и плоской, содержащей около 70 % темной энергии, и искривленной, с иным количеством темной энергии. Есть и другие пары космологических параметров, которые трудно разделить на основе анализа микроволнового фона. Например, амплитуда неоднородностей в ранней Вселенной и время появления первых звезд влияют на спектр мощности (рис. 4.2) сходным образом (в данном случае меняя высоту пиков). Как известно из школьной алгебры, для определения двух величин требуется более одного уравнения. В космологии мы хотим определить около 7 параметров, и в одном только микроволновом фоне для этого просто недостаточно данных. Так что необходима дополнительная информация из других космологических измерений. Например, из трехмерных карт галактик.

Обзоры красных смещений галактик

Когда мы строим трехмерную карту расположения галактик во Вселенной, мы сначала анализируем двумерные фотографии неба, чтобы найти галактики, а затем проводим дополнительные измерения, чтобы определить, насколько далеко галактики находятся. Самый

масштабный пока проект трехмерного картографирования называется Слоуновским цифровым обзором неба (*SDSS*). (Мне повезло в нем поучаствовать, когда я был постдоком в Принстоне.) Более десяти лет небольшой армии специалистов понадобилось, чтобы отснять треть неба с помощью специально построенного в Нью-Мексико 2,5-метрового телескопа и получить двумерную карту неба (*рис. 4.4*). Принстонский профессор Джим Ганн, напоминая мне добродушного волшебника, использовал свою магическую силу, чтобы построить для этого телескопа поразительную цифровую камеру, самую большую из когда-либо применявшихся для решения астрономических задач.

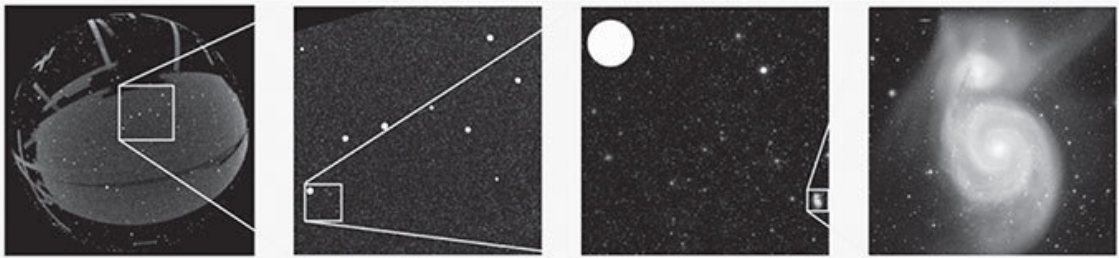


Рис. 4.4. Количество информации в Слоуновском цифровом обзоре неба поразительно. Левый рисунок, представляющий все небо, содержит почти терапиксел – миллион мегапикселов. Последовательно увеличивая фрагменты, мы добираемся до галактики Водоворот, находящейся в созвездии Большой Медведицы, но такой же уровень детализации доступен в любой точке изображения. (Иллюстрация: Майк Блэнтон и Дэвид Хогг/Коллаборация *SDSS*.)

Если вы приглядитесь к изображениям неба в этом обзоре (*рис. 4.5*), вы обнаружите множество звезд, галактик и других объектов – их там более полумиллиарда. Это означает, что если вы попросите аспиранта отыскать все объекты, то, затрачивая на каждый по одной секунде и работая 8 часов в день без перерывов и выходных, он справится с этой работой за 50 лет, а вы получите награду как худший в истории научный руководитель. Поиск этих объектов оказался на удивление сложным даже для компьютера: необходимо уметь различать галактики, звезды (которые казались бы точечными, если бы не атмосферное размытие), кометы, спутники и т. д. Хуже того, объекты накладываются друг на друга – например, близкая звезда досадным образом оказывается на фоне далекой галактики. Несколько лет спустя эту проблему удалось решить благодаря героическим программистским усилиям Роберта Лаптона, веселого англичанина, который подписывал электронные письма «Роберт Лаптон Добрый» и всегда ходил босиком (*рис. 4.5*).

Следующий шаг – понять, на каком расстоянии находится каждая галактика. Закон Хаббла $v = Hd$ означает, что Вселенная расширяется, и чем больше расстояние d до далекой галактики, тем выше скорость v , с которой она удаляется от нас. Закон Хаббла надежно подтвержден, и его можно применить как метод измерения расстояний: определив по красному смещению спектральных линий скорость удаления галактики, можно узнать расстояние до нее. Измерять красные смещения и скорости легко, а расстояния трудно, так что закон Хаббла позволяет сэкономить массу усилий: как только постоянная Хаббла H определена по близким галактикам, достаточно измерить скорости v далеких галактик по красным смещениям их спектров и поделить их на H .

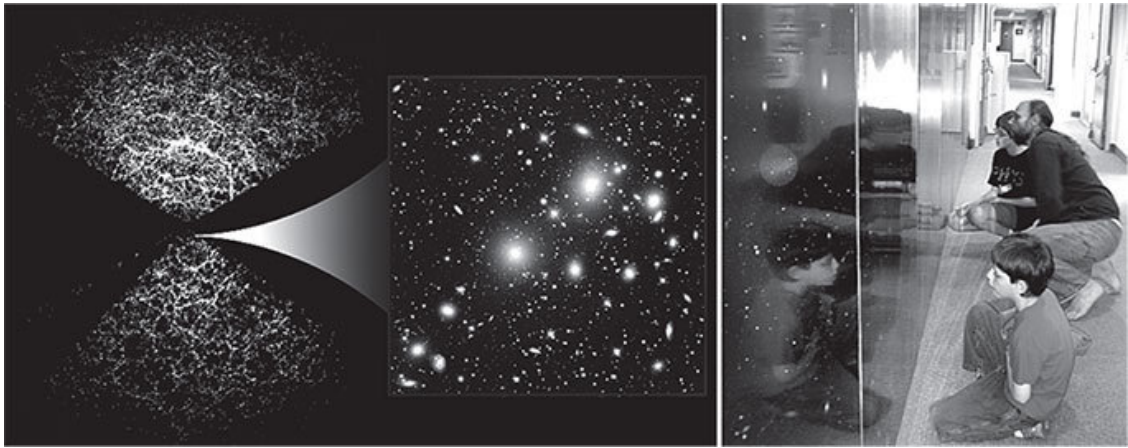


Рис. 4.5. Роберт Лаптон вместе с моими сыновьями рассматривает небольшую часть карты Слоуновского цифрового обзора неба, украшающую стену на астрономическом факультете Принстонского университета. После того как разработанное Робертом программное обеспечение выявило все объекты на карте, были измерены расстояния до большинства интересных галактик и получилась трехмерная карта (слева), где мы в центре, а каждая точка представляет галактику. Слоуновскую Великую стену можно найти, отступив примерно на треть от верхнего края изображения.

Из каталога объектов, составленного с помощью программы Лаптона, было отобрано около миллиона самых интересных для измерения спектров. Чтобы собрать свет 24 спектров галактик, благодаря которым Эдвин Хаббл открыл космологическое расширение, требовались недели. А в Слоуновском цифровом обзоре неба конвейер по производству спектров выдает их по 640 в час, причем все измеряются одновременно. Хитрость в том, чтобы расставить 640 оптических волокон в тех местах фокальной плоскости телескопа, где, по данным каталога Лаптона, должны быть изображения галактик; а затем все волокна направляют галактический свет в спектрограф, который раскладывает их в радужные полосы, фиксируемые цифровой камерой. Другой программный пакет, разработанный Дэвидом Шлегелем и его коллегами, анализирует эти спектры и определяет по красным смещениям спектральных линий расстояние и другие характеристики для каждой галактики.

В левой части рис. 4.5 я изобразил трехмерный срез Вселенной, на котором каждая точка представляет галактику. Когда мне хочется отвлечься, я люблю полетать с помощью трехмерного симулятора космологических полетов. При этом открывается нечто изумительно красивое: мы являемся частью грандиозной структуры. Не только наша планета — часть Солнечной системы, а Солнечная система — часть Галактики, но и сама наша Галактика — часть паутины групп, скоплений, сверхскоплений и гигантской волокнистой структуры, сплетенной из галактик. Разглядывая эту карту, я заметил нечто, сегодня известное как Слоуновская Великая стена (рис. 4.5, слева), и был так поражен размерами этого объекта, что сначала заподозрил ошибку в своей программе. Но некоторые мои коллеги независимо обнаружили, что этот объект действительно существует: он имеет протяженность 1,4 млрд световых лет и является крупнейшей известной структурой во Вселенной. Этот крупномасштабный паттерн кластеризации — космологический клад, в котором закодирована важнейшая информация, отсутствующая в микроволновом космическом фоне.

Космология: от традиционной к прецизионной

Паттерны в распределении галактик в действительности те же, проявления которых мы увидели на карте космического микроволнового фона, но только они показаны миллиарды лет спустя и усилены гравитацией. В области пространства, в которой газ когда-то был на

0,001 % плотнее, чем в окрестностях, и вызывал появление пятна на карте *WMAP* (рис. 3.4), сегодня может располагаться скопление из сотни галактик. В этом смысле флуктуации микроволнового фона можно рассматривать как космическую ДНК, чертеж, согласно которому развивается Вселенная. Сравнивая едва заметную в прошлом кластеризацию, просматриваемую на космическом микроволновом фоне, и ярко выраженный современный паттерн кластеризации на трехмерной карте галактик, можно уточнить природу материи, притяжение которой до настоящего времени заставляло кластеризацию усиливаться.

Кластеризация микроволнового фона характеризуется кривой спектра мощности (рис. 4.2), и то же верно для кластеризации галактик. Однако найти точный вид этой кривой оказалось очень трудно: измерение показанного на рис. 4.6 галактического спектра мощности на основе данных Слоуновского цифрового обзора неба, несмотря на огромную помощь коллег, заняло у меня шесть – шесть! – лет и стало самым утомительным проектом в моей жизни. Раз за разом я думал: «Как здорово, что я наконец с этим почти покончил, я просто не вынесу, если это продолжится!» – и тут же обнаруживал новые проблемы в своих выкладках.

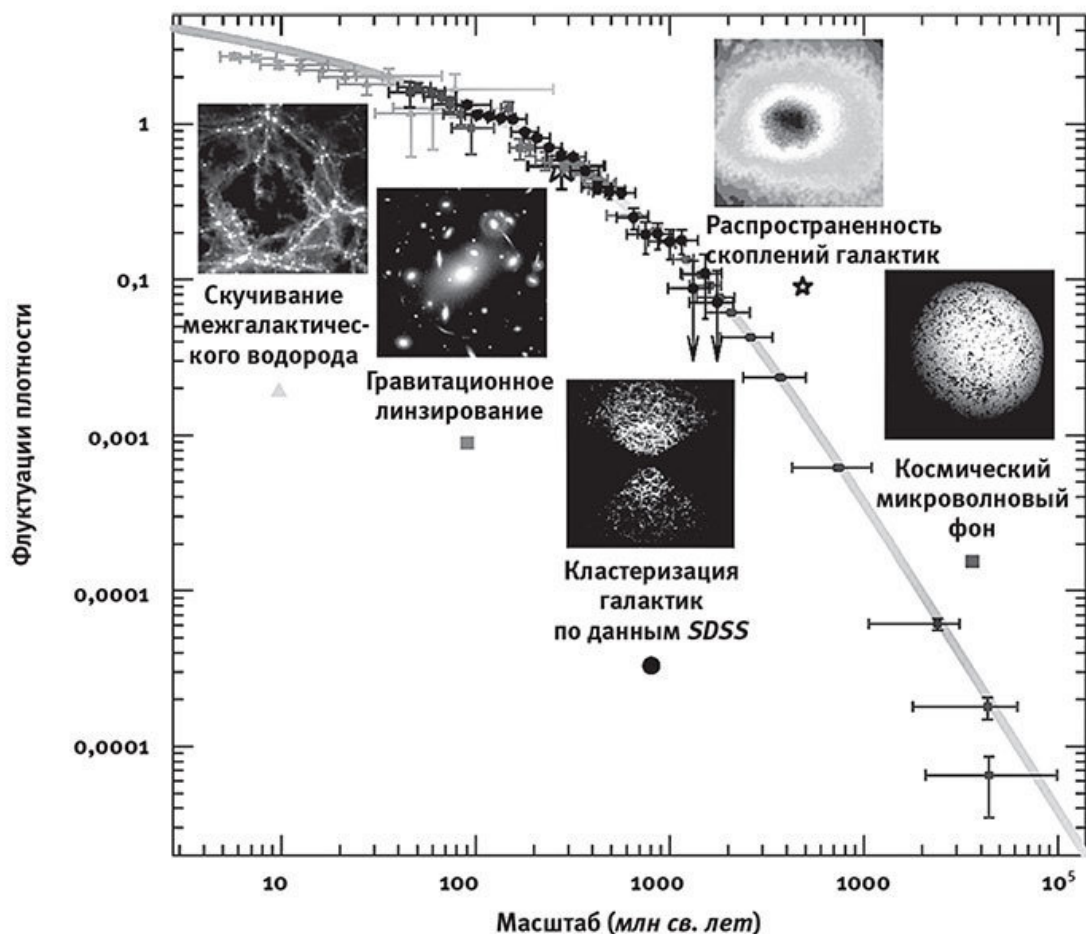


Рис. 4.6. Скучивание материи во Вселенной описывается кривой спектра мощности. Тот факт, что отметке 1000 млн световых лет соответствует значение 10 % на кривой, означает, грубо говоря, что если измерить количество массы в сфере такого радиуса, то результат будет варьировать в пределах 10 % в зависимости от того, где в пространстве поместить эту сферу. Сегодня существуют высокоточные измерения, и они согласуются с теоретическими предсказаниями. Мне кажется особенно важным, что пять различных способов измерения этой кривой согласуются друг с другом, хотя и сами данные, и люди, которые их получали, и применяемые методы различны.

Почему это оказалось так трудно? Ну, все было бы проще, знай мы точное положение каждой галактики во Вселенной и будь у нас бесконечно мощный компьютер для анализа данных. Многие галактики по разным причинам нам не видны, а для некоторых из видимых расстояние и светимость не такие, как мы думаем. Если игнорировать эти осложнения, получается некорректный спектр мощности, который приводит к неправильным выводам о Вселенной.

Первые трехмерные карты галактик были настолько малы, что на их анализ не имело смысла тратить время. Мой коллега Майкл Воугли дал мне замечательный рисунок, сводящий воедино все измерения, сделанные примерно до 1996 года, и когда я спросил его, почему на нем нет «усов», характеризующих погрешности измерений, он ответил: «Я не доверяю этим измерениям». У него были основания для скептицизма: у одних групп мощность получалась в 10 раз больше, чем у других.

Научные группы по всему миру создавали более крупные трехмерные карты и публиковали их в интернете. Я подумал: если так много людей вкладывает так много сил в создание этих карт, они заслуживают тщательного анализа. Мы с Эндрю Гамильтоном решили не жалеть времени и определить спектр мощности распределения галактик, опираясь на методы теории информации вроде тех, которые мы разработали для анализа космического микроволнового фона.

Эндрю – неисправимо жизнерадостный британец, один из моих любимых соавторов. Однажды я опоздал в ресторан, где встречался с Эндрю и моими друзьями Вэйном Ху и Дэвидом Хоггом, недавно побрившим голову. Когда я спросил официантку, не видела ли она троицу, напоминавшую Роберта Редфорда, Брюса Ли и Коджака, она на мгновение задумалась и, улыбнувшись, сказала: «Да, я вижу Роберта Редфорда...» Сначала мы анализировали постоянно растущие трехмерные карты с невнятными названиями вроде *IRAS*, *PSCz*, *UZC* и *2dF*, охватывающие около 5, 15, 20 и 100 тыс. галактик соответственно. Эндрю жил в Калифорнии, и мы бесконечно обсуждали математические тонкости измерения спектра мощности в электронной переписке, по телефону и в пеших походах в горы.

Карта Слоуновского цифрового обзора неба была самой большой и точной среди всех: в ее основе лежала полностью цифровая обработка изображений и тщательнейший контроль качества, и я чувствовал, что она заслуживает самого усердного анализа. Поскольку цепочка рассуждений прочна ровно настолько, насколько прочно ее самое слабое звено, я потратил годы, разбираясь с заковырыстыми вопросами, которые многим казались скучными. Профессор Джилл Напп, жена Джима Ганна и одна из главных движущих сил проекта, организовывала еженедельные встречи в Принстоне, где за ее несравненным угощением мы пытались обнаружить все скелеты в шкафах нашего анализа и придумать, что с ними делать. Например, количество галактик, нанесенных на карту в конкретном направлении, зависело от того, насколько хорошей была погода, когда фотографировался участок, а также от количества галактической пыли в этом направлении и доли видимых галактик, которую удавалось охватить оптическими волокнами. Откровенно говоря, это было скучно, так что я не стану утомлять вас деталями. И все же я получил огромную помощь от множества людей, в особенности от профессора Майкла Страусса и его аспиранта Майка Блэнтон. Параллельно шел нескончаемый цикл многонедельных обчетов терабайтов числовых таблиц, называемых матрицами, причем после каждого захода я просматривал запутанные графики, отлаживал код и запускал все заново.

В 2003 году, после шести лет работы я наконец опубликовал две статьи, и у каждой было более 60 соавторов. Никогда в жизни я не чувствовал большего облегчения от завершения какого-либо дела, за исключением, возможно, этой книги. Первая статья была посвящена измерению галактического спектра мощности (рис. 4.6), а вторая касалась оценки

космологических параметров на основе этих данных и спектра мощности микроволнового фона. Важнейшие результаты указаны в табл. 4.1: я обновил данные с учетом последних измерений, выполненных другими авторами. Значения при этом сильно не изменились, хотя погрешности уменьшились. У меня еще свежи в памяти дебаты времен моей учебы в аспирантуре: каков возраст Вселенной – 10 или 20 млрд лет? А сейчас мы спорим, составляет он 13,7 или 13,8 млрд лет! Точная космология наконец-то родилась, и я горжусь, что сыграл скромную роль в ее появлении.

Параметр	Обозначение	Измеренное значение	Погрешность
Доля атомов	Ω_b	0,049	2 %
Доля темной материи	Ω_d	0,27	4 %
Доля темной энергии	Ω_Λ	0,68	1 %
Доля нейтрино	Ω_ν	0,003	100 %
Общий бюджет	Ω_{tot}	1,001	0,7 %
Возраст Вселенной (млрд лет)	t_0	13,80	0,2 %
Амплитуда первичных флуктуаций	Q	0,0000195	3 %
“Наклон” первичных флуктуаций	n	0,96	0,5 %

Табл. 4.1. Совмещая карты космического микроволнового фона с трехмерными картами распределения галактик, можно измерить ключевые космологические параметры с точностью до нескольких процентов.

Лично мне итог этой работы принес большую удачу. Осенью 2004 года Массачусетский технологический институт рассматривал мою кандидатуру на должность постоянного профессора, и мне сказали, что для этого надо «взять главный приз или, на худой конец, бронзовую медаль». Подобно чартам с рейтингами продаж у музыкантов, у ученых есть индексы цитирования: всякий раз, когда кто-то упоминает вашу статью, он записывает очко в вашу пользу. Порой цитирование бывает случайным и даже глупым, оно подвержено эффекту толпы, поскольку ленивые авторы склонны копировать у других ссылки, даже не читая цитируемые статьи, но аттестационные комиссии носятся с индексом цитирования, как бейсбольные тренеры с рейтингом игроков. И тут мне по-настоящему повезло – эти две статьи неожиданно стали самыми цитируемыми из всех моих публикаций, а одна даже стала самой цитируемой статьей по физике в 2004 году. Хотя она продержалась в этом статусе не очень долго, этого хватило для одобрения моей кандидатуры на должность профессора. А потом журнал «Сайенс» решил, что «главным научным прорывом 2003 года» стало появление доверия к космологии, упомянув при этом результаты *WMAP* и наш анализ данных Слоуновского цифрового обзора неба.

По правде сказать, эти данные вовсе не стали *прорывом*, они лишь отражали медленный, но неуклонный прогресс мирового космологического сообщества в последние годы. Наша работа ни в коей мере не была революционной, мы не открыли ничего удивительного. Скорее мы просто способствовали повышению доверия к космологии и ее превращению в более зрелую науку. Для меня самым большим сюрпризом стало как раз отсутствие сюрпризов.

Знаменитый советский физик Лев Ландау сказал, что космологи часто ошибаются, но никогда не сомневаются, и мы видели множество примеров этого – от Аристарха, утверждавшего, что Солнце в 18 раз ближе, чем оно на самом деле, до Хаббла, который в 7 раз завысил скорость расширения Вселенной. Эта эпоха «Дикого Запада» подошла к концу. Мы видели, что и теория первичного нуклеосинтеза, и теория космической кластеризации дают одинаковый результат для плотности атомов и что сверхновые типа I^a дают то же значение для плотности темной энергии, что и данные космической кластеризации. Из всех перекрестных

проверок моя любимая – та, что представлена на рис. 4.6: там я начертил пять результатов измерения кривой спектра мощности. Хотя получившие их люди и их методы были разными, все пять, как видите, согласуются друг с другом.

Окончательная карта нашей Вселенной

Еще многое предстоит найти

Я сижу в постели, набираю эти слова и думаю о том, как сильно изменилась космология. В те годы, когда я был постдоком, мы часто обсуждали, как было бы здорово получить прецизионные данные и, наконец, точно измерить все интересующие нас космологические параметры. Сегодня можно сказать: дело сделано, ответы – в табл. 4.1. И что теперь? Космология исчерпана? Следует ли космологам подыскать себе другое занятие? Нет! Чтобы оценить, как много интересного еще предстоит сделать, честно взглянем на то небольшое, чего удалось достичь космологам: по большому счету, мы лишь параметризовали наше незнание – в том смысле, что за каждым параметром в табл. 4.1 стоит необъясненная загадка. Например:

- Мы измерили плотность темной материи. Но что это такое?
- Мы измерили плотность темной энергии. Но что это такое?
- Мы измерили плотность атомов (1 атом приходится примерно на 2 млрд фотонов).

Но какой процесс привел к такому соотношению?

- Мы посчитали, что амплитуда первоначальных флуктуаций составляла 0,002 %. Но какой процесс их породил?

По мере улучшения качества данных мы сможем использовать их для измерения параметров в табл. 4.1 со все более высокой точностью, то есть со все большим числом цифр после запятой. Но меня гораздо сильнее вдохновляет использование улучшенных данных для измерения *новых* параметров. Например, можно попробовать определить иные, кроме плотности, параметры темной материи и темной энергии. Есть ли у темной материи давление? А скорость? А температура? Это могло бы пролить свет на ее природу. Действительно ли плотность темной энергии строго постоянна? Если бы удалось измерить даже малейшие ее изменения во времени или от места к месту, это дало бы нам ключ к пониманию ее природы и того, как темная энергия влияет на будущее нашей Вселенной. Есть ли у первичных флуктуаций еще какие-либо закономерности или свойства помимо амплитуды в 0,002 %? Это могло бы многое рассказать о происхождении Вселенной.

Я много думал над тем, как подступиться к этим вопросам, и на все эти вопросы ответ один: получить карту Вселенной! В частности, нам нужны максимально подробные трехмерные карты Вселенной. Наибольший объем, который мы в принципе можем нанести на карту – та часть пространства, свет из которой успел до нас дойти. Данный объем, в сущности, соответствует внутренности плазменной сферы (рис. 4.7, слева), которую мы исследовали, и, как видно из центрального изображения на этом рисунке, свыше 99,9 % этого объема остается неисследованным. Видно также, что наша лучшая трехмерная карта галактик, построенная на основе данных Слоуновского цифрового обзора неба, покрывает лишь наши ближайшие космологические окрестности – Вселенная поистине колоссальна! Если добавить на этот рисунок самые далекие галактики, когда-либо открытые астрономами, они будут чуть дальше, чем на полпути до края, и их окажется слишком мало, чтобы составить сколько-нибудь полезную трехмерную карту.



Рис. 4.7. Сравнительно с наблюдаемой частью Вселенной (слева) ее доля, которая была картографирована (в центре), очень мала и охватывает менее 0,1 % объема. Как и в случае с Австралией в 1838 году (справа), на карту нанесена лишь полоска по периметру, а большая часть внутренней территории остается неисследованной. Окружность на среднем рисунке – это плазма (излучение, составляющее наблюдаемый нами космический микроволновый фон, поступает лишь из ее тонкого внутреннего серого края). Небольшая структура вблизи центра – крупнейшая на данный момент трехмерная карта галактик, построенная на основе данных Слоуновского цифрового обзора неба.

Если бы мы смогли нанести на карту неисследованные части Вселенной, космологию ожидал бы колоссальный прогресс. Мы бы не только тысячекратно расширили свою космологическую осведомленность, но и (далеко – значит давно) узнали бы подробности того, что происходило в первой половине нашей космической истории. Однако как это сделать? Все методы, которые мы обсуждали, продолжают впечатляющим образом развиваться, но, к сожалению, в обозримой перспективе они, видимо, не позволят картографировать большую долю неохваченного картами 99,9 % объема Вселенной. Эксперименты по картографированию космического микроволнового фона затрагивают в основном границу этого объема, поскольку внутри он большей частью прозрачен для микроволн. На таких расстояниях большинство галактик становятся настолько тусклыми, что их трудно увидеть даже в лучшие телескопы. К тому же значительная часть этого объема настолько удалена, что вовсе не содержит галактик – мы заглядываем в настолько далекое прошлое, когда большинство их еще не сформировалось!

Картографирование водорода

К счастью, существует другая технология картографирования. То, что мы считаем пустотой, в действительности не совсем пусто: межгалактическое пространство заполняет газообразный водород. Кроме того, физики давно знают, что газообразный водород испускает радиоволны длиной 21 см, которые можно регистрировать с помощью радиотелескопов. (Когда мой однокурсник Тед Банн преподавал в Беркли и коснулся этой темы, один студент задал ему вопрос: «А какая длина волны у линии длиной 21 см?») Это значит, что, хотя водород невидим для обычных телескопов, посредством радиотелескопов его, в принципе, можно «увидеть» в большей части Вселенной, в том числе задолго до того, как образовались звезды и галактики. И можно построить трехмерные карты распределения газообразного водорода, используя явление красного смещения, которое обсуждалось в гл. 2: поскольку радиоволны при расширении Вселенной растягиваются, длина регистрируемых на Земле волн указывает, с какого расстояния (а значит, из какого времени) они к нам пришли. Например, волны, которые, приходя к нам, имеют длину 210 см, были растянуты в 10 раз, а значит, испускались они, когда Вселенная была в 10 раз меньше, чем сегодня. Эту методику называют *томографией на волне 21 см*, и поскольку она может привести к следующему прорыву

в космологии, к ней привлечено большое внимание. В гонку включились многие научные группы, которые стремятся первыми в мире надежно зарегистрировать едва уловимый сигнал водорода, находящегося на полпути до края Вселенной, однако пока никто в этом не преуспел.

Что такое телескоп?

Почему это так трудно? Потому что сигнал очень слаб. Что нужно для регистрации чрезвычайно слабых сигналов? Чрезвычайно большой телескоп. Скажем, площадью 1 км^2 . Что нужно для постройки чрезвычайно большого телескопа? Чрезвычайно большой бюджет. Но все-таки – насколько большой? Вот тут интереснее! Стоимость традиционных радиотелескопов вроде того, что на рис. 4.8, более чем удваивается при удвоении площади, и в некоторый момент становится абсурдно высокой.

Поэтому во всех экспериментах, стремящихся осуществить томографию на волне 21 см, используется более современный тип радиотелескопов, называемых интерферометрами. Поскольку свет и радиоволны – это электромагнитные явления, они, распространяясь, создают электрическое напряжение между различными точками пространства. Это, конечно, очень низкое напряжение, во много раз слабее 1,5 В между контактами батарейки, но и его можно уловить с помощью хороших антенн и усилителей. Основная идея интерферометрии такова: с помощью массива радиоантенн измерить большое число таких напряжений и с помощью компьютера по этим данным реконструировать вид неба. Если все антенны расположены в горизонтальной плоскости, как на рис. 4.8 (на переднем плане), то волна, пришедшая прямо сверху, достигнет их одновременно. Волны, идущие под углом, достигнут некоторых антенн раньше, чем других, и компьютер использует этот факт для определения их направления. Наш мозг пользуется тем же методом при определении источника звука: если левое ухо слышит звук раньше правого, то звук, очевидно, приходит слева. Точно оценив разницу во времени, мозг может даже оценить, идет звук строго слева или под углом. Имея только два уха, вы не можете определить угол точно и справились бы с задачей гораздо лучше, будь у вас, наподобие большого радиоинтерферометра, сотни ушей по всему телу (хотя, возможно, это выглядело бы не очень хорошо). Идея интерферометра, предложенная Мартином Райлом в 1946 году, оказалась невероятно успешной и принесла ему Нобелевскую премию в 1974-м.



Рис. 4.8. Радиоастрономия с большим бюджетом (на заднем плане) и с малым (на переднем плане). Во время экспедиции в обсерваторию Гринбэнк в Западной Виргинии мой аспирант Энди Лютомирски возится с электронным оборудованием, спрятанным в палатку от дождя.

Однако главное затруднение при измерении этих различий во времени связано с тем, что вычисления приходится проводить для каждой пары антенн (или ушей), и количество таких пар растет примерно как квадрат числа антенн. Это означает, что если увеличить количество антенн в тысячу раз, стоимость компьютера подскочит в миллион раз! А вы-то хотели, чтобы астрономическим был телескоп, а не бюджет! Поэтому интерферометры до сих пор ограничивались десятками или сотнями антенн, тогда как для томографии на волне 21 см их требуется около миллиона.

Когда я перебрался в Массачусетский технологический институт, мне великодушно позволили присоединиться к американо-австралийскому эксперименту по томографии на волне 21 см, которым руководила моя коллега Джеки Хьюит. На встречах, посвященных нашему проекту, я иногда фантазировал, как бы удешевить строительство огромных телескопов. И вот однажды во время такой встречи в Гарварде у меня в голове щелкнуло: дешевый способ есть!

Омнископ

Я рассматриваю телескоп как машину по сортировке волн. Если вы посмотрите на свою руку и измерите распределение интенсивности света по ней, это ничего не скажет о том, как выглядит ваше лицо, поскольку световые волны от всех участков лица смешиваются в каждой точке кожи руки. Но если рассортировать волны света по направлениям их распространения так, чтобы волны, идущие в разных направлениях, попадали на разные места руки, вы сможете восстановить изображение своего лица. Именно это делает объек-

тив фотоаппарата или телескопа, и глаз, и вогнутое зеркало радиотелескопа на рис. 4.8. В математике сортировку волн называют *преобразованием Фурье*. Телескоп, по сути, является преобразователем Фурье. И если традиционный телескоп выполняет его аналоговыми средствами, с использованием линз или кривых зеркал, то интерферометр делает это с помощью специального компьютера. Волны сортируются не только по направлениям их распространения, но и по длинам, что в случае видимого света соответствует их цвету. В Гарварде меня посетила идея: построить громадный радиотелескоп, в котором антенны располагались бы не беспорядочно, как в нынешних проектах, а по несложному шаблону. В случае телескопа с миллионом антенн числовой трюк, использующий свойства этого шаблона, позволил бы ускорить необходимые для преобразования Фурье вычисления в 25 тыс. раз. Грубо говоря, телескоп можно было удешевить в 25 тыс. раз.

Мне удалось убедить своего друга Матиаса Салдарриагу в разумности этой идеи. Мы опубликовали на эту тему две статьи, где показали, что основная идея годится для широкого набора различных шаблонов расположения антенн. Предлагаемый телескоп мы назвали *омнископом*, поскольку он был и всенаправленным (мог получать изображение всего неба сразу), и всеволновым, то есть работал сразу в широком диапазоне длин волн («цветов»).

Эйнштейну приписывают высказывание: «Теория и практика – теоретически одно и то же, но на практике это совсем разные вещи». Мы решили построить небольшой прототип, чтобы убедиться в его работоспособности. Я обнаружил, что базовый принцип омнископа был применен 20 годами ранее группой японских ученых (с иными целями), но электроника того времени заставила их ограничиться 64 антеннами. Благодаря революции сотовых телефонов ключевые компоненты нашего прототипа с тех пор радикально подешевели, и конструкцию стало можно сделать за копейки. Мне также очень повезло с помощниками – группой замечательных студентов Массачусетского технологического института, в том числе электроинженерного факультета, которые могли, словно по волшебству, создавать электронные печатные платы для цифровой обработки сигналов. Один из них, Невада Санчес, научил меня теории магического дыма в электронике, которую мы в дальнейшем подтвердили в ходе экспериментов в лаборатории: электронные компоненты работают, потому что содержат магический дым. Если вы случайно сделаете с ними что-то, из-за чего магический дым выйдет наружу, они перестают работать...

Всю научную карьеру я занимался в основном теорией и анализом данных. Когда я пришел к постановке эксперимента, это оказалось совершенно новым делом – и понравилось мне. Пока наш едва сформировавшийся омнископ ведет себя хорошо, но еще рано говорить, удастся ли нам или кому-либо раскрыть потенциал томографии на волне 21 см. Однако омнископ уже кое-чему научил меня – и это «кое-что» касается меня самого. Наиболее увлекательной частью процесса были экспедиции, когда мы грузили оборудование в фургон и отправлялись в какой-нибудь глухой угол, подальше от радиостанций, сотовых телефонов и других искусственных источников радиоволн. В эти дни моя жизнь, обычно раздробленная электронными письмами, лекциями, заседаниями и семейными обязанностями, сменялась благословенным саториподобным состоянием полной концентрации: никаких телефонных звонков, никакого интернета, никаких пауз, и каждый член команды на 100 % сосредоточен на общей цели. Иногда я думаю, не перебарщивает ли наша эпоха с многозадачностью в повседневной жизни, не следует ли нам исчезать подобным образом чаще, в том числе и по иным причинам. Ну, например, чтобы завершить книгу...

Почему случился Большой взрыв?

Обилие высокоточных данных превратило космологию из умозрительной дисциплины в точную науку. Теперь возраст Вселенной измерен с погрешностью 1 %. Как обычно бывает

в науке, мы, отвечая на старые вопросы, наталкиваемся на новые, и я предвижу замечательное десятилетие: космологи всего мира предложат новые теории и поставят новые эксперименты, чтобы пролить свет на природу темной материи, темной энергии и т. д. В гл. 13 мы вернемся к этим поискам и вопросу о судьбе Вселенной.

Для меня самый поразительный урок точной космологии состоит в том, что с момента рождения Вселенной ею управляют простые математические законы. Уравнения, выражающие общую теорию относительности, по-видимому, точно описывают гравитационное взаимодействие на расстояниях от миллиметров до сотен триллионов триллионов (10^{26}) метров, а уравнения атомной и ядерной физики, похоже, точно описывают Вселенную, начиная с одной секунды после Большого взрыва до наших дней, то есть 14 млрд лет спустя. И делают они это не в общих чертах, как уравнения экономики, а с потрясающей точностью (рис. 4.2). Столь точная космология подчеркивает удивительную полезность математики для понимания мира. Мы вернемся к этой загадке в гл. 10 и рассмотрим ее радикальное объяснение.

Другой поразительный урок точной космологии состоит в том, что она неполна. Мы видим, что все наблюдаемое во Вселенной порождено Большим взрывом, при котором почти однородный газ, столь же горячий, как ядро Солнца, расширялся столь быстро, что удваивался в размерах менее чем за секунду. Но кто все это устроил? Я люблю размышлять над «проблемой Большого взрыва»: что сделало Большой взрыв – взрывом? Откуда появился горячий расширяющийся газ? И почему в нем были учтены эти 0,002 % – амплитуда первичных флуктуаций, которые превратились в галактики и крупномасштабную структуру, наблюдаемую в современной Вселенной? Короче, как все это началось? Экстраполяция в прошлое фридмановских уравнений расширяющейся Вселенной приводит к проблемам, а значит, для понимания наших истоков требуются совершенно новые идеи. Об этом мы и поговорим в следующей главе.

Резюме

- Новейшие данные о космическом микроволновом фоне, кластеризации галактик и т. д. превратили космологию в точную науку. Так, мы перешли от споров о том, составляет возраст Вселенной 10 или 20 млрд лет, к спорам о том, составляет он 13,7 или 13,8 млрд лет.

- Эйнштейновская теория гравитации определенно стала рекордсменом по математической красоте среди физических теорий, объяснив гравитацию как проявление геометрии. Она показывает, что чем больше массы содержится в пространстве, тем сильнее пространство искривляется. Кривизна пространства заставляет предметы двигаться не по прямым линиям, а по кривым, закручивающимся в сторону массивных объектов.

- Путем изучения геометрии треугольников размером с Вселенную теория Эйнштейна позволяет определить общее количество массы во Вселенной. Удивительно, но на атомы, которые считались составными частями всего сущего, приходится всего 4 % этой массы, а остальные 96 % остаются необъясненными.

- Недостающая масса призрачна, будучи одновременно невидимой и способной незаметно проходить сквозь нас. Ее гравитационное влияние указывает на то, что она состоит из двух обладающих противоположными свойствами субстанций: темная материя кластеризуется, а темная энергия – нет; темная материя разрежается при расширении, а темная энергия – нет; темная материя притягивает, а темная энергия отталкивает; темная материя помогает образовываться галактикам, а темная энергия – мешает.

- Точная космология открыла, что с момента рождения Вселенной ею управляют простые математические законы.

- Как ни была бы красива классическая модель Большого взрыва, она не годится для самых первых мгновений жизни Вселенной, а значит, для понимания истоков нам предстоит найти другие важные части головоломки.

Глава 5. Наше космическое происхождение

В начале была создана Вселенная. Это у многих вызвало крайнее раздражение, и в основном рассматривалось как плохой ход.

Дуглас Адамс

«Ресторан на краю Вселенной»¹⁵

«Онет! Он засыпает!» В 1997 году я делал доклад в Университете им. Тафтса. Легендарный Алан Гут специально приехал из Массачусетского технологического института, чтобы меня послушать. Я не встречался с ним прежде, и присутствие в аудитории такого светила заставляло меня гордиться и нервничать. В основном нервничать, особенно когда его голова начала клониться на грудь, а взгляд стал отсутствующим. Я постарался говорить бодрее и громче. Несколько раз он вскидывался, но вскоре я потерпел фиаско: он отправился в царство снов и не возвращался до конца доклада. Я чувствовал себя опустошенным.

Лишь много позднее, когда мы стали коллегами по Массачусетскому технологическому институту, я узнал, что он засыпает на *всех* докладах (кроме собственных). Сказать по правде, мой аспирант Адриан Лю говорит, что такое стало случаться и со мной. И с ним самим тоже. Но я этого никогда не замечал, поскольку мы трое отключаемся в одном и том же порядке. Если Алан, я и Адриан сидим рядом, то воспроизводим дремотную версию «волны», популярной у футбольных болельщиков.



Рис. 5.1. Андрей Линде (слева) и Алан Гут (справа) на шведском фестивале раков. Они не в курсе, что я их фотографирую и что им, двум главным архитекторам теории инфляции, придется одеться иначе для церемонии награждения престижными премиями им. Грубера и Мильнера.

Алан настолько же дружелюбен, насколько и умен. Аккуратность, правда, не относится к сильным его сторонам: когда я впервые появился у него в кабинете, то обнаружил на полу толстый слой нераспечатанной корреспонденции. Выбрав наугад конверт, я увидел штем-

¹⁵ Пер. В. Филиппова. – Прим. пер.

пель десятилетней давности. В 2005 году достижения Алана в этой области были удостоены престижной премии за самый захламленный кабинет в Бостоне.

Что не так с Большим взрывом?

Но эта премия – не единственное достижение Алана. Около 1980 года он узнал от физика Боба Дикке, что во фридмановской модели Большого взрыва существуют серьезные проблемы с самыми ранними стадиями, и предложил радикальное решение, которое назвал *инфляцией*¹⁶. Экстраполяция фридмановских уравнений расширяющейся Вселенной назад во времени приводит к огромным успехам: они отлично объясняют, почему далекие галактики разбегаются от нас, и откуда взялся фон космического микроволнового излучения, и как возникли легкие элементы и многие другие наблюдаемые явления.

Вернемся в прошлое, к границе нашего знания, к тому мгновению, когда Вселенная расширялась столь быстро, что в следующую секунду ее размеры удвоились. Уравнения Фридмана говорят нам, что до того Вселенная была еще плотнее и горячее, и этому нет предела. И, в частности, примерно на $1/3$ секунды ранее имело место начало, когда плотность нашей Вселенной была бесконечной и все существующее разлеталось друг от друга с бесконечной скоростью.

Вслед за Дикке Алан Гут тщательно изучил эту историю возникновения нашего мира и понял, что она страшно неестественна. Например, на четыре вопроса из числа приведенных в начале гл. 2 она дает такие ответы:

– **Что стало причиной нашего Большого взрыва?**

– Объяснения этому нет. Уравнения просто учитывают, что это случилось.

– **Произошел ли наш Большой взрыв в одной точке?**

– Нет.

– **Где именно в пространстве произошел наш Большой взрыв?**

– Он случился везде, сразу в бесконечном множестве точек.

– **Как бесконечное пространство может быть порождено за конечное время?**

– Объяснения этому нет. Уравнения просто учитывают, что пространство было бесконечным уже в момент его появления.

Можно ли сказать, что эти ответы раскрывают суть дела и элегантно снимают все вопросы о Большом взрыве? Если нет, то вы в хорошей компании! На самом деле есть еще много вещей, которые фридмановская модель Большого взрыва не может объяснить.

Проблема горизонта

Проанализируем тщательнее третий вопрос из списка. На рис. 5.2 проиллюстрирован тот факт, что температура излучения космического микроволнового фона почти одинакова (с точностью до пятой значащей цифры) во всех направлениях. Если бы Большой взрыв случился в одних областях пространства существенно раньше, чем в других, у этих областей было бы разное время для расширения и остывания и температура на наших картах косми-

¹⁶ Большинство важных открытий ученые не совершают единолично. Открытие и разработка теории инфляции – не исключение. Серьезный вклад внесли в нее Алан Гут, Андрей Линде, Алексей Старобинский, Сато Кацухико, Пол Стейнхардт, Энди Олбрехт, Вячеслав Муханов, Геннадий Чибисов, Стивен Хокинг, Пи Суян, Джеймс Бардин, Майкл Тернер, Александр Виленкин и другие. Много интересных подробностей вы найдете в книгах об инфляции. (См. раздел «Рекомендованная литература» в конце этой книги.)

ческого микроволнового фона варьировалась бы от места к месту не на 0,002 %, а почти на 100 %.

Но не мог ли некий физический процесс привести к выравниванию температуры гораздо позднее Большого взрыва? В конце концов, если лить холодное молоко в горячий кофе, не удивительно, что когда вы начнете пить, они станут однородно теплыми. Проблема в том, что процесс смешивания требует времени: необходимо подождать, чтобы молекулы молока и кофе перемешались. Однако у отдаленных частей Вселенной, доступных нашим наблюдениям, не было времени для такого перемешивания (еще в 60-х годах на это обратили внимание Чарлз Мизнер и его коллеги). У областей *a* и *б* (рис. 5.2), которые мы видим в противоположных направлениях на небе, не было времени для взаимодействия: даже информация, передающаяся со скоростью света, не успела бы прийти из *a* в *б*, поскольку свет от *a* прошел полпути – до точки, где находимся мы. Это значит, что фридмановская модель Большого взрыва не дает объяснения одинаковой температуры в точках *a* и *б*. Получается, что у этих областей было равное время для остывания после Большого взрыва, а отсюда следует, что они независимо испытали Большой взрыв почти в одно и то же время без какой-либо общей причины.

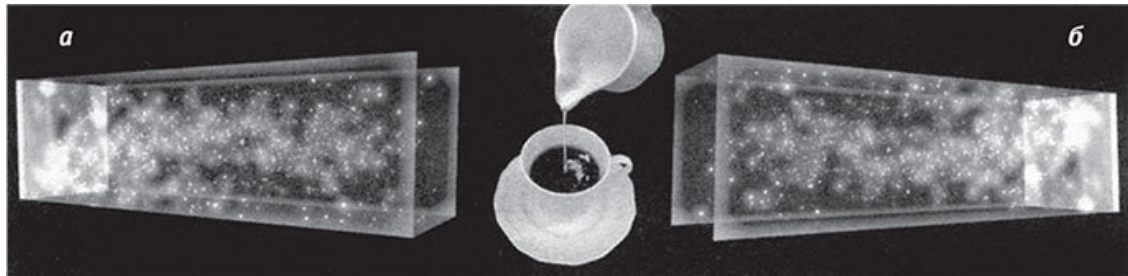


Рис. 5.2. У молекул горячего кофе и холодного молока достаточно времени для взаимодействия и выравнивания температуры. У плазмы в областях *a* и *б* не было времени для взаимодействия: даже информация, передаваемая со скоростью света, не успела бы прийти от *a* до *б*, поскольку свет от *a* достиг пока лишь тех, кто пьет кофе на полпути к *б*. Поэтому с точки зрения фридмановской модели Большого взрыва тот факт, что плазма в областях *a* и *б* тем не менее обладает одинаковой температурой, является загадкой.

Чтобы лучше понять, какое недоумение это вызвало у Алана Гута, представьте вот что. Проверив электронную почту, вы обнаружили приглашение на ланч от приятеля, а затем увидели, что все остальные ваши приятели прислали вам по письму с приглашением на ланч и что все до единого письма отправлены одновременно. Вы, вероятно, решили бы, что имеет место сговор и что появление всех этих писем вызвано общей причиной. Возможно, друзья решили устроить вам вечеринку-сюрприз. Для завершения аналогии с загадкой Алана о Большом взрыве, где области *a*, *б*, ... соответствуют вашим приятелям, добавим, что вам точно известно: ваши друзья никогда не встречались, не связывались друг с другом и не имели доступа к какой-либо общей информации до отправки вам приглашений. Тогда пришлось бы признать это невероятным совпадением. На самом деле, слишком невероятным, так что вы, вероятно, решили бы, что сделали некорректное допущение и ваши друзья все же смогли снестись. И это точно тот вывод, который сделал Алан: то, что бесконечное множество независимых областей пространства испытали Большой взрыв одновременно, не может быть беспричинным совпадением. Должен иметься некий физический механизм, вызывающий и взрыв, и синхронизацию. Один необъясненный Большой взрыв – это уже плохо; бесконечное число необъясненных Больших взрывов, вдобавок прекрасно синхронизированных, – уже ни в какие ворота не лезет.

Это *проблема горизонта*: она затрагивает то, что мы видим на своем космологическом горизонте – в самых отдаленных областях, доступных для наблюдения. Словно этого мало, Боб Дикке рассказал Алану о втором затруднении фридмановской теории Большого взрыва, которую он назвал *проблемой плоской геометрии*.

Проблема плоской геометрии

Измерения показывают, что наше пространство с высокой степенью точности плоское. Дикке считал, что это странно – если верна фридмановская модель Большого взрыва: такое состояние крайне неустойчиво, и нет оснований ожидать, что оно сохранится надолго. Например, в гл. 3 мы обсуждали неустойчивость остановившегося велосипеда, связанную с тем, что малейшее его отклонение от идеального равновесия усиливается гравитацией, так что вы сильно удивитесь, увидев ничем не поддерживаемый велосипед, который простоит вертикально несколько минут. На рис. 5.3 показаны три решения уравнений Фридмана, иллюстрирующих космологическую неустойчивость. Средняя кривая соответствует плоской Вселенной, которая остается идеально плоской и расширяется вечно. Две другие кривые начинаются почти так же, с практически неискривленного пространства через миллиардную долю секунды, и спустя миллиардную долю секунды их плотности различаются лишь в 24-й значащей цифре¹⁷. Но гравитация усиливает эти ничтожные различия, и в следующие 500 млн лет это заставляет Вселенную, описываемую нижней кривой, прекратить расширение и коллапсировать в Большом хлопке – Большом взрыве наоборот. В этой коллапсирующей в итоге Вселенной пространство приобретает такое искривление, что сумма углов треугольника оказывается гораздо больше 180° . Верхняя кривая, напротив, описывает Вселенную, искривленную таким образом, что углы в сумме дают меньше 180° . Она расширяется гораздо быстрее пограничной плоской Вселенной, и к настоящему времени ее газ должен был стать слишком разреженным, чтобы образовывать галактики, а соответствующий сценарий можно назвать «Большим замерзанием».

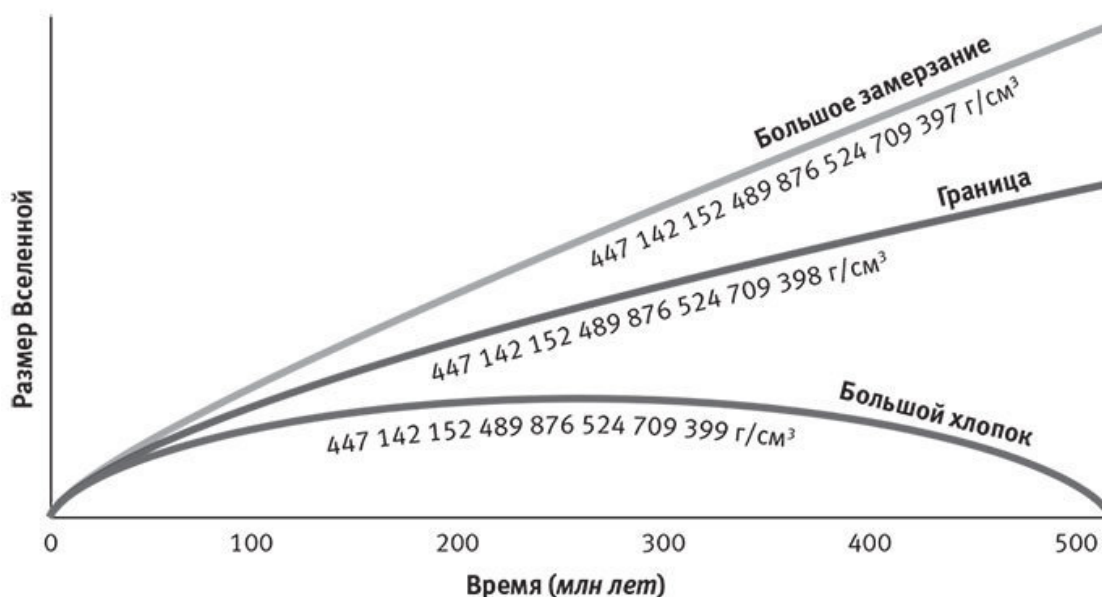


Рис. 5.3. Еще одна необъясненная загадка фридмановской модели Большого взрыва состоит в том, что Вселенная так долго существует без заметного искривления пространства,

¹⁷ Мы даже не измерили силу гравитации с точностью больше 4 знаков после запятой, так что последние 20 цифр я привожу лишь для наглядности.

ведущего к Большому хлопку или Большому замерзанию. Эти кривые соответствуют незначительно различающимся значениям плотности в момент, когда возраст Вселенной составлял одну миллиардную секунды: изменение последней из 24 цифр приводит к переходу в режим Большого хлопка или Большого замерзания прежде, чем Вселенная достигнет 4 % своего нынешнего возраста. (Благодарю Неда Райта за идею рисунка.)

Так почему наша Вселенная плоская? Если заменить 24 цифры на рис. 5.3 случайными значениями и решить уравнение Фридмана, то вероятность получить Вселенную, которая останется плоской спустя 14 млрд лет, будет меньше, чем для дротика, брошенного с Марса, попасть точно в центр мишени на Земле. Тем не менее фридмановская модель Большого взрыва не предполагает никакого объяснения этому совпадению.

Конечно, рассудил Алан Гут, должен существовать некий механизм, который вынуждает Вселенную иметь точно такую плотность, какая требуется, чтобы обеспечить исключительно плоскую геометрию в самом начале ее истории.

Как действует инфляция

Сила удвоения

Алан догадался, что с помощью одной странно звучащей посылки можно разом решить и проблему горизонта, и проблему плоской геометрии, и объяснить многое другое. Посылка такова: в некоторый момент существовала однородная капля некоей плотной субстанции, которую было очень трудно рассеять. Это значит, что если бы 1 г такой субстанции вдвое увеличился в объеме, то его плотность (отношение массы к объему) осталась бы почти такой же, и получилось бы уже 2 г материи. Сравним это с обычным веществом, таким как воздух: если он расширяется, занимая больший объем (как при выпуске сжатого воздуха из шины), общее число молекул газа, а значит, и общая масса, остается неизменным, и плотность падает.

Согласно эйнштейновской теории гравитации, крошечная нерассеиваемая капля может испытать поразительное разрастание, которое Алан назвал *инфляцией*, и фактически вызвать Большой взрыв! Как показано на рис. 5.4, уравнения Эйнштейна имеют решение, в котором каждая часть капли удваивается в размерах за одинаковые отрезки времени (такой тип роста называют *экспоненциальным*). В этом сценарии наша едва зародившаяся Вселенная росла во многом так же, как вы сами сразу после зачатия (рис. 5.5): любая ваша клетка удваивалась примерно за сутки, за счет чего их общее число в каждый новый день составляло 1, 2, 4, 8, 16 и т. д. Повторяющееся удвоение – могучая сила, и ваша мама попала бы в трудное положение, если бы вы продолжали ежедневно вдвое прибавлять в весе вплоть до своего рождения: через 9 месяцев (после 274 удвоений) вы весили бы больше, чем вся материя в наблюдаемой части Вселенной! Именно это происходит в описанном Аланом процессе инфляции: начавшись с капли размером много меньше и легче атома, он многократно удваивает ее размеры, пока она не становится массивнее, чем вся наблюдаемая Вселенная.

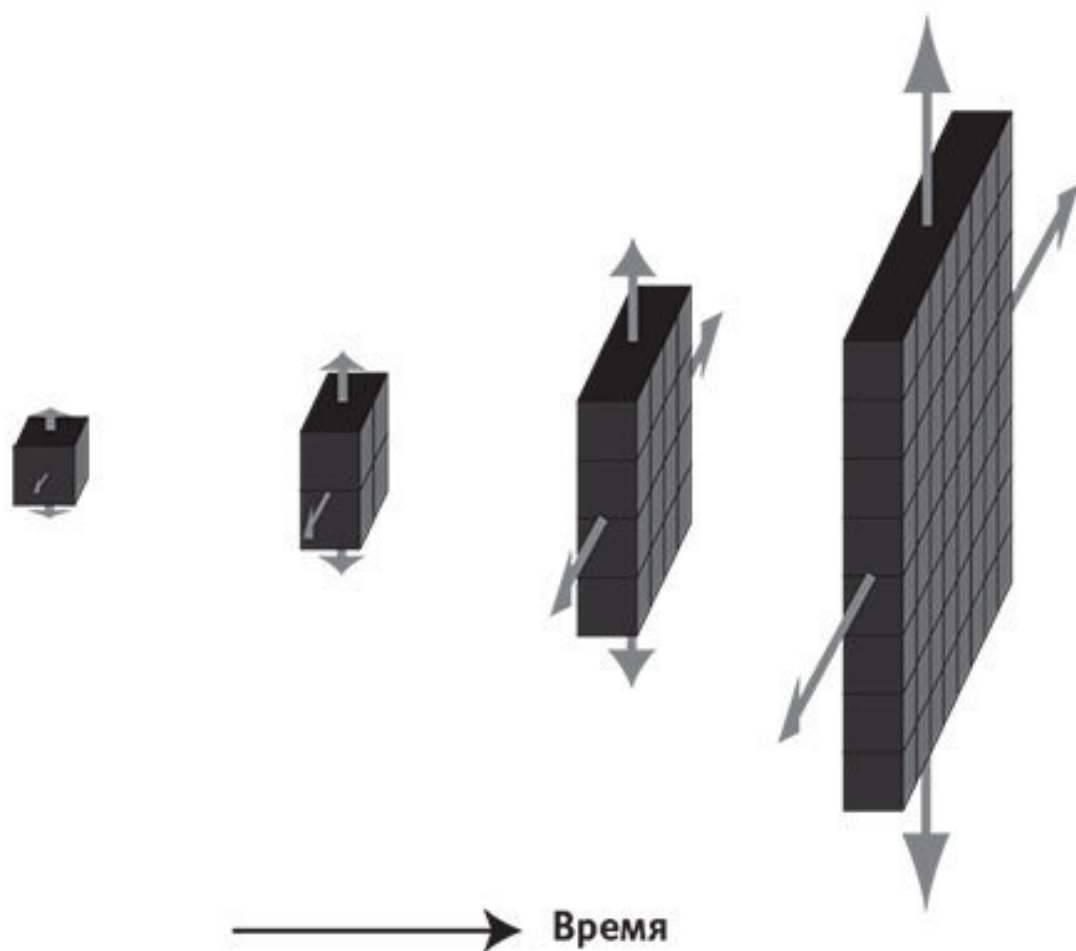


Рис. 5.4. Согласно эйнштейновской теории гравитации, нерассеиваемая субстанция (плотность которой не уменьшается при расширении) может “инфлировать”, удваиваясь в размерах через равные интервалы времени, и за доли секунды разрастается от субатомного масштаба до величины, сильно превосходящей наблюдаемую Вселенную. Так взрыв превращается в Большой взрыв. Это повторяющееся удвоение происходит во всех трех измерениях, так что удвоение в диаметре увеличивает объем в 8 раз. Здесь я изобразил только два измерения, так что удвоение диаметра учетверяет объем.

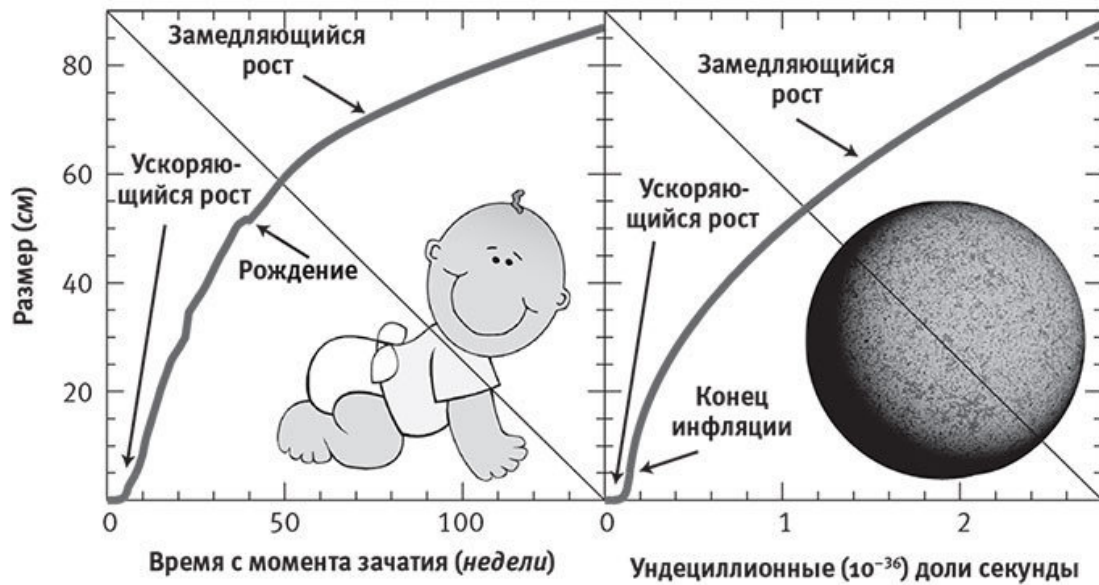


Рис. 5.5. Теория инфляции утверждает, что новорожденная Вселенная росла во многом так же, как ребенок: за фазой ускоренного роста, при которой размер удваивается через равные интервалы времени, следует более спокойная фаза замедляющегося роста. Поразительно, что вертикальная ось на обоих графиках одна и та же: в простейшей модели Вселенная прекращает инфлировать, когда примерно сравнивается в размерах с апельсином (но весит она при этом в 1081 раз больше). Наша новорожденная Вселенная удваивалась в размерах примерно в 1043 раз быстрее первых клеток зародыша.

Проблемы решены

Как видно на рис. 5.4, повторяющееся удвоение размеров автоматически приводит к повторяющемуся удвоению скорости расширения (я обозначил его стрелками). Иными словами, оно вызывает ускоряющееся расширение. Если бы вы прибавляли в весе ежедневно до своего рождения, то сначала вы расширялись бы довольно медленно (всего на несколько поперечников клетки в сутки). А ближе к концу периода созревания, превзойдя по массе наблюдаемую Вселенную и продолжая ежедневно удваиваться, вы расширялись бы с умопомрачительной скоростью – много миллиардов световых лет в день. Но если вы удваивали свою массу раз в сутки, то инфлирующая новорожденная Вселенная удваивала свою массу куда быстрее. В некоторых из самых популярных версий теории инфляции масса удваивается примерно каждую десятитриллионную от триллионной от квадриллионной (10^{-38}) доли секунды, и требуется около 260 удвоений, чтобы породить массу наблюдаемой Вселенной. Это значит, что процесс инфляции от начала до конца по человеческим меркам был почти мгновенным и потребовал не более 10^{-35} секунды (это меньше, чем требуется свету, чтобы пройти миллионную часть поперечника протона). То есть экспоненциальное расширение начинается с чего-то крошечного, почти неподвижного, и превращает его в чудовищный взрыв. Благодаря этому инфляция решает «проблему взрыва», объясняя, чем вызван наш Большой взрыв – процессом повторяющегося удвоения. Она также объясняет, почему расширение однородно, как установил Эдвин Хаббл: области, которые отстоят вдвое дальше друг от друга, разлетаются вдвое быстрее (рис. 5.4).

На рис. 5.5 показано, что экспоненциальное расширение вашего тела в конце концов сменилось более медленным ростом. Новорожденная Вселенная также прекратила инфлировать. Инфлирующий материал распался на обычную материю, которая продолжила рас-

ширяться в более спокойном режиме, двигаясь по инерции со скоростью, которую она приобрела на взрывной инфляционной стадии, и постепенно замедляясь гравитацией.

Алан Гут понял, что инфляция также решает проблему горизонта. Удаленные области *a* и *b* на рис. 5.2 были чрезвычайно близки на ранних стадиях инфляции, у них было время для взаимодействия. Затем взрывное инфляционное расширение развело *a* и *b*, и только теперь они вновь начинают вступать в контакт. Клетки носа содержат те же ДНК, что и клетки пальцев ног, поскольку у них общий предок: и те, и другие возникли в результате последовательного удвоения первой вашей клетки. Аналогично далекие области космического пространства обладают сходными свойствами, поскольку имеют общее происхождение: они рождены последовательным удвоением одной и той же капли инфлирующей материи.

Но Алан Гут понял также, что инфляция решает также проблему плоской геометрии. Представьте, что вы муравей на сфере (рис. 2.7) и способны видеть лишь небольшую область искривленной поверхности, на которой живете. Если инфляция внезапно увеличит сферу в огромное число раз, эта небольшая доступная вашему наблюдению область станет выглядеть гораздо более плоской. Квадратный сантиметр поверхности шарика для пинг-понга заметно искривлен, тогда как квадратный сантиметр поверхности Земли почти идеально плоский. Аналогично, когда инфляция колоссально расширяет наше собственное трехмерное пространство, оно становится почти идеально плоским в пределах любого конкретного кубического сантиметра. Алан доказал, что если продолжительность инфляции достаточна для порождения наблюдаемой Вселенной, она сделает пространство настолько плоским, что оно продержится до наших дней без Большого хлопка и Большого замерзания.

В действительности инфляция обычно продолжается гораздо дольше, гарантируя, что пространство до наших дней останется практически идеально плоским. Иными словами, теория инфляции еще в 80-х годах дала проверяемое предсказание: наше пространство должно быть плоским. И, как показано в двух предыдущих главах, сегодня это предсказание проверено с точностью лучше 1 %. Теория инфляции блестяще сдала экзамен.

Кто платит за бесплатный ланч?

Инфляция похожа на блестящий трюк. Интуиция подсказывает мне, что *это просто не может соответствовать законам физики*, однако при внимательном рассмотрении оказывается, что она соответствует.

Прежде всего: как может 1 г инфлирующей материи при расширении превратиться в 2 г? Ведь не может же масса возникнуть из ничего? Интересно, что Эйнштейн оставил в своей специальной теории относительности лазейку, согласно которой энергия *E* и масса *m* связаны знаменитой формулой $E = mc^2$. Здесь $c = 299\,792\,458$ м/с – скорость света, и поскольку это большое число, крошечной массе соответствует огромная энергия (при атомном взрыве в Хиросиме в энергию превратилось менее 1 г массы). Это означает, что увеличить массу чего-либо можно путем добавления энергии. Например, растягивая резиновую ленту, можно сделать ее немного тяжелее: для растяжения нужно приложить энергию, которая переходит в резину и увеличивает ее массу.

Резиновая лента обладает отрицательным давлением, поскольку нужно совершить работу, чтобы ее растянуть. Для субстанции с положительным давлением, такой как воздух, есть другая лазейка: чтобы ее сжать, надо совершить работу. Короче говоря, инфлирующая субстанция должна обладать отрицательным давлением, и оно должно быть настолько велико, чтобы энергии, требующейся для ее двукратного растяжения по объему, точно хватало для удвоения ее массы.

Еще одно загадочное свойство инфляции состоит в том, что она вызывает ускоренное расширение. В школе меня учили, что гравитация – это притягивающая сила, и если имеется сгусток расширяющегося вещества, разве не должна гравитация, напротив, *замед-*

лять его расширение, пытаясь, в конечном счете, обратить движение вспять и снова стянуть все вещество вместе? И вновь Эйнштейн приходит на помощь – на этот раз с лазейкой в общей теории относительности, которая утверждает: гравитацию вызывает не только масса, но и давление. Поскольку масса не может быть отрицательной, гравитация массы всегда притягивающая. Положительное давление тоже вызывает притягивающую гравитацию, но это означает, что отрицательное давление должно вызывать отталкивающую! Инфлирующая субстанция обладает огромным отрицательным давлением. Алан Гут подсчитал, что отталкивающее действие ее гравитации, вызванное ее отрицательным давлением, в 3 раза сильнее, чем притягивающая сила гравитации, связанная с ее массой. Так что притяжение инфлирующей субстанции отстывает.

Однако, по утверждению нобелевского лауреата по экономике Милтона Фридмана, бесплатного ланча не бывает. Так кто же платит по энергетическим счетам за галактическое великолепие, которое мы наблюдаем в нашей Вселенной? Это делает гравитация, поскольку гравитационные силы впрыскивают энергию в инфлирующую материю, растягивая ее. Но если полная энергия всего не может меняться, а массивные объекты несут в себе положительную энергию согласно формуле Эйнштейна $E = mc^2$, это значит, что с гравитацией должно быть связано соответствующее количество отрицательной энергии. Так и есть: гравитационное поле, ответственное за все гравитационные силы, обладает отрицательной энергией. И оно приобретает больше отрицательной энергии всякий раз, когда гравитация что-либо ускоряет. Рассмотрим далекий астероид. Если он движется медленно, то обладает очень небольшой кинетической энергией. Если он вдаль от земного притяжения, он также обладает очень небольшой гравитационной энергией (потенциальной энергией). Если он начнет падать на Землю, то станет приобретать все большую скорость, а с ней и кинетическую энергию, возможно, достаточную для образования при ударе огромного кратера. Поскольку гравитационное поле первоначально почти не обладало энергией, а затем высвободило всю эту положительную энергию, то само оно осталось с отрицательной.

Тут мы затронули еще один вопрос из списка в начале главы 2: *окружающая нас материя образуется почти из ничего в ходе инфляции – не нарушает ли это закон сохранения энергии?* Мы видим, что ответ на него отрицательный: вся необходимая энергия заимствуется у гравитационного поля.

Должен признаться, что хотя этот процесс не нарушает законов физики, он заставляет меня нервничать. Я просто не могу избавиться от неприятного чувства, что живу в некоей «пирамиде» космического масштаба. Если бы вы посетили Берни Мэдоффа до его ареста в 2008 году (за присвоение 65 млрд долларов), вы подумали бы, что он действительно владеет всеми роскошными вещами, которые его окружали. Однако оказалось, что он приобретал их на присвоенные деньги. Много лет он раз за разом удваивал масштаб своих операций, постоянно увеличивая объем заимствований у наивных вкладчиков. Инфляционная Вселенная делает точно то же самое: удваивается в размерах и раз за разом покрывает свои энергетические долги, заимствуя у гравитационного поля еще больше энергии. По аналогии с Мэдоффом инфляционная Вселенная эксплуатирует внутреннюю неустойчивость системы для создания видимого блеска из ничего. Я лишь надеюсь, что наш мир окажется более устойчивым, чем мир Мэдоффа...

Благодатный дар

Инфляция на бис

Как и у многих успешных научных теорий, у инфляции был непростой старт. Ее первое твердое предсказание, что пространство плоское, казалось несовместимым с множеством наблюдательных данных. Теория гравитации Эйнштейна гласит, что пространство может

быть плоским, лишь если плотность материи равна определенному критическому значению. Символом Ω обозначают, во сколько раз плотность Вселенной выше критической плотности, и инфляция предсказывает, что $\Omega = 1$. Однако когда я был аспирантом, оценки плотности по обзорам галактик еще оставляли желать лучшего и из них следовало меньшее значение $\Omega \approx 0,25$. Это все сильнее смущало Алана Гута, который на каждой конференции настаивал, что $\Omega = 1$, несмотря на то, что говорили коллеги-экспериментаторы. Гут продолжал стоять на своем, и справедливо. Открытие темной энергии показало, что мы учитывали лишь около четверти плотности, а когда учли и темную энергию, то получили значение $\Omega = 1$ с погрешностью менее 1 % (табл. 4.1).

Открытие темной энергии резко повысило доверие к теории инфляции и по другой причине: мы уже не можем отрицать возможность существования нерассеиваемой субстанции как бессмысленной или противоречащей физике, поскольку темная энергия – именно такая субстанция! Эпоха инфляции, породившая наш Большой взрыв, закончилась 14 млрд лет назад, однако началась новая эпоха инфляции – под влиянием темной энергии. Теперь она протекает, как в рапиде: Вселенная удваивается в размерах не за долю секунды, а за 8 млрд лет. Так что нынешние содержательные дискуссии касаются не вопроса, была ли инфляция, а лишь того, имела ли она место один раз или дважды.

«Посев» первичных флуктуаций

Отличительный признак успешной научной теории: она дает больше, чем в нее закладывается. Алан Гут показал, что за счет одного-единственного предположения (о крошечной капле труднорассеиваемой субстанции) можно решить сразу три космологических парадокса: проблему взрыва, проблему горизонта и проблему плоской геометрии. Выше мы видели, как теория инфляции дала сверх заложенного в нее: она предсказала $\Omega = 1$, что точно подтвердилось два десятилетия спустя. Но это не все.

Предыдущую главу мы закончили вопросом, каковы истоки галактик и крупномасштабной структуры Вселенной. К всеобщему удивлению, теория инфляции ответила и на этот вопрос. И какой это был ответ! Впервые идею предложили два русских физика, Геннадий Чибисов и Вячеслав Муханов. Когда я впервые услышал о ней, я счел ее абсурдной. Сейчас я считаю ее главным кандидатом на роль самого радикального и красивого синтеза идей в истории науки.

Если кратко, то первичные космические флуктуации появились благодаря квантовой механике – теории микромира (гл. 7, 8). Но еще в колледже я узнал, что квантовые эффекты существенны лишь для очень малых объектов вроде атомов. Так какое отношение они могут иметь к самым крупным объектам из тех, которые мы изучаем, – к галактикам? Один из самых красивых аспектов теории инфляции состоит в том, что она связывает самые малые и самые большие масштабы: на ранних стадиях инфляции область пространства, которая ныне содержит Млечный Путь, была гораздо меньше атома, так что квантовые эффекты могли иметь существенное значение. И это было так: принцип неопределенности Гейзенберга в квантовой механике (гл. 7) не позволяет никакой субстанции, в том числе инфлирующей материи, быть совершенно однородной. Если вы попытаетесь сделать ее однородной, квантовые эффекты вынудят ее волноваться, и однородность будет нарушена. Когда инфляция растягивает субатомную область до размеров всей наблюдаемой Вселенной, флуктуации плотности, которые впечатала в нее квантовая механика, также растягиваются до размеров галактик и более. Обо всем остальном позаботилась гравитационная неустойчивость, усилившая флуктуации с ничтожного уровня 0,002 %, обеспеченного квантовыми флуктуациями, до величественных галактик, их скоплений и сверхскоплений, украшающих теперь ночное небо.

И главное здесь то, что все можно точно подсчитать. Кривая спектра мощности (рис. 4.2) – это теоретическое предсказание одной из простейших инфляционных моделей, и я нахожу замечательным ее согласие со всеми наблюдениями. Инфляционные модели также предсказывают три измеренных космологических параметра, приведенных в табл. 4.1. Я уже упоминал одно из этих предсказаний: $\Omega = 1$. Два других касаются характерных особенностей кластеризации, которыми мы займемся в последней главе. В простейших инфляционных моделях амплитуда первичных флуктуаций (обозначена в таблице буквой Q) зависит от того, насколько быстро инфлирующая область удваивается в размерах, и при времени удвоения около 10^{-38} секунды предсказание совпадает с наблюдаемым значением $Q \approx 0,002\%$.

Теория инфляции также дает интересные предсказания для параметра «наклона» первичной кластеризации (в таблице он обозначен n). Взгляните на зазубренную кривую на рис. 5.6, которую математики называют самоподобной, фрактальной или масштабно-инвариантной. Все эти термины, по сути, означают, что если вы замените изображение увеличенным фрагментом его же, то не найдете различий. Поскольку повторять этот трюк можно сколько угодно, ясно, что и триллионная часть кривой должна выглядеть так же, как вся она в целом. Интересно, что, согласно предсказаниям теории инфляции, новорожденная Вселенная тоже почти наверняка была масштабно инвариантной в том смысле, что нельзя было обнаружить различий между случайно выбранным кубическим сантиметром и значительно увеличившимся его фрагментом. Почему? В эпоху инфляции увеличение Вселенной было, по сути, эквивалентом ожидания, пока все вокруг еще раз удвоится в размерах. Так что, совершив путешествие во времени в эпоху инфляции, вы увидели бы, что статистические свойства флуктуаций были масштабно инвариантными – то есть не изменялись во времени. Теория инфляции предсказывает, что это происходит по простой причине: локальные физические условия, порождаемые квантовыми флуктуациями, также мало изменяются во времени, поскольку инфлирующая субстанция не испытывает существенных изменений плотности или других параметров.

Параметр наклона n в табл. 4.1 характеризует близость инфляционной Вселенной к масштабной инвариантности. Он сопоставляет уровень кластеризации на больших и малых масштабах и определен так, что значение $n = 1$ соответствует идеальной масштабной инвариантности (одинаковая кластеризация во всех масштабах), $n < 1$ означает, что кластеризация сильнее в больших масштабах, а $n > 1$ – в малых масштабах. Муханов и другие первопроходцы теории инфляции предсказывали, что значение n должно быть очень близко к 1. Когда я с другом Тедом просиживал ночи с компьютером (гл. 4), мы занимались как раз получением самой точной в то время оценки параметра n . Наш результат был $n = 1,15 \pm 0,29$, что подтверждало еще одно предсказание теории инфляции.

Однако ситуация с параметром n оказалась еще интереснее. Поскольку инфляция в конце концов прекратилась, инфлирующая субстанция должна была постепенно, пусть и очень медленно, разрежаться в ходе инфляции – в противном случае ничто не менялось бы, и инфляция продолжалась бы вечно. В простейших инфляционных моделях убывание плотности приводит к тому, что амплитуда порождаемых флуктуаций также убывает. Это значит, что флуктуации, возникающие позднее, должны иметь меньшую амплитуду. Но позднее возникшие флуктуации к моменту окончания инфляции не успевают сильно растянуться, и, значит, сейчас флуктуации в меньших масштабах должны быть меньшими. Эти рассуждения приводят к предсказанию $n < 1$. Для более конкретного прогноза необходима модель, описывающая, из чего состоит инфлирующая субстанция. Простейшая такая модель, впервые предложенная Андреем Линде и называемая на профессиональном языке «скалярным полем с квадратичным потенциалом» (это, по сути, гипотетический родственник магнитного поля), дает предсказание $n = 0,96$. Теперь снова заглянем в табл. 4.1. Как видите, современ-

ные измерения n стали в 60 раз точнее, чем во времена «волшебной горошины». Согласно последним данным, $n = 0,96 \pm 0,005$, что исключительно близко к предсказанному значению.

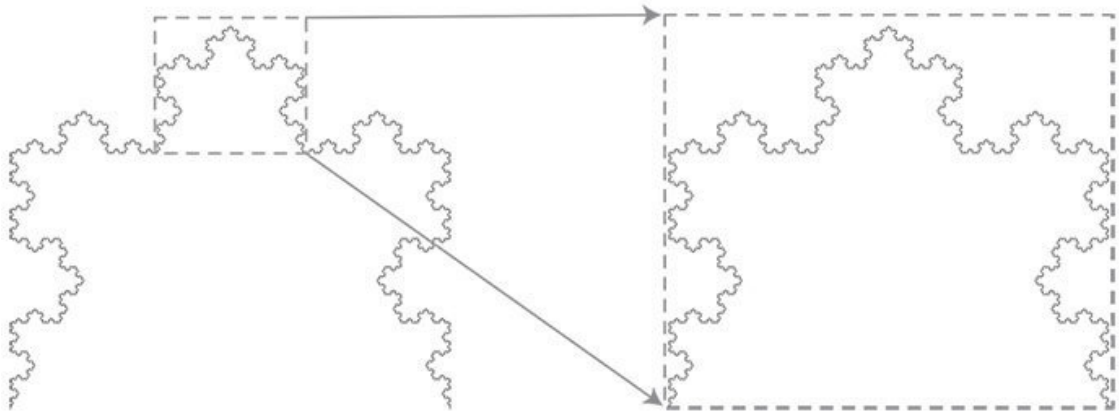


Рис. 5.6. Эта похожая на снежинку фигура, называемая кривой Коха в честь шведского математика Хельге фон Коха, обладает замечательным свойством: она совпадает с увеличенной частью самой себя. Теория инфляции предсказывает, что новорожденная Вселенная была подобным образом неотличима от увеличенного фрагмента самой себя, по крайней мере в приближенном статистическом смысле.

С годами эти измерения будут уточняться. У нас также появилась возможность измерить несколько дополнительных параметров, для которых теория инфляции давала предсказания. Например, кроме интенсивности и цвета, свет обладает свойством поляризации. Пчелы видят ее и используют для навигации. Хотя человеческий глаз ее не замечает, темные очки пропускают свет, лишь если он определенным образом поляризован. Многие популярные модели инфляции предсказывают специфический характер поляризации излучения космического микроволнового фона. Квантовые флуктуации в ходе инфляции порождают *гравитационные волны*, вибрации самой ткани пространства-времени, а они, в свою очередь, характерным образом искажают рисунок космического микроволнового излучения. Если эти искажения удастся зарегистрировать в экспериментах, то, думаю, их признают неопровержимым доказательством того, что инфляция имела место.

Итак, пока нельзя утверждать, что Большой взрыв был вызван инфляцией. Однако, я считаю, надо признать: теория инфляции оказалась успешнее, чем Алан Гут мог себе представить, придумывая ее. Она согласуется с точными измерениями и является теорией нашего космического происхождения, которая наиболее серьезно воспринимается космологическим сообществом.

Вечная инфляция

Пока наш разговор о теории инфляции не очень отличается от обсуждения жизненного цикла любой успешной физической идеи: новая теория разрешает старые проблемы. Затем следуют предсказания. Экспериментальное подтверждение. Широкое признание. Переписанные учебники. Складывается впечатление, что теорию инфляции пора проводить на заслуженный отдых: «Благодарим тебя, теория инфляции, за самоотверженную службу по увязыванию некоторых неясностей в отношении истоков Вселенной. Теперь настало время уйти на пенсию в специально выделенные разделы учебников, а нас оставить в покое – работать над иными, новейшими, более волнующими нас проблемами, которые пока не разрешены». Однако, подобно упорному стареющему профессору, инфляция отказывается ухо-

дить в отставку! Помимо того, что она продолжает плодоносить в своей области космологии ранней Вселенной, она преподносит сюрпризы, для некоторых моих коллег нежелательные.

Неостановимая

Первым потрясением стало то, что инфляция в общем случае не желает останавливаться, вечно порождая пространство. В рамках конкретной модели это обнаружили Андрей Линде и Пол Стейнхардт. Элегантное доказательство существования этого эффекта дал Алекс Виленкин, профессор из Университета им. Тафтса – тот самый, который пригласил меня сделать доклад, усыпивший Алана Гута. В студенческие годы на родной Украине он, несмотря на то, что был предупрежден о «последствиях», отказался по требованию КГБ свидетельствовать против однокурсника, который критически высказывался о властях. Хотя Алекса приняли в аспирантуру физического факультета МГУ, престижную для советского физика, он так и не получил разрешения переехать в Москву. Не было у него и возможности получить какую-либо нормальную работу. Год он прослужил ночным сторожем в зоопарке, а после ему удалось покинуть страну. Всякий раз, когда меня раздражают бюрократы, я вспоминаю историю Алекса, и она превращает мое раздражение в благодарное понимание того, как незначительны мои проблемы. Возможно, его непоколебимость объясняет, почему он продолжает открывать вещи, которые отвергают другие великие ученые.

Алекс обнаружил, что вопрос о том, где и когда инфляция завершается, очень тонкий и интересный. Мы знаем, что инфляция заканчивается по крайней мере в некоторых местах, поскольку 14 млрд лет назад она закончилась в той части пространства, где мы сейчас обитаем. Это означает, что некий физический процесс может избавить от инфлирующей субстанции, заставив ее распасться на обычную неинфлирующую материю, которая продолжает расширяться, кластеризуется и, в конце концов, образует галактики, звезды и планеты. Известно, что радиоактивность делает вещества неустойчивыми, заставляя их распадаться на другие вещества, так что можно предположить, что инфлирующей субстанции присуща подобная нестабильность. Это означает, что есть некий временной масштаб, период распада, в течение которого распадется половина инфлирующей субстанции. Как показано на рис. 5.7, в этом случае возникает интересное противостояние между удвоением, связанным с инфляцией, и уполовиниванием, вызванным распадом. Чтобы инфляция работала, побеждать должно первое, так что общий инфлирующий объем должен со временем расти. А значит, время удвоения инфлирующей субстанции должно быть меньше периода ее полураспада. На рисунке показан пример, где инфляция утраивает размер пространства за то время, пока распадается треть инфлирующей субстанции, и так раз за разом. Как видите, общий объем пространства, в котором идет инфляция, продолжает удваиваться без ограничений. Но параллельно за счет распада инфлирующей субстанции продолжают постоянно возникать, также удваиваясь в объеме, неинфлирующие области пространства, где инфляция прекратилась и могут образовываться галактики.

Неостановимость инфляции оказалась гораздо более общим свойством, чем первоначально предполагалось. Андрей Линде, которому принадлежит авторство термина «вечная инфляция», обнаружил, что даже простейшие предложенные им модели инфляции вечно инфлируют за счет элегантного механизма, связанного с квантовыми флуктуациями, породившими наши первичные космологические флуктуации.

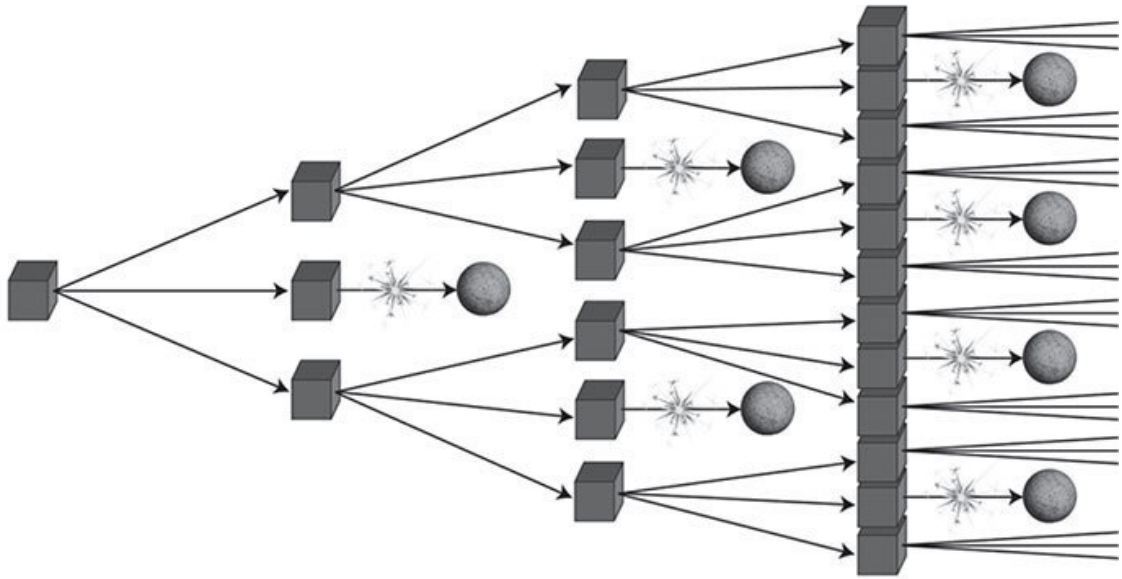


Рис. 5.7. Схематическая иллюстрация вечной инфляции. На каждый объем инфлирующей субстанции (кубик), который распадается, превращаясь в неинфлирующую вселенную с Большим взрывом, подобную нашей, приходится два других инфлирующих объема, которые не распадаются. Так что общий инфлирующий объем удваивается, а не утраивается. Из-за этого никогда не прекращающегося процесса число вселенных с Большим взрывом на каждом шагу удваивается: 1, 2, 4 и т. д. Поэтому то, что мы называем нашим Большим взрывом (одна из вспышек), – это не начало всего, а конец инфляции в нашей части пространства.

Ученые, проанализировав очень широкий класс инфляционных моделей, выяснили, что почти все они приводят к вечной инфляции. Хотя большая доля этих расчетов сложна, рис. 5.7 отражает суть того, почему инфляция в общем случае вечна: прежде всего, чтобы инфляция работала, инфлирующая субстанция должна расширяться быстрее, чем распадаться, и это автоматически делает общее количество инфлирующей материи растущим без ограничений.

Открытие вечной инфляции радикально изменило наше понимание того, что является наибольшим масштабом в космосе. Теперь я ничего не могу поделать с тем, что наша прежняя история начинает звучать как сказка: «Давным-давно была инфляция. От инфляции случился Большой взрыв. Большой взрыв породил галактики». Рис. 5.7 поясняет, почему эта история наивна: опять повторяется характерная человеческая ошибка – считать все, известное нам сегодня, всем существующим. Мы видим, что даже наш Большой взрыв – это лишь малая часть некоей величественной древовидной структуры, которая продолжает расти. Иными словами, то, что мы называем нашим Большим взрывом, не было подлинным *началом*, а скорее было *концом* – окончанием инфляции в некоторой части пространства.

Как образовать бесконечное пространство с конечным объемом

Ребенок в гл. 2 интересовался, тянется ли космос вечно. Вечная инфляция дает недвусмысленный ответ: *пространство не просто огромно – оно бесконечно*. И с бесконечным числом галактик, звезд и планет.

Рассмотрим данное представление. Хотя схематический характер рис. 5.7 не позволяет показать это ясно, мы все еще говорим об одном связном пространстве. Прямо сейчас (мы вернемся к смыслу слов «прямо сейчас») некоторые части этого пространства очень быстро расширяются, поскольку содержат инфлирующую материю, другие расширяются гораздо медленнее, поскольку инфляция в них прекратилась, а третьи, например область

внутри нашей Галактики, не расширяются вовсе. Так закончилась ли инфляция? Исследования инфляции, о которых я упоминал, показывают, что и да, и нет. Она закончилась и не закончилась в следующем смысле:

1. Почти во всех частях пространства инфляция в конце концов завершится Большим взрывом, подобным нашему.
2. Тем не менее останутся некоторые точки пространства, где инфляция не завершится никогда.
3. Общий инфлирующий объем вечно возрастает, удваиваясь через постоянные интервалы времени.
4. Общий постинфляционный объем, содержащий галактики, также вечно возрастает, удваиваясь через постоянные интервалы времени.

Но означает ли это, что пространство действительно бесконечно уже сейчас? Это приводит нас к еще одному вопросу из гл. 2: *как бесконечное пространство может быть создано за конечное время?* Это кажется невозможным. Но инфляция подобна магическому шоу, где кажущиеся невозможными вещи случаются за счет творческого использования законов физики. В действительности инфляция может сделать даже нечто лучшее, и я думаю, это лучший фокус из всех: *она может породить бесконечный объем внутри конечного объема!* Она может начать с чего-либо меньшего, чем атом, и породить внутри него бесконечное пространство, содержащее бесконечно много галактик, не влияя при этом на окружающее пространство.

На рис. 5.8 показано, как инфляция проделывает этот фокус. Изображен срез пространства и времени, на котором правый и левый края соответствуют точкам, где инфляция никогда не закончится, а нижний край соответствует времени, когда вся область между этими двумя точками инфлирует. Нарисовать расширяющееся трехмерное пространство трудно, так что на рисунке я буду игнорировать расширение и два из трех измерений пространства (ни то, ни другое осложняющее обстоятельство не влияет на суть). Рано или поздно инфляция завершится везде, за исключением левого и правого краев. Искривленная граница показывает точное время ее завершения в различных местах. Как только инфляция завершается в конкретной области, там начинается разворачиваться описанная в двух предыдущих главах традиционная история Большого взрыва с горячим космическим «термоядерным реактором», который в итоге остывает и дает начало атомам, галактикам и, возможно, наблюдателям вроде нас.



Рис. 5.8. Инфляция может порождать бесконечные вселенные внутри того, что со стороны выглядит как объем субатомного размера. Наблюдатель внутри увидит, что *a* одновременно с *b*, а *a* – с *c*. Бесконечная U-образная поверхность, где заканчивается инфляция, –

для него момент нуль, а бесконечная U -образная поверхность, где формируются атомы, – момент 400 тыс. лет, и т. д. Для простоты здесь проигнорировано расширение пространства, а также два из его трех измерений.

А вот и суть фокуса: согласно общей теории относительности, наблюдатель, живущий в одной из галактик, будет воспринимать пространство и время иначе, нежели я определил их с помощью осей координат на своем рисунке. Наше физическое пространство не содержит встроенных сантиметровых отметок, которые есть на линейках. Нет у Вселенной и заранее установленных часов. Вместо этого любой наблюдатель может определить свои собственные мерные стержни и часы, которые, в свою очередь, определяют его представления о пространстве и времени. Эта идея восходит к одной из догадок Эйнштейна: наблюдатели могут воспринимать пространство и время по-разному. Например, относительной может быть одновременность.

Представьте, что вы отправляете электронное письмо подруге-астронавту на Марс: «Привет! Как у тебя дела?» Через десять минут она получает ваше сообщение, переданное ей со скоростью света посредством радиоволн. Пока вы ждете, приходит письмо из Нигерии с предложением задешево купить «Ролекс». Еще через десять минут вы получаете ответ с Марса: «Все хорошо, но тоскую по Земле».

Теперь вопрос: что произошло раньше – вы получили спам или ваша подруга-астронавт отправила вам сообщение? Поразительно, но, как догадался Эйнштейн, на этот простой вопрос нет простого ответа. Оказывается, правильный ответ зависит от скорости того, кто на него отвечает! Например, если я, пролетая мимо Земли к Марсу на космическом корабле, перехватываю эти три сообщения и анализирую ситуацию, то по моим бортовым часам ваша подруга на Марсе отправила сообщение раньше, чем вы получили спам. Если же я лечу в обратную сторону, то, по-моему, спам вы получили раньше. Вы сбиты с толку? То же самое было с большинством коллег Эйнштейна, когда он представлял свою теорию относительности, однако бесчисленные эксперименты с тех пор подтвердили, что время устроено именно так. Единственный случай, когда мы можем твердо сказать, что событие на Марсе произошло раньше, чем событие на Земле, это когда сообщение с Марса, отправленное после марсианского события, приходит на Землю раньше земного события.

Теперь применим все это к ситуации на рис. 5.8. Наблюдателю вне данной области может показаться разумным определить пространство как горизонтальное направление, а время как вертикальное (см. рисунок), так что четыре события, обведенных кружками, произошли в следующем порядке: a , b , c , d . Более того, событие b определено случилось раньше d , поскольку можно представить себе отправку сообщения от b к d . Аналогично событие a определено произошло прежде c . Но можно ли быть вполне уверенным, что a случилось раньше b , притом что два эти события произошли слишком далеко друг от друга, чтобы свет успел дойти от одного до другого? Ответ Эйнштейна – нет. Для наблюдателя, живущего в одной из этих галактик, разумнее принять, что инфляция закончилась в определенный зафиксированный момент времени, поскольку конец инфляции соответствует его Большому взрыву, так что для него события a и b одновременны. Как видите, поверхность «конца инфляции» не горизонтальна. Она бесконечна, поскольку изгибается наподобие буквы U у левого и правого краев рисунка, где, как мы договорились, инфляция никогда не заканчивается. Это значит, что с точки зрения данного наблюдателя его Большой взрыв произошел в один момент в истинно бесконечном пространстве! Откуда эта бесконечность? Она проникла через бесконечность доступного будущего времени, поскольку пространственное измерение данного наблюдателя все сильнее загибается вверх.

Аналогичным образом наблюдатель придет к выводу, что его пространство бесконечно и в последующие времена. Например, если он поставит эксперимент по изучению косми-

ческого микроволнового фона, чтобы получить «детские фотографии» своей 400-тысячелетней вселенной, плазменная поверхность, изображение которой он получит, будет соответствовать поверхности на рисунке, где протоны и электроны объединяются в прозрачные (невидимые) атомы водорода. Поскольку, как вы видите, это также бесконечная U -образная поверхность, наблюдатель сочтет свою 400-тысячелетнюю вселенную бесконечной. Он также будет считать события v и z одновременными, так как они лежат на U -образной поверхности, где формируются первые галактики, и т. д. Поскольку вложить друг в друга можно бесконечное число U -образных кривых, наблюдатель будет считать, что его вселенная бесконечна и в пространстве, и во времени, хотя для внешнего наблюдателя вся она вписывается в исходную область субатомного размера. Пространство расширяется внутрь, не требуя увеличения места, которое оно занимает при наблюдении извне: Эйнштейн позволил пространству растягиваться и порождать дополнительный объем из ничего. На практике эта бесконечная вселенная может выглядеть извне как черная дыра субатомного размера. Надо сказать, что Алан Гут и его коллеги изучили спорную возможность проделать этот фокус, получив в лаборатории нечто, выглядящее снаружи как маленькая черная дыра, а изнутри как бесконечная вселенная. Вопрос, действительно ли такое возможно, пока открыт. Если желаете стать демиургом, рекомендую инструкции Брайана Грина для «амбициозных творцов вселенных» из его книги «Скрытая реальность».

Выше мы взяли за инфляцию из-за неудовлетворительных ответов, которые фридмановская теория Большого взрыва дает на фундаментальные вопросы. Поэтому закончим ответами, которые дает теория инфляции:

– **Что стало причиной нашего Большого взрыва?**

– Многократное удвоение в размерах взрывчатой субатомной капли инфлирующей материи.

– **Произошел ли наш Большой взрыв в одной точке?**

Почти: он начался в области пространства размером много меньше атома.

– **Где именно в пространстве произошел наш Большой взрыв?**

– В указанной крошечной области. Инфляция, однако, растянула ее примерно до размеров грейпфрута, растущего столь быстро, что последующее расширение сделало его больше всего пространства, которое мы наблюдаем сейчас.

– **Как бесконечное пространство может быть порождено за конечное время?**

– Инфляция порождает бесконечное число галактик и продолжается вечно. Согласно общей теории относительности, наблюдатель в одной из галактик будет видеть пространство и время по-своему, воспринимая пространство как имеющее бесконечные размеры уже в момент окончания инфляции.

Подведем итоги. Теория инфляции радикально трансформировала представления о нашем космическом происхождении, заменив неуклюжие ответы, которые давала фридмановская модель Большого взрыва, простым механизмом, порождающим наш Большой взрыв почти из ничего. Теория инфляции дала нам много больше, чем мы надеялись: пространство, которое не просто огромно, а действительно бесконечно – в нем бесконечное число галактик, звезд и планет. И это лишь верхушка айсберга.

Резюме

- Фридмановская модель испытывает серьезные трудности с объяснением самых ранних стадий Большого взрыва...
- ...а теория инфляции разрешает их все и объясняет механизм возникновения Большого взрыва.
- Инфляция объясняет, почему пространство плоское (это подтверждено наблюдениями с погрешностью около 1 %),
- и почему отдаленные области нашей Вселенной выглядят в среднем одинаково во всех направлениях (с флуктуациями от места к месту величиной всего 0,002 %).
- Теория инфляции объясняет происхождение этих флуктуаций квантовыми флуктуациями, которые были сначала растянуты инфляцией от микроскопических до макроскопических масштабов, а затем усилены гравитацией, благодаря чему образовались современные галактики и крупномасштабная структура Вселенной.
- Теория инфляции объясняет даже космическое ускорение (отмечено Нобелевской премией 2011 года) – как перезапуск инфляции в рапиде с удвоением размеров Вселенной не за долю секунды, а за 8 млрд лет.
- Теория инфляции предполагает, что наша Вселенная росла во многом подобно ребенку: за фазой ускоренного роста, когда размеры удваивались с фиксированными интервалами во времени, последовала фаза замедления роста.
- То, что мы называем Большим взрывом, было не началом, а скорее концом – концом инфляции в нашей области пространства. В других областях инфляция обычно продолжается вечно.
- В общем случае теория инфляции предсказывает, что наше пространство не просто огромно, а бесконечно и заполнено бесконечным числом галактик, звезд и планет, начальные условия для которых сформированы случайными квантовыми флуктуациями.

Глава 6. Добро пожаловать в мультиверс

Если б расчищены были врата восприятия, всякое предстало бы человеку, как оно есть – бесконечным. Ибо человек замуравал себя так, что видит все чрез узкие щели пещеры своей.

Уильям Блейк

«Бракосочетание Неба и Ада»¹⁸

Бесконечны лишь Вселенная и человеческая глупость; причем насчет Вселенной я не уверен.

Приписывается Альберту Эйнштейну

Готовы ли вы к спорным темам? Наука, с которой мы до сих пор знакомились в этой книге, сегодня в основном не вызывает разногласий. Но теперь мы вступаем в дискуссионную область: многие мои коллеги-физики будут горячо агитировать «за» или «против» идей, о которых сейчас пойдет речь.

Мультиверс I уровня

Существует ли точная ваша копия, читающая мою книгу и решившая отложить ее, не закончив это предложение? Человек, живущий на планете Земля с туманными горами, плодородными полями и растущими городами, – планете, находящейся в Солнечной системе вместе с другими 7 планетами? Жизнь этого человека была идентична вашей вплоть до настоящего момента, когда, решив продолжить чтение, вы породили расхождение между своими жизнями.

Вероятно, вы сочтете идею странной, и, должен признаться, у меня была такая же инстинктивная реакция. И все же нам, по-видимому, придется с ней смириться, поскольку простейшая и наиболее популярная сейчас космологическая модель предсказывает, что такой человек действительно существует в галактике на расстоянии около 10^{1029} м. Для этого утверждения даже не требуется спекулятивных допущений современной физики – достаточно того, что пространство бесконечно и более или менее однородно заполнено материей. Ваш двойник – это просто предсказание теории вечной инфляции, которая согласуется со всеми современными наблюдательными данными и служит основой большинства расчетов и моделей, представляемых на космологических конференциях.

Что такое Вселенная?

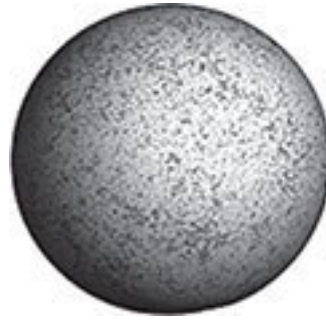
Прежде чем говорить о других вселенных, важно пояснить, что мы подразумеваем под собственной. Вот терминология, которой я буду пользоваться:

Физическая реальность – это все, что существует.

Наша Вселенная – это часть физической реальности, которую мы в принципе можем наблюдать.

Если пренебречь квантовыми осложнениями, которыми мы займемся в гл. 7, следующее определение Вселенной эквивалентно приведенному.

¹⁸ Пер. С. Степанова. – Прим. пер.



Наша Вселенная – это сферическая область пространства, в которой свету хватит времени, чтобы дойти до нас за 14 млрд лет, прошедших с момента нашего Большого взрыва.

В предыдущей главе мы назвали эту область *наблюдаемой Вселенной*. Более научнооб-разный синоним, популярный у астрономов, – *объем внутри космологического горизонта*¹⁹. Астрономы любят говорить и о нашем хаббловском объеме, размер которого примерно таков же и определяется как область, внутри которой галактики удаляются медленнее, чем свет.

Имея в виду, что могут существовать другие вселенные, я считаю излишне высокомер-ным называть нашу собственную – *этой* Вселенной, так что я постараюсь вовсе избегать данного термина. Но это, конечно, дело вкуса, например, ньюйоркцы называют свой город просто «Городом», а американцы и канадцы говорят о своем бейсбольном чемпионате как о «Мировой серии».

Хотя эти определения могут показаться разумными, имейте в виду, что некото-рые авторы применяют эти термины иначе. Кое-кто использует выражение «эта Вселен-ная» (которого я избегаю) для обозначения всего, что существует, и в таком случае по опре-делению не может быть никаких параллельных вселенных.

Теперь, когда мы дали определение нашей Вселенной, хорошо бы узнать, насколько она велика. Вселенная – это сферическая область с центром на планете Земля. Материя у края Вселенной, от которой свет едва успел дойти до нас за 14 млрд лет, находится сейчас на расстоянии 5×10^{26} м²⁰. Насколько сегодня известно, Вселенная содержит около 10^{11} галак-тик, 10^{23} звезд, 10^{80} протонов и 10^{89} фотонов.

Это, конечно, огромное количество материи, но может ли ее в дальнем космосе быть еще больше? Теория инфляции предсказывает, что так и есть. Вселенная вашего двойника, если она существует, – сфера такого же размера, центр которой где-то очень далеко от нас. Мы не можем ее увидеть и не можем ни с чем в ней взаимодействовать, поскольку ни свет, ни какая-либо другая информация из нее еще не успели до нас дойти. Это простейший при-мер параллельных вселенных. Я предпочитаю называть эту разновидность – отдаленную область пространства размером с нашу Вселенную – параллельной вселенной I уровня. Все параллельные вселенные I уровня образуют мультиверс I уровня. В табл. 6.1 даны опреде-ления всех разновидностей мультиверсов, о которых говорится в книге, и поясняется, как они взаимосвязаны.

Само наше определение *Вселенной* будто подразумевает, что понятие наблюдаемой Вселенной относится к небольшой части огромного мультиверса, который навсегда оста-нется в ведении метафизики. Эпистемологическая граница между физикой и метафизи-

¹⁹ В русском обиходе до недавнего времени широко применялся термин «Метагалактика», однако в последние годы его используют реже. – *Прим. пер.*

²⁰ Как мы видели в гл. 3, это более 14 млрд световых лет: свет преодолел большее расстояние из-за расширения про-странства.

кой определяется исходя из возможности экспериментальной проверки теории, а не из того, насколько странной теория кажется и ссылается ли она на ненаблюдаемые сущности. Экспериментальные прорывы, ставшие возможными благодаря развитию технологий, расширяют горизонты физики, которые охватывают все более абстрактные (и в момент их появления контринтуитивные) представления, например: сферическая вращающаяся Земля, электромагнитное поле, замедление времени на высоких скоростях, квантовые суперпозиции, искривленное пространство и черные дыры. Становится все яснее, что теории, основанные на современной физике, в действительности могут быть предсказательными, эмпирически проверяемыми и фальсифицируемыми, несмотря на то, что они включают в себя понятие мультиверса. В оставшейся части этой книги мы будем исследовать целых четыре уровня параллельных вселенных, и лично для меня самый интересный вопрос состоит не в том, существует ли мультиверс (поскольку существование его I уровня не вызывает сомнений), а в том, сколько внутри него уровней.

На что похожи параллельные вселенные I уровня?

Допустим, инфляция действительно имела место и сделала наше пространство бесконечным. В таком случае существует бесконечное число параллельных вселенных I уровня. Более того, как показано на рис. 5.8, бесконечное пространство в момент его образования было заполнено материей, которая, как и в нашей Вселенной, постепенно образовывала атомы, галактики, звезды и планеты. Это значит, что большинство параллельных вселенных I уровня имеет в общих чертах такую же космологическую историю, как и наша Вселенная. Однако большинство их отличается от нашей Вселенной в деталях, поскольку их начальные состояния немного различались. Причины этого, как я говорил в предыдущей главе, в том, что первичные флуктуации, ответственные за появление всех космических структур, были порождены квантовыми флуктуациями, которые во всех отношениях совершенно случайны.

Физическое описание нашего мира традиционно делится на две части: с чего все началось и как все изменяется. Иными словами, мы имеем начальные условия и законы физики, указывающие, как начальные условия меняются с течением времени. Наблюдатели в параллельных вселенных I уровня открывают точно такие же законы физики, как и мы, однако с иными начальными условиями. Так, частицы начинают движение из немного иных мест и двигаются со слегка отличными скоростями. Именно небольшие различия определяют, что в конце концов случится в соответствующих вселенных: какие области пространства превратятся в галактики, а какие станут межгалактическими пустотами, у каких звезд будут планеты, на каких из них появятся динозавры и на каких они погибнут из-за столкновения с астероидом, и т. д. Иначе говоря, вызванные квантовыми явлениями различия между параллельными вселенными, со временем усиливаясь, порождают совершенно разные истории. Короче, студенты в параллельных вселенных I уровня будут изучать одни и те же законы на занятиях по физике, но разные факты на занятиях по истории.

Но существуют ли вообще эти студенты? Кажется совершенно невероятным, чтобы ваша жизнь была бы точно повторена, поскольку для этого требуется очень много совпадений: Земля должна образоваться, на ней должна развиться жизнь, должны вымереть динозавры, ваши родители должны встретиться, вам должно прийти в голову прочесть эту книгу и т. д. Но вероятность того, что все это случится, определенно не равна нулю, поскольку именно это фактически случилось здесь, в нашей Вселенной. Если бросить игральные кости достаточное число раз, гарантированно произойдут даже самые маловероятные вещи. При бесконечном числе параллельных вселенных I уровня, порожденных инфляцией, квантовые флуктуации, по сути, и бросают кости бесконечное число раз, со стопроцентной уверенностью обещая, что ваша жизнь повторится. На самом деле таких повторений бесконечно много, поскольку и ничтожная доля бесконечного числа остается бесконечным числом.

Но бесконечное пространство содержит не только ваши точные копии. В нем гораздо больше людей, которые очень похожи на вас. Так что если бы вам удалось встретиться с человеком, чей облик идеально похож на ваш, вполне вероятно, что он говорил бы на языке, который вы не смогли бы понять, и прожил бы жизнь, совершенно не похожую на вашу. Но среди всех ваших бесконечных подобий там, на других планетах, есть и некто, разговаривающий по-английски, живущий на планете, идентичной Земле, и с жизнью, неотличимой от вашей. Этот человек чувствует то же, что и вы. И все же могут быть крайне незначительные отличия в том, как движутся частицы в мозге вашего двойника – отличия слишком малые, чтобы быть в данный момент ощутимыми, но достаточные, чтобы в следующую секунду заставить его отложить книгу, тогда как вы продолжите чтение, и с этого момента ваши жизни начнут расходиться.

Возникает интересный философский вопрос, которым мы займемся в гл. 11. Если действительно существует много ваших копий с одинаковым прошлым и воспоминаниями, это разрушает традиционное понятие детерминизма: вы не сможете предсказать собственное будущее, даже если обладаете полным знанием всей прошлой и будущей истории космоса! Дело в том, что нет способа определить, какой из копий являетесь *вы* (все они чувствуют себя *вами*). И все же с некоторого момента их жизни обычно расходятся, поэтому большее, что вы можете сделать – это предсказать вероятности событий, которые могут с вами случиться.

Короче говоря, в бесконечном пространстве, порожденном инфляцией, случается все, что может случиться согласно законам физики. И случается все бесконечное число раз. Это значит, что существуют параллельные вселенные, где вы никогда не получали штраф за парковку, где вы носите другое имя, где вы выиграли в лотерею миллион, где Германия победила во Второй мировой войне, где по Земле продолжают бродить динозавры, где, наконец, Земля вовсе не образовалась. Хотя каждый из этих вариантов имел место в бесконечном числе вселенных, некоторые случились в большей их доле, и осмысление этого факта приводит к интереснейшим выводам. Мы поговорим об этом в гл. 11.

Параллельные вселенные ненаучны?

До сих пор я рассказывал здесь в основном о вещах, которые, надеюсь, вы находили вполне разумными. Конечно, кое-какие научные открытия, которые я описывал, в свое время считались спорными, но сегодня они общепризнанны. Тем не менее в этой главе, вероятно, все кажется слегка ненормальным. А рассуждения о наших копиях могут показаться просто безумием. Так что прежде чем лезть дальше в эту кроличью нору, следует сделать паузу. Прежде всего, действительно ли научно говорить о таких вещах, которые мы не можем даже наблюдать, или я пересек черту и занялся чистым философствованием?

Философ Карл Поппер популяризировал максиму, ныне широко признанную: «Если нечто не фальсифицируемо, то оно ненаучно». Физика – это постоянная проверка математических теорий с помощью наблюдений: если теория в принципе не может быть проверена, то чисто логически ее невозможно фальсифицировать, а значит, она ненаучна. Отсюда вытекает, что надежда оказаться научными есть лишь у *теорий*. Так мы приходим к очень важному тезису:

Параллельные вселенные – это не теория, а предсказание некоторых теорий.

Таких, как теория инфляции. Параллельные вселенные (если они существуют) – это объекты, а объекты не бывают научными, так что параллельные вселенные могут быть научны не более, чем галлюцинации.

Поэтому нам следует переформулировать свои сомнения в терминах теорий. Это приводит к ключевому вопросу: *являются ли теории, предсказывающие существование ненаблюдаемых сущностей, нефальсифицируемыми и поэтому ненаучными?*

Вот здесь мне становится действительно интересно, поскольку на данный вопрос есть четкий ответ: *чтобы теория была фальсифицируемой, не обязательно иметь возможность наблюдать и проверять все ее предсказания, достаточно хотя бы одного*. Рассмотрим следующие аналогии:

Теория	Предсказание
Общая теория относительности	Внутренние области черных дыр
Теория инфляции (гл. 5)	Параллельные вселенные I уровня
Теория инфляции + ландшафт (гл. 6)	Параллельные вселенные II уровня
Квантовая механика без коллапса (гл. 8)	Параллельные вселенные III уровня
Гипотеза внешней реальности (гл. 10)	Параллельные вселенные IV уровня

Поскольку общая теория относительности (ОТО) Эйнштейна успешно предсказала многие *наблюдаемые* явления (например характер движения Меркурия вокруг Солнца, искривление света под влиянием гравитации и гравитационное замедление часов), мы считаем ее успешной научной теорией и всерьез принимаем такие ее предсказания, которые касаются вещей, коих мы наблюдать *не можем*, например пространства, продолжающегося внутри черной дыры под ее горизонтом событий²¹, а также того, что (в противоположность ранним недоразумениям) на самом горизонте ничего необычного не происходит. Аналогично, успешные предсказания теории инфляции, описанные в двух предыдущих главах, делают ее научной теорией, а значит можно воспринимать всерьез и другие ее предсказания: проверяемые (например относительно того, что будет измерено в будущих экспериментах по исследованию космического микроволнового фона) и кажущиеся непроверяемыми, вроде существования параллельных вселенных. Последние три примера в таблице выше относятся к теориям, которые я разберу ниже, и предсказывают дополнительные типы параллельных вселенных.

Еще одна важная особенность физических теорий состоит в том, что если вам нравится одна из них, придется «покупать» ее в полной комплектации. Нельзя сказать: «Мне нравится, как ОТО объясняет орбиту Меркурия, но я не люблю черные дыры, так что хочу обойтись без них». Вы не можете «купить» ОТО без черных дыр, в отличие от кофе без кофеина. ОТО – это жесткая математическая конструкция, которая не допускает точных настроек; вам придется либо принять *все* ее предсказания, либо с нуля изобрести другую математическую теорию, которая согласуется со всеми успешными предсказаниями ОТО и одновременно предсказывает, что черных дыр не существует. Это оказывается чрезвычайно сложным делом, и до сих пор подобные попытки оканчивались ничем.

Так вот, и параллельные вселенные – не аксессуар к теории вечной инфляции. Они часть пакета, и если они вам не нравятся, придется найти другую математическую теорию, которая решит проблему взрыва, проблему горизонта, проблему плоской геометрии, а также сгенерирует первичные космологические флуктуации, но при этом не будет предсказывать параллельных вселенных. Это оказалась крайне сложно. Вот почему все больше моих коллег, часто нехотя, начинают всерьез воспринимать параллельные вселенные.

²¹ Хотя в принципе вы можете погрузиться в черную дыру и наблюдать, что происходит внутри (если ее приливные силы прежде не превратят вас в «спагетти»), вы не сможете поделиться своими открытиями в научном журнале, поскольку, отправляясь туда, вы получаете билет в один конец.

Аргументы в пользу параллельных вселенных I уровня

Итак, мы усвоили важную мысль: не нужно чувствовать вину за разговоры о параллельных вселенных в этой книге, несмотря на то, что она задумана как научная. Однако теория не становится верной только оттого, что она научна, так что разберем доводы в пользу параллельных вселенных.

Ранее мы убедились, что мультиверс I уровня, включая ваших двойников, – это логическое следствие вечной инфляции. Мы также знаем, что теория инфляция – самая популярная сейчас в научном сообществе теория, описывающая раннюю Вселенную, и что инфляция обычно бывает вечной, а значит, порождает мультиверс I уровня. Иными словами, лучшим аргументом в пользу мультиверса I уровня являются свидетельства в пользу инфляции. Доказывает ли это существование ваших двойников? Конечно, нет. На данный момент мы не можем быть совершенно уверены, что инфляция вечна, или даже что она вообще имела место. К счастью, изучение инфляции сейчас очень привлекательно и в теоретическом, и в экспериментальном отношении, так что в ближайшие годы мы скорее всего получим новые данные за или против теории вечной инфляции (и, следовательно, за или против мультиверса I уровня).

До сих пор мы вели разговор в контексте теории инфляции. Но действительно ли мультиверс I уровня неразрывно связан с инфляцией? Нет, это не так. Чтобы мультиверса I уровня вообще не существовало, не должно существовать никакого пространства за пределами области, доступной нашим наблюдениям. У меня нет ни одного коллеги, который выступал бы за столь малый размер пространства. Придерживающийся такого мнения подобен страусу, спрятавшему голову в песок и утверждающему, что существует лишь то, что он видит. Все мы признаем существование вещей, которых не видим, но смогли бы увидеть, если бы мы переместились или подождали (например, находящихся за горизонтом кораблей). Объекты за нашим космологическим горизонтом имеют такой же статус, поскольку наблюдаемая Вселенная ежегодно увеличивается примерно на световой год, и до нас доходит свет из все более далеких областей²².

А что можно сказать об аргументах в пользу существования наших двойников? Если мы проанализируем приведенные выше рассуждения, то увидим: свойство мультиверса I уровня, выражающееся словами «Случается все, что может случиться», вытекает из двух отдельных логических допущений, и оба они могут быть корректными и без инфляции:

1. Пространство и материя бесконечны. Первоначально существовало бесконечное пространство, заполненное горячей расширяющейся плазмой.
2. Случайные зародыши; первоначально имелся механизм, действующий так, что в любой области могли возникнуть любые возможные первичные флуктуации, кажущиеся случайными.

Проанализируем эти два предположения. Я думаю, второе из них весьма разумно, вне зависимости от инфляции. Согласно нашим наблюдениям, случайного вида первичные флуктуации существуют, так что мы знаем, что *некий* механизм их породил. Мы тщательно измерили их параметры, используя космический микроволновый фон и карты галактик, и обнаружили, что их статистические свойства соответствуют тому, что в теории вероятно называют *гауссовым случайным полем*, и это удовлетворяет предположению № 2. Более того, если инфляции не было и далекие области пространства не могли бы взаимодейство-

²² Если космологическое расширение продолжает ускоряться (пока это открытый вопрос), наблюдаемая Вселенная в конце концов перестанет расти: галактики, находящиеся дальше определенного расстояния, рано или поздно станут удаляться быстрее света и навсегда окажутся невидимыми для нас.

вать друг с другом (*рис. 5.2*), этот механизм гарантированно «бросал бы игральные кости» независимо в каждой области.

Что можно сказать о предполагаемой бесконечности пространства и материи? Прежде всего, бесконечное пространство, достаточно равномерно заполненное материей, было стандартным предположением общепринятой космологии задолго до изобретения инфляции, и сегодня это часть так называемой стандартной космологической модели. Тем не менее это предположение (и вытекающее из него существование мультиверса I уровня) считается спорным. Отчасти эти соображения привели в 1600 году на эшафот Джордано Бруно. Тем, кто публиковался относительно недавно (в их числе Джордж Эллис, Джефф Брандрит, Жауме Гаррига и Александр Виленкин), костер уже не грозил, но все же давайте критически подойдем к допущению бесконечности пространства и бесконечности материи.

Хотя простейшая модель пространства, предложенная еще Евклидом, бесконечна (*гл. 2*), эйнштейновская общая теория относительности предлагает различные варианты того, как именно пространство может быть конечным. Если пространство свернуто как гиперсфера (*рис. 2.7*), общий объем такой гиперсферы должен быть по меньшей мере стократно больше той ее части, которую мы можем наблюдать – нашей Вселенной. Иначе невозможно объяснить, почему видимая часть пространства такая плоская, что эксперименты по изучению космического микроволнового фона не обнаруживают никакой кривизны. Иными словами, даже если мы живем в конечном пространстве вроде гиперсферы, все равно существуют по крайней мере сотни параллельных вселенных I уровня.

А что можно сказать относительно конечного пространства торообразного – как бублик – типа (*гл. 2*)? Геометрия такого пространства плоская, но, начав движение в определенном направлении, в конце концов возвращаешься в исходную точку. Похожее пространство смоделировано в компьютерных играх, в которых можно вылететь за границу игрового поля и сразу же появиться с другой его стороны, так что, если заглянуть достаточно далеко вперед, вы увидите перед собой собственный затылок, а во всех направлениях – бесконечно много ваших регулярно повторяющихся копий, будто вы оказались в комнате с зеркальными стенами. Если у нашего пространства такие свойства, то какой минимальный размер оно может иметь? Ясно, что оно должно быть гораздо больше нашей Галактики, поскольку в телескопы мы не видим бесконечного числа копий Млечного Пути, выстроившихся аккуратными рядами. Но если бы размер составлял, скажем, 10 млрд световых лет, этот тест уже не сработал бы: мы не увидели бы ближайшей копии нашей Галактики, поскольку 10 млрд лет назад ее не существовало. Есть еще более точный тест: мы можем найти узнаваемый объект вроде яркой галактики в 5 млрд световых лет от нас, а затем поискать тот же объект в 5 млрд световых лет в противоположном направлении. Такие поиски проводились и не дали результата. Наиболее чувствительный тест из всех заключается в использовании самого далекого объекта, который мы можем увидеть, – космического микроволнового фона, на котором можно искать паттерны в противоположных направлениях (*рис. 6.1*). Многие исследовательские группы, включая меня с Анжеликой, пытались это сделать, но ничего не нашли. Кроме того, если пространство имеет конечный объем, в нем разрешены лишь некоторые частоты возмущений, подобно тому, как воздух во флейте может вибрировать лишь на определенных частотах. Это вносит в спектр мощности микроволнового фона определенные искажения, которые Анжелика и другие ученые не обнаружили. Короче говоря, все еще сохраняется возможность того, что пространство конечно. Однако выбор моделей с конечным пространством сильно ограничен наблюдениями, и все пока допустимые пространства имеют объем, сопоставимый с объемом Вселенной или превышающий его. Более того, при наличии именно сейчас лишь одной Вселенной возникает необъяснимое совпадение: почему именно сейчас? Ведь ранее, когда свет дошел до нас только из небольшой части пространства, вселенных должно было иметься больше одной.

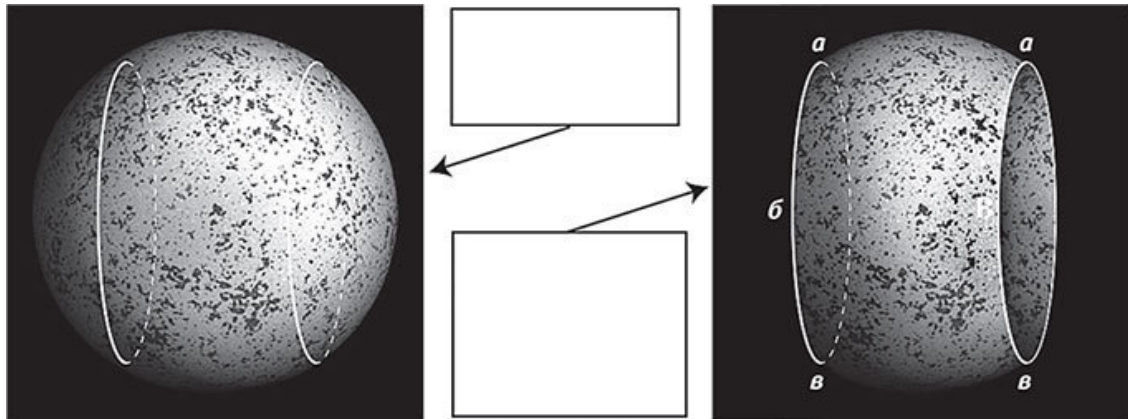


Рис. 6.1. Если в тороидальной вселенной вы пролетите через правую окружность (справа), то немедленно окажетесь в соответствующей точке на левой окружности: покинув точку *a*, вы попадете в точку *a*, и т. д. В действительности две точки *a* являются одной физической точкой. Значит, паттерны космического микроволнового фона вдоль этих двух окружностей должны казаться нам похожими, поскольку в действительности они представляют собой одно и то же.

Но довольно о бесконечном пространстве. Что можно сказать о бесконечном количестве материи? До появления теории инфляции это допущение часто оправдывалось ссылками на *принцип Коперника*, гласящий, что люди не занимают особенного места в космосе: если галактики есть вокруг нас, значит, галактики должны быть везде.

Что говорят об этом данные последних наблюдений? Например, насколько однородно распределение материи в больших масштабах? В модели *островной вселенной*, где пространство бесконечно, а вся материя заключена в конечной его области, почти все члены мультиверса I уровня были бы мертвыми, состоящими лишь из пустого пространства. В прошлом такие модели были популярны. Первоначально островом была Земля и небесные тела, видимые невооруженным глазом, а в начале XX века островом стала известная нам часть галактики Млечный Путь. Модель островной вселенной недавно была окончательно опровергнута наблюдениями. Трехмерные карты распределения галактик, о которых шла речь в предыдущей главе, показали, что впечатляюще крупномасштабные структуры (группы, скопления, сверхскопления галактик, стены) на больших масштабах уступают место унылой однородности, и никаких целостных структур размером более примерно 1 млрд световых лет не существует.

Чем крупнее структуры мы наблюдаем, тем более однородным кажется заполнение Вселенной материей (рис. 4.6). Если отбросить конспирологические теории, согласно которым Вселенная специально создана так, чтобы нас дурачить, наблюдения недвусмысленно говорят нам: пространство, каким мы его знаем, тянется далеко за границы нашей Вселенной и наполнено галактиками, звездами и планетами.

Где находятся параллельные вселенные I уровня?

Итак, если параллельные вселенные I уровня существуют, то это просто области пространства размером с нашу Вселенную, которые удалены настолько, что свет от них еще не успел достичь нас. Но если мы в центре Вселенной, означает ли это, что мы занимаем некое особое место в пространстве? Представьте себе, что вы идете по большому полю в сильном тумане, которой ограничивает видимость до 50 м, и чувствуете себя так, будто находитесь в центре туманной сферы, за пределами которой, как за краем нашей Вселенной, вам ничего

не видно. Но это не означает, что вы в особенном месте, поскольку всякий, кто находится в это время на поле, ощутит себя в центре собственной туманной сферы. Точно так же любой наблюдатель, находящийся в любом месте пространства, обнаружит себя в центре своей вселенной. Кроме того, между соседними вселенными не существует физических границ, как нет особой 50-метровой границы в тумане – поле и туман имеют одинаковые свойства и там, и здесь. Более того, вселенные могут перекрываться, как и туманные сферы. Некто на поле в 30 м от вас может одновременно видеть и вас, и области, которые вам не видны. Так и обитатель галактики в 5 млрд световых лет от нас будет видеть в своей вселенной и Землю, и области космоса, лежащие вне нашей Вселенной.

Если вечная инфляция (или что-либо другое) породила бесконечное число таких параллельных вселенных, насколько далеко находится ближайшая точная копия нашей собственной? Согласно классической физике, Вселенная может быть устроена бесконечным числом способов, так что нет гарантии, что вы когда-либо найдете идентичную. С классической точки зрения, существует бесконечно много вариантов даже для расстояния между двумя частицами, так что требуется бесконечно много десятичных цифр, чтобы его задать. Однако очевидно, что существует лишь конечное число возможных вселенных, которые человеческая цивилизация смогла бы когда-либо отличить друг от друга: в наших мозгах и компьютерах можно хранить лишь конечное количество информации. Более того, мы можем выполнять измерения лишь с конечной точностью. Современный рекорд точности измерения количественной величины в физике составляет 16 десятичных цифр.

Квантовая механика ограничивает это разнообразие даже на фундаментальном уровне. В следующих двух главах мы узнаем, что квантовая механика вносит в природу внутреннюю размытость, которая лишает смысла разговоры о местоположении объектов с точностью, превосходящей определенный уровень. Вследствие этого ограничения общее число способов, которыми может быть организована наша Вселенная, становится конечным. Согласно консервативной оценке с поправкой в большую сторону, существует не более $10^{10^{118}}$ способов, которыми может быть устроена вселенная размером с нашу²³. Еще более консервативное ограничение, известное как голографический принцип, предполагает, что объем размером с нашу Вселенную может быть устроен не более чем $10^{10^{124}}$ способами²⁴. В противном случае в него пришлось бы поместить столько вещества, что образовалась бы черная дыра, превосходящая его по размерам.

[illegible]

²³ Это крайне консервативная оценка, просто учитывающая все возможные квантовые состояния, которые Вселенная (объем в пределах горизонта) может занимать, если ее температура не превышает 10^8 градусов. Хотя полноценный расчет требует обращения к квантовой механике, число 10^{118} можно грубо оценить как количество протонов, которое *принцип запрета Паули* позволяет упаковать во вселенную при такой температуре (наша Вселенная содержит лишь около 10^{80} протонов). Если каждая из 10^{118} ячеек может быть либо занята, либо свободна, то существует $2^{10^{118}} \sim 10^{10^{118}}$ вариантов.

²⁴ В показателе степени стоит площадь нашей Вселенной, измеренная в *планковских единицах*. В книгах Ленни Сасскинда и Брайана Грина, которые приведены в разделе «Рекомендованная литература», подробно описывается голографический принцип и его разработка на основе идей Герарда 'т Хофта, Ленни Сасскинда, Чарльза Торна, Рафаэля Буссо, Якоба Бекенштейна, Стивена Хокинга, Хуана Малдасены и других ученых.

его в принципе нельзя записать: в нем больше цифр, чем есть атомов в нашей Вселенной. (Я всегда подозревал, что «Гугл» – амбициозная компания. Когда я побывал там на конференции, я узнал, что сотрудники называют корпоративный кампус «Гуголплексом».)

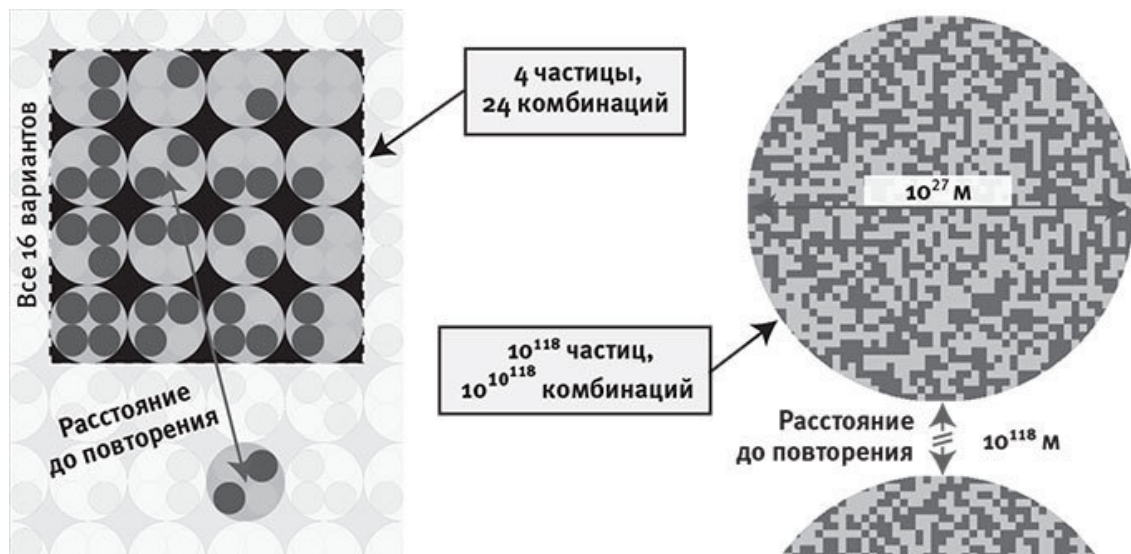


Рис. 6.2. В игрушечной вселенной, где в 4 местах может находиться по одной частице двух типов, существует всего 2^4 возможных комбинаций (вверху слева). Это означает, что в мультиверсе I типа, состоящем из таких вселенных, в среднем нужно проверить 16 вселенных, чтобы найти повторение одной заданной. Если наша Вселенная подобным же образом содержит 10^{118} частиц, которые можно скомбинировать 10^{1018} различными способами, придется посетить около 10^{1018} параллельных вселенных, прежде чем отыщется идентичная копия.

Хотя число 10^{1018} настолько велико, что его не назовешь даже астрономическим, оно ничтожно в сравнении с бесконечностью. Это означает, что если вечная инфляция породила пространство, содержащее бесконечно много параллельных вселенных I уровня, среди них найдутся все возможные варианты. В частности, вам придется проверить в среднем около 10^{1018} вселенных, прежде чем вы найдете копию любой вселенной (рис. 6.2). Так что если вы станете путешествовать по прямой линии, пока не наткнетесь на ближайшую копию нашей Вселенной, то пройденный вами путь составит примерно 10^{1018} диаметров Вселенной. Если же вы станете искать во всех направлениях, то расстояние до ближайшей нашей копии выразится примерно тем же числом, и это будет примерно то же самое, что 10^{1018} м – таково забавное математическое поведение двойных степеней (степеней в показателях степени)²⁵.

Существенно ближе, на расстоянии около 10^{1091} м, должна найтись сфера радиусом 100 световых лет, идентичная сфере с центром на Земле, где все, что мы будем воспринимать в течение ближайшего столетия, окажется идентичным тому, что воспринимают там наши двойники. Примерно в 10^{1029} м от нас должна найтись ваша идентичная копия. На самом

²⁵ Если вы любите математику, обратите внимание на то, что 10^{1018} диаметров Вселенной $\approx 10^{1018} \times 10^{27} \text{ м} = 10^{1018+27} \text{ м} \approx 10^{1045}$. Если в поисках ближайшей копии вы захотите искать во всех направлениях, вам придется исследовать физический объем, содержащий 10^{1018} вселенных, радиус которого превосходит нашу Вселенную в $(10^{1018}) = 10^{10} \approx 10^{1017,53} \approx 10^{1018}$ раз.

деле, ваши копии, по-видимому, должны быть гораздо ближе, поскольку процессы образования планет и биологической эволюции, итог которых оказался в вашу пользу, везде одинаковы. В объеме одной лишь нашей Вселенной должно быть не менее 10^{20} планет.

Мультиверс II уровня

Помните, я назвал теорию инфляции благодатным даром? Когда начинает казаться, что она не может предсказать что-либо более радикальное, чем уже предсказано, ей это удастся. Если вам было трудно переварить огромный мультиверс I уровня, попробуйте представить себе бесконечное множество таких мультиверсов, причем в некоторых могут действовать совершенно иные законы физики. Андрей Линде, Александр Виленкин, Алан Гут и их коллеги показали, что именно это обычно предсказывает теория инфляции. (А мы будем называть это мультиверсом II уровня.)

Много вселенных в одном пространстве

Как вообще физика может позволять такое безумие? Вспомните (рис. 5.8), что инфляция умудряется породить бесконечный объем внутри конечного. На рис. 6.3 показано, что нет причин, согласно которым инфляция не могла бы осуществить это в нескольких примыкающих друг к другу объемах. В результате получилось бы несколько бесконечных областей (мультиверсов I уровня) – при условии, что инфляция вечна и никогда не заканчивается на границах между этими объемами. Это означает, что если вы живете в одном из мультиверсов I уровня, посещение соседнего невозможно: инфляция продолжает порождать разделяющее вас пространство быстрее, чем вы можете его преодолевать. Я представил, как разговариваю с детьми, расположившимися на заднем сиденье моей ракеты:

- Папа, мы уже приехали?
- Нам остался один световой год.
- Папа, мы уже приехали?
- Нам осталось два световых года.

Иными словами, хотя эти другие части мультиверса II уровня находятся в том же пространстве, что и мы, они более чем бесконечно далеки от нас в том смысле, что мы никогда их не достигнем, даже если будем вечно путешествовать со скоростью света. Напротив, сколь угодно отдаленных частей нашего мультиверса I уровня, в принципе, можно достичь, если у вас хватит терпения и если космологическое расширение замедляется²⁶.

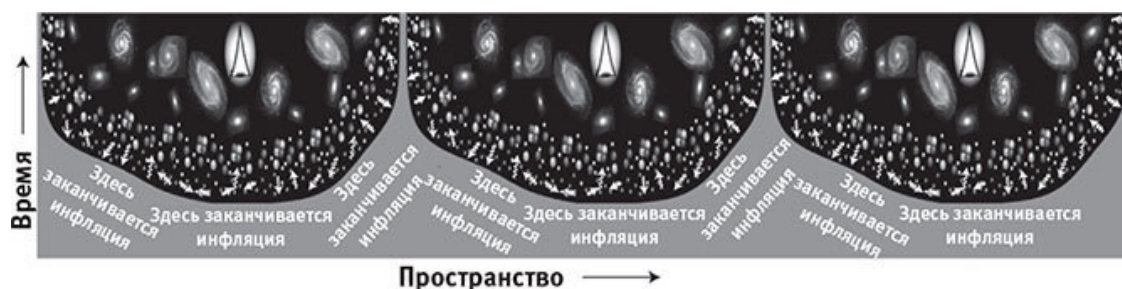
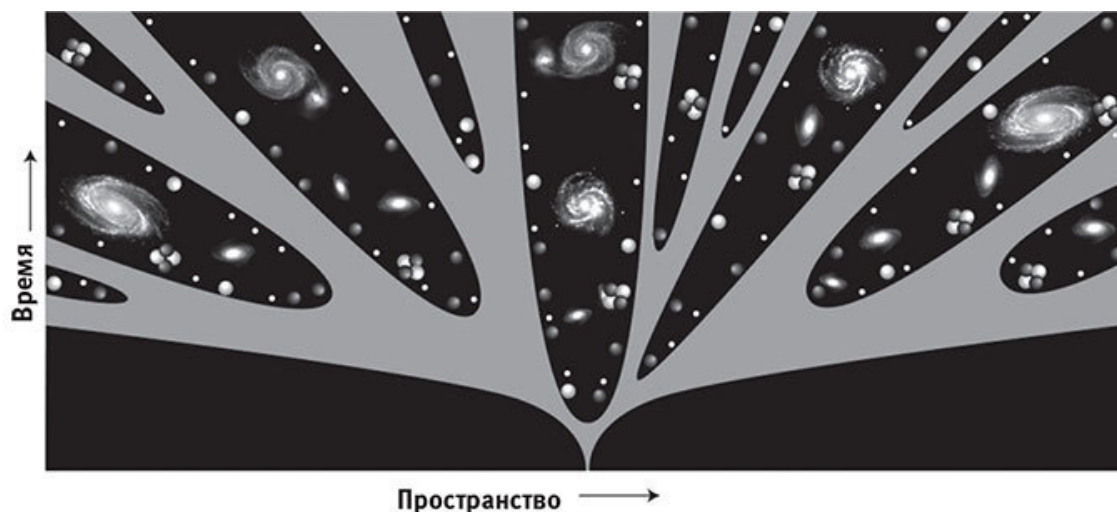


Рис. 6.3. Если вечная инфляция порождает три бесконечные области посредством механизма, изображенного на рис. 5.8, то путешествовать между ними невозможно,

²⁶ Если темная энергия останется вокруг нас и продолжит вызывать ускоренное космологическое расширение, то даже большинство параллельных вселенных I уровня окажется навсегда недоступным для нас, поскольку пространство между нами будет расширяться быстрее, чем свет сможет его преодолевать. Мы еще недостаточно понимаем темную энергию, чтобы сказать, будет ли это так.

поскольку инфляция порождает пространство между вами и местом назначения быстрее, чем вы можете его преодолевать.



На рис. 6.3 я сделал упрощение, проигнорировав тот факт, что пространство расширяется. Вечно инфлирующие области я обозначил тонкими вертикальными полосками, разделяющими *U*-образные мультиверсы I уровня. В действительности они будут быстро расширяться и в конце концов инфляция в части пространства внутри них прекратится, породив дополнительные *U*-образные области. Так еще интереснее: мультиверс II уровня оказывается древоподобной структурой (рис. 6.4). Любая инфлирующая область продолжает быстро расширяться, но инфляция рано или поздно в различных ее частях заканчивается, порождая *U*-образные области, и каждая из них представляет собой бесконечный мультиверс I уровня. Это древо продолжает расти вечно, создавая бесконечное число таких *U*-образных областей, и все они вместе образуют мультиверс II уровня. Завершение инфляции превращает инфлирующую субстанцию внутри каждой области в частицы, которые затем собираются в атомы, звезды и галактики. Алан Гут любит называть мультиверсы I уровня «карманными вселенными», поскольку они аккуратно заполняют небольшие участки «кроны» древа.

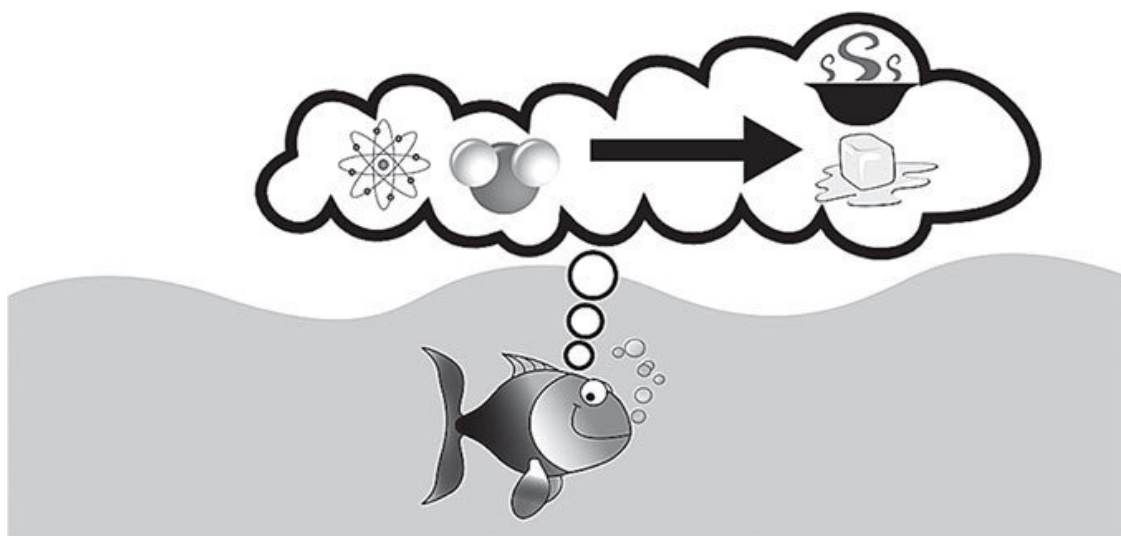


Рис. 6.5. Может ли пространство замерзнуть? Рыба может думать, что вода – пустое пространство, поскольку это единственная известная ей среда. Но если умная рыба выведет

физические законы, управляющие молекулами воды, она поймет, что у этих уравнений есть три решения: “фазы” жидкой воды, которую она знает, а также пара и льда, которых она никогда не видела. Аналогичным образом то, что мы считаем пустым пространством, может быть средой с 10500 или большим числом фаз, из которых мы знакомы лишь с одной.

Многообразие

Выше я упомянул, что мультиверс II уровня может содержать бесконечные области с совершенно различными законами физики. Но это кажется абсурдным: как могут физические законы позволять существовать иным физическим законам? Ключевая идея состоит в том, что *фундаментальные законы физики*, которые по определению соблюдаются везде и всегда, могут порождать сложные физические состояния, в которых *эффективные законы физики*, воспринимаемые разумными наблюдателями, изменяются от места к месту.

Если бы вы были рыбой и провели всю жизнь в океане, у вас могла бы возникнуть ошибочная догадка о том, что вода – это пустое пространство. То, что людям кажется свойствами воды, скажем, сопротивление, которое она оказывает при плавании, вы могли бы ошибочно интерпретировать как фундаментальный закон физики: «Рыба, начавшая равномерное движение, в конце концов останавливается, если не будет взмахивать плавниками». Вы, вероятно, не догадывались бы, что вода может существовать в трех фазах – твердой, жидкой и газообразной – и что ваше «пустое пространство» просто является жидкой фазой, частным случаем решения уравнений, описывающих воду.

Этот пример может показаться глупым, и если бы настоящая рыба думала подобным образом, мы могли бы поднять ее на смех. Но не может ли быть так, что пространство, которое воспринимается людьми как пустое, также некая форма среды? Тогда будут потешаться над нами. Имеется множество свидетельств того, что так дело и обстоит. Наше «пустое пространство», по-видимому, не только является такого рода средой, но и, похоже, может находиться не в трех фазах, а в гораздо большем их числе (вероятно, около 10^{500}), а возможно, даже в бесконечном числе. Значит, в дополнение к искривлению, растяжению и вибрации наше пространство, вероятно, способно испытывать нечто подобное замерзанию и испарению.

Как физики пришли к такому выводу? Ну, если бы наша рыба была достаточно умна, она могла бы поставить эксперимент и определить, что ее «пространство» состоит из молекул воды, подчиняющихся определенным математическим уравнениям. Изучая эти уравнения, она смогла бы определить (рис. 6.5), что у них есть три решения, соответствующие трем фазам – твердому льду, жидкой воде и газообразному пару, – даже несмотря на то, что она никогда не видела ни айсбергов, ни гейзеров. Точно так же физики ищут уравнения, описывающие пространство и его наполнение. Мы еще не нашли окончательный ответ, но приближения, которые у нас есть, как правило, обладают общим свойством – у них более одного решения (фазы) для описания однородного пространства. Авторы теории струн, теории-фаворита, обнаружили, что существует около 10^{500} или более решений, и нет признаков того, что конкурирующие теории, например петлевая квантовая гравитация, дают единственное решение. Физики называют совокупность всех возможных решений *ландшафтом теории*²⁷. Однако этот пессимистичный вывод основан на довольно сомнительном допущении, что способ протекания инфляции в нашей области пространства – это единственный способ ее протекания где бы то ни было. Все эти решения, свойствами которых определя-

²⁷ В книгах Брайана Грина, Ленни Сасскинда и Александра Виленкина, упомянутых в разделе «Рекомендованная литература», подробно описано, как мультиверс II уровня был открыт и исследован Андреем Линде, Александром Виленкиным, Аланом Гуттом, Сидни Коулманом, Франком де Лусиа, Рафаэлем Буссо, Джо Полчински, Ленни Сасскиндо, Шамитом Качру, Ренатой Каллош, Сандипом Триведи и другими. Книги Грина и Сасскинда также служат хорошими введениями в теорию струн.

ются эффективные законы физики, связаны с различными возможностями, вытекающими из одних и тех же фундаментальных законов.

Что это означает в отношении к инфляции? Поразительным образом вечная инфляция порождает все возможные типы пространства. Она реализует весь ландшафт. Фактически для каждой фазы, в которой может находиться пространство, она создает бесконечно много мультиверсов I уровня, заполненных этой фазой. Это означает, что мы, наблюдатели, можем легко совершить ту же ошибку, что и рыба: поскольку мы наблюдаем пространство, имеющее одни и те же свойства всюду в нашей Вселенной, мы склонны ошибочно полагать, что оно таково же во всех остальных местах.

Какое отношение все это имеет к инфляции? Для изменения фазового состояния пространства требуется огромное количество энергии, так что наблюдаемые нами повседневные процессы просто не способны это сделать. Однако в прошлом, в процессе инфляции, в каждом крошечном объеме было заключено колоссальное количество энергии. Его было достаточно для того, чтобы квантовые флуктуации могли случайно вызывать изменение фазового состояния в какой-либо небольшой области, которая потом за счет инфляции превращалась бы в колоссальный объем, содержащий лишь эту фазу. Более того, данная область пространства должна была перейти в определенную фазу, чтобы инфляция остановилась. Это гарантирует, что пограничные области между двумя фазами будут инфлировать вечно, в то время как каждая фаза целиком заполняет бесконечный мультиверс I уровня.

Что представляют собой фазовые состояния пространства? Представьте, что на день рождения вы получили в подарок автомобиль с ключом в зажигании, но прежде никогда не слышали об автомобилях и не располагаете совершенно никакой информацией о том, как они работают. Будучи любопытным человеком, вы забираетесь внутрь и начинаете давить на все кнопки и тянуть за все рычаги. В конце концов вы понимаете, как им пользоваться, и становитесь очень хорошим водителем. Но кто-то без вашего ведома стер с рычага переключения скоростей букву *R* и испортил коробку передач так, что для переключения на задний ход требуется огромное усилие. Это значит, что пока кто-нибудь не подскажет, вы, возможно, не догадаетесь, что автомобиль способен двигаться задним ходом. Если попросить вас описать, как работает автомобиль, вы скорее всего будете ошибочно утверждать, что, во всех случаях, чем сильнее нажимаешь на педаль газа при работающем двигателе, тем быстрее автомобиль едет вперед. Если в параллельной вселенной для переключения на движение вперед, напротив, требуется огромное усилие, то там вы, вероятно, придете к выводу, что машина работает иначе и движется только назад.



Рис. 6.6. Ткань пространства и времени, по-видимому, имеет многочисленные «рукоятки», которые могут быть установлены в различные положения в разных частях мультиверса II уровня. Наша собственная Вселенная, похоже, имеет 32 «рукоятки», положение которых можно менять (гл. 10), а также дополнительные – с дискретным набором положений, управляющие типами частиц, которые могут существовать.

Наша Вселенная очень похожа на автомобиль. Как показано на рис. 6.6, есть множество «рукояток», которые управляют ее работой: законы, согласно которым движутся предметы при воздействии на них, и т. д. – именно это в школе называли законами физики, прибавляя *фундаментальные постоянные*. Каждое положение «рукояток» соответствует одному из фазовых состояний пространства, так что если имеется 500 «рукояток» с 10 положениями для каждой, то должно быть 10^{500} фаз.

В старших классах меня учили – неправильно, – что эти законы и значения постоянных всегда верны и не меняются от места к месту, от мгновения к мгновению. Почему это ошибка? Потому что для изменения положения этих переключателей, как в случае рычага переключения передач в автомобиле, требуется огромное количество энергии – гораздо больше, чем у нас в распоряжении, – и поэтому мы не понимали, что эти параметры можно менять. Мы даже не понимали, что вообще существуют параметры, которые можно изменять: в отличие от коробки передач, природные «рукоятки» надежно спрятаны. Они проявляются в форме особых полей с очень массивными частицами-переносчиками и других малопонятных сущностей, а огромная энергия нужна не только для их изменения, но даже для обнаружения того, что они существуют.

Как физики догадались, что «рукоятки» могут существовать и что мы могли бы заставить нашу Вселенную функционировать иначе, если бы располагали достаточной энергией? Точно так же, как вы смогли бы догадаться, что автомобиль в принципе может двигаться задним ходом: путем внимательного изучения работы его частей! Вы могли бы догадаться об этом, изучив устройство коробки передач. Вот и изучение мельчайших «строительных блоков» природы подсказало, что при наличии достаточной энергии они могут реорганизоваться так, что наша Вселенная станет работать по-другому. Мы рассмотрим их функционирование в следующей главе. Вечная инфляция обеспечивала бы достаточное количество энергии для квантовых флуктуаций, чтобы породить все возможные комбинации в мультиверсах I уровня. Она действует как невероятно сильная горилла, которая беспорядочно крутит все рукоятки в автомобилях на заполненной парковке: когда она закончит свое дело, у некоторых машин окажется включенным задний ход.

Табл. 6.1. Ключевые мультиверсные понятия и их взаимосвязи.

Физическая реальность	Все, что существует. В гл. 12 я обосновываю, что она эквивалентна мультиверсу IV уровня.
Пространство	Часть физической реальности, непрерывно соединенная с тем, что мы можем наблюдать. Эквивалент мультиверса II уровня.
Наша Вселенная	Часть физической реальности, которую мы в принципе можем наблюдать. Если не рассматривать квантовые осложнения, то это сферическая область пространства, откуда свет успел дойти до нас за 14 млрд лет, прошедших с момента нашего Большого взрыва.
Параллельная вселенная	Часть физического пространства, которая в принципе может быть наблюдаема из некоего места, но не с Земли. Параллельные вселенные — это не теория, а предсказание некоторых теорий.
Мультиверс	Совокупность вселенных.
Мультиверс I уровня	Отдаленные области пространства, которые сейчас, но не вечно, не наблюдаемы. В них действуют одинаковые эффективные законы физики, но они могут иметь различную историю.
Мультиверс II уровня	Отдаленные области пространства, которые навсегда останутся ненаблюдаемыми, поскольку пространство между ними и нами продолжает инфлировать. Они подчиняются одинаковым фундаментальным законам физики, однако их эффективные законы физики могут различаться.
Мультиверс III уровня	Различные части квантового гильбертова пространства (гл. 8). Они столь же разнообразны, как и на II уровне.
Мультиверс IV уровня	Все математические структуры (гл. 12), соответствующие различным фундаментальным законам физики.
Фундаментальные законы	Математические уравнения, которые управляют физикой.
Эффективные законы	Частное решение математических уравнений, которые описывают физику. Их можно перепутать с фундаментальными законами, когда одно и то же решение применимо по всей вселенной.
Тонкая настройка	Значения физических постоянных, используемых в эффективных физических законах, попадают в очень узкий диапазон, допускающий появление жизни. Наблюдаемая тонкая настройка служит возможным аргументом в пользу мультиверса II уровня.

Короче говоря, мультиверс II уровня принципиально меняет наши представления о физических законах. Многие закономерности, которые мы привыкли считать фундаментальными, по определению соблюдающимися всегда и везде, оказались не более чем эффективными законами — локальными нормативными актами, которые могут меняться от места к

месту соответственно разным установкам рукояток, задающих различные фазовые состояния пространства. В табл. 6.1 перечисляются эти понятия и поясняется, как они связаны с параллельными вселенными. Эти изменения продолжают давнюю тенденцию. Если Коперник считал фундаментальным закон, гласящий, что планеты движутся по идеальным окружностям, то теперь мы знаем о существовании орбит более общего вида, степень отличия которых от окружности (эксцентриситет) – это, по сути, «рукоятка», которая после завершения формирования Солнечной системы может менять свое положение лишь очень медленно, с большим трудом. Мультиверс II уровня выводит это представление на новую высоту, понижая в ранге многие физические законы с фундаментальных до эффективных. Этим вопросом мы сейчас займемся.

Точная настройка как аргумент в пользу мультиверса II уровня

Так существует ли на самом деле мультиверс II уровня? Аргументы в пользу вечной инфляции (их множество) являются также аргументами в пользу мультиверса II уровня, поскольку из первого вытекает второе. Мы также видели, что если существуют природные законы или постоянные, которые в принципе могут меняться от места к месту, то вечная инфляция обусловит их варьирование внутри мультиверса II уровня. Но существуют ли подтверждения, не завязанные столь сильно на теоретические аргументы?

Я хочу привести довод в пользу того, что они есть: это тот факт, что наша Вселенная кажется очень точно настроенной для жизни. Оказывается, многие из «рукояток», похоже, настроены на весьма специфические значения, и если бы мы могли чуть-чуть их повернуть, жизнь, какой мы ее знаем, стала бы невозможной. Троньте «рукоятку» темной энергии, и галактики никогда не образуются, немного покрутите другую – и атомы станут неустойчивыми, и т. д. Имея недостаточный опыт пилотирования, я всегда боюсь запутаться в рукоятках в кабине самолета, но если бы я мог случайно покрутить «рукоятки» нашей Вселенной, мои шансы на выживание были бы еще ниже.

Вот три основных реакции на наблюдаемую точную настройку:

1. *Случайность.* Это просто счастливое совпадение, и ничего больше.
2. *Замысел.* Это свидетельство того, что наша Вселенная была сконструирована некой сущностью (возможно, божеством или высокоразвитой формой жизни, моделирующей вселенные), и «рукоятки» настроены так, чтобы сделать возможной жизнь.
3. *Мультиверс.* Это свидетельство мультиверса II уровня, поскольку, если все положения «рукояток» где-то реализуются, то естественно, что мы существуем и наблюдаем себя в пригодной для жизни области.

Ниже мы рассмотрим интерпретации случайности и мультиверса, а вариант моделирования отложим до гл. 12. Но сначала разберемся со свидетельствами точной настройки.

Точно настроенная темная энергия

До сих пор наша космическая история была своего рода гравитационным перетягиванием каната между темной материей, которая пытается все стянуть, и темной энергией, которая стремится все разбросать (гл. 4). Поскольку образование галактик связано со сгущением вещества, я думаю, что темная материя – наш друг, а темная энергия – враг. Плотность вещества в космосе в основном обеспечивается темной материей. Ее дружественное гравитационное притяжение помогает формироваться галактикам, как наша. Однако, поскольку космологическое расширение приводит к разрежению темной материи, но не темной энергии, нежелательное гравитационное отталкивание темной энергии в конце концов берет верх, отменяя дальнейшее образование галактик. Это значит, что если бы темная энергия имела

значительно большую плотность, она стала бы брать верх гораздо раньше, еще до того, как сформировались бы первые галактики. Результатом явилась бы мертворожденная вселенная, вечно темная и безжизненная, не содержащая ничего сложнее и интереснее почти однородного газа. Если, с другой стороны, плотность темной энергии уменьшилась бы настолько, чтобы стать существенно отрицательной (это допускает эйнштейновская теория гравитации), наша Вселенная прекратила бы расширяться и коллапсировала в Большом хлопке, прежде чем успела бы появиться жизнь. Если вы задумались, как изменить плотность темной энергии, повернув соответствующую «рукоятку» на рис. 6.6, то, пожалуйста, не крутите ее слишком сильно, поскольку для жизни это может иметь такие же печальные последствия, как нажатие кнопки «Выкл.».

Насколько сильно можно повернуть «рукоятку» темной энергии? Текущее ее положение соответствует плотности темной энергии, которую мы измерили на практике, и она составляет около 10^{-27} кг/м³, что удивительно близко к нулю в сравнении со всем доступным диапазоном. Естественное максимальное значение этого регулятора соответствует плотности темной энергии около 10^{97} кг/м³, при которой квантовые флуктуации заполняют пространство крошечными черными дырами, а минимальное значение равно той же величине, но со знаком минус. Если полный оборот «рукоятки» темной энергии на рис. 6.6 соответствует изменению плотности на всю величину этого диапазона, то фактическое положение «рукоятки» в нашей Вселенной отстоит от средней точки примерно на 10^{-123} полного оборота. Это значит, что если вы хотите повернуть «рукоятку» так, чтобы могли образовываться галактики, нужно задать угол поворота с точностью более 120 цифр после запятой! Хотя это кажется невыполнимо точной настройкой, некий механизм, очевидно, оказал эту услугу нашей Вселенной.

Точно настроенные частицы

В следующей главе мы исследуем микромир элементарных частиц. В нем множество «рукояток», определяющих массы частиц, а также то, насколько сильно они взаимодействуют друг с другом.

Научное сообщество постепенно начинает понимать, что точно настроены многие из этих регуляторов. Так, если электромагнитные силы ослабли бы примерно на 4 %, Солнце немедленно взорвалось бы: атомы его водорода стали бы соединяться в *дипротоны* (не существующую без такой поправки разновидность гелия, не содержащего нейтронов).

Если существенно усилить электромагнетизм, то стабильные атомы, например углерод и кислород, будут испытывать радиоактивный распад.

Если бы слабое ядерное взаимодействие оказалось существенно слабее, то вокруг нас не было бы водорода, поскольку вскоре после Большого взрыва весь он превратился бы в гелий. В обоих случаях – если бы взаимодействие было бы гораздо сильнее или слабее – нейтрино при взрыве сверхновой не могли бы рассеять в космосе внешние слои звезды, и необходимые для жизни тяжелые элементы вроде железа вряд ли смогли бы покинуть звезды, где они образуются, и оказаться в составе планет, например Земли.

Если бы электроны были гораздо легче, то не было бы стабильных звезд, а если значительно тяжелее, то не могли бы существовать упорядоченные структуры, например кристаллы или молекулы ДНК. Если бы протоны оказались на 0,2 % тяжелее, они превращались бы в нейтроны, неспособные удерживать возле себя электроны, – и не было бы атомов. Напротив, если бы протоны были существенно легче, то нейтроны внутри атомов превращались бы в протоны, так что не было бы устойчивых атомов, кроме водорода. На самом деле масса протона зависит от другого регулятора, который имеет очень широкий диапазон

варьирования и нуждается в точной настройке до 33 цифры после запятой, чтобы могли существовать стабильные атомы, кроме водорода.

Точная настройка в космологии

Многие из примеров точной настройки были найдены в 70–80-х годах Полом Дэвисом, Брэндоном Картером, Бернардом Карром, Мартином Рисом, Джоном Барроу, Франком Типлером, Стивеном Вайнбергом и другими физиками. Новые примеры продолжают появляться. Свою первую вылазку в эту область я предпринял в компании с Мартином Рисом, седым астрономом с безупречными британскими манерами, который стал одним из моих научных героев. Я не видел никого, кто бывал так счастлив, выступая с докладом – его глаза словно бы лучились. Он первым в научном истеблишменте поддержал меня в том, чтобы, следуя зову сердца, обратиться к «неортодоксальным» идеям. В предыдущей главе мы узнали, что амплитуда первичных космологических флуктуаций составляла около 0,002 %. Мы с Мартином подсчитали, что если бы они были меньше, то галактики не образовались бы, а если больше, то это привело бы к частому падению астероидов и прочим неприятностям.

А как насчет случайности?

Но что нам дает эта точная настройка? Прежде всего: почему мы не можем просто списать все на цепочку счастливых совпадений?

Научный метод не терпит необъяснимых совпадений. Сказать, что *моя теория требует необъяснимого совпадения для согласования с наблюдениями*, все равно что сказать: «Моя теория неверна». Мы видели, например, как теория инфляции предсказывает, что пространство плоское, а пятна космического микроволнового фона должны иметь средний размер около 1° , и что эксперименты, описанные в гл. 4, подтвердили это. Допустим, команда «Планка» обнаружила бы значительно меньший средний размер пятен, который заставил бы их объявить, что эти данные исключают теорию инфляции с уверенностью 99,999 %. Это значило бы, что случайные флуктуации в плоской Вселенной могли бы, в принципе, заставить пятна выглядеть при измерениях необычно малыми, приводя к некорректным выводам, но с вероятностью 99,999 % этого не случилось бы. Иными словами, инфляция потребовала бы необъяснимого совпадения с шансами 1: 100 000, чтобы оказаться в согласии с наблюдениями. Если бы Алан Гут и Андрей Линде провели после этого совместную пресс-конференцию и настаивали на том, что нет аргументов против теории инфляции, поскольку они нутром чувствуют – измерения «Планка» были просто совпадением, – такую позицию следовало бы отвергнуть как ненаучную.

Случайные флуктуации подтверждают, что в науке нельзя быть стопроцентно уверенным в чем-либо. Всегда есть вероятность того, что вам чрезвычайно не повезло со случайным измерительным шумом, что детектор сломался или даже что весь эксперимент был всего лишь галлюцинацией. На практике, однако, опровержение с надежностью 99,999 % обычно рассматривается научным сообществом как последний гвоздь в крышку гроба теории. Что касается теории о том, что точная настройка темной энергии – это случайность, то она требует веры в гораздо более невероятное совпадение, а значит, исключается с вероятностью примерно 99,999999... %, где после запятой около 120 девяток.

Слово на букву «А»

А что можно сказать про объяснение точной настройки через мультиверс II уровня? Теория, в которой все регуляторы природы принимают в тех или иных местах фактически все возможные значения, со стопроцентной надежностью предсказывает, что существует

пригодная для жизни вселенная, такая как наша. И, поскольку мы можем жить лишь в пригодной для обитания вселенной, мы не должны удивляться, что наблюдаем именно такую.

Хотя это логичное объяснение, оно весьма спорно. После всех известных истории наивных попыток сохранить Землю в качестве центра Вселенной, в сознании людей глубоко укоренилась противоположная точка зрения. Принцип Коперника гласит, что в нашем положении в пространстве и времени нет ничего особенного. Брэндон Картер предложил конкурирующую идею, которую назвал *слабым антропным принципом*: «Мы должны быть готовы принять во внимание тот факт, что наше местоположение в этой Вселенной с необходимостью является привилегированным в достаточной мере, чтобы быть совместимым с нашим существованием как наблюдателей». Некоторые мои коллеги считают, что Картер сделал предосудительный шаг назад, к геоцентризму. С принятием во внимание точной настройки картина мультиверса II уровня действительно полностью нарушает принцип Коперника. Как показано на рис. 6.7, подавляющее большинство вселенных мертво, а наша собственная в высшей степени необычна – она содержит гораздо меньше темной материи, чем большинство, а также имеет очень странные установки многих других «рукояток».

Объяснение наблюдений путем введения параллельных вселенных, которые мы не можем наблюдать, кажется некоторым моим коллегам ошибочным. Я помню доклад, сделанный в 1998 году в Фермилабе, месторасположении знаменитого ускорителя²⁸ в окрестностях Чикаго. Аудитория взорвалась, когда докладчик произнес «слово на букву „А“» – *антропный*. На самом деле, чтобы усыпить бдительность рецензента и добиться публикации, мы с Мартином Рисом решили просто не использовать это слово в аннотациях первых совместно написанных статей по антропной тематике...



Рис. 6.7. Если плотность темной энергии (представлена здесь градациями серого) изменяется от вселенной к вселенной, то галактики, планеты и жизнь будут появляться только в тех вселенных, где она наименьшая. На этом рисунке обитаемы 20 % наиболее светлых вселенных, но реальная их доля может оказаться ближе к 10–120.

Лично у меня картеровский антропный принцип вызывает единственное возражение: мне не нравится использование слова «принцип», которое несет оттенок факультативности. Ведь применение строгой логики при сопоставлении теории с наблюдениями не является факультативным. Если большая часть пространства непригодна для жизни, то совершенно ясно, что мы должны обнаружить себя в таком месте, которое является особенным в том смысле, что оно这件годно для обитания. На самом деле большая часть пространства кажется совершенно непригодной для жизни, даже если ограничиться нашей собственной Вселенной: попробуйте выжить в межгалактической пустоте или внутри звезды! Достаточно

²⁸ «Теватрон» был крупнейшим в мире коллайдером до введения в строй Большого адронного коллайдера в ЦЕРНе. В 2012 году «Теватрон» был выведен из эксплуатации. – *Прим. пер.*

сказать, что лишь одна тысячная триллионной триллионной доли нашей Вселенной лежит в пределах 1 км от поверхности какой-либо планеты, так что это очень специфическое место. Но то, что мы в него попали, вряд ли удивительно.

В качестве примера рассмотрим M , массу нашего Солнца. От величины M зависит светимость Солнца, и, опираясь на элементарную физику, можно вычислить, что жизнь, какой мы ее знаем, возможна, лишь если M лежит в узком диапазоне между $1,6 \times 10^{30}$ и $2,4 \times 10^{30}$ кг. В ином случае климат Земли был бы холоднее, чем на Марсе, или жарче, чем на Венере. Измеренное значение $M \approx 2,0 \times 10^{30}$ кг. Это кажущееся необъяснимым совпадение пригодного для жизни и наблюдаемого значений M может вызвать беспокойство, если принять во внимание то, что по расчетам звезды могут существовать в гораздо более широком диапазоне возможных масс – от 10^{29} до 10^{32} кг, так что масса Солнца кажется точно подобранной для жизни. Однако это видимое совпадение можно объяснить, поскольку существует ансамбль из большого числа таких систем с различными настройками «рукояток». Мы знаем, что есть множество планетных систем с центральными звездами и планетными орбитами разных размеров, и, очевидно, следовало ожидать, что мы появимся в одной из пригодных для обитания планетных систем.

Интересный момент: мы могли использовать факт точной настройки Солнечной системы как аргумент в пользу существования других планетных систем даже до того, как они были открыты. Опираясь на точно такую же логику, мы можем использовать наблюдаемую точную настройку нашей Вселенной как аргумент в пользу существования других вселенных. Единственное отличие состоит в том, являются или нет предсказываемые сущности наблюдаемыми, но это различие не ослабляет аргумент, поскольку никак не касается его внутренней логики.

На какие предсказания мы можем надеяться?

Физики любят измерять численные значения. Вот некоторые:

Параметр	Наблюдаемое значение
Масса Земли	$5,9742 \times 10^{24}$ кг
Масса электрона	$9,10938188 \times 10^{-31}$ кг
Радиус земной орбиты в Солнечной системе	149 597 870 691 м
Радиус орбиты электрона в атоме водорода	$5,29177211 \times 10^{-11}$ м

Нам также нравится предсказывать такие числа, исходя из фундаментальных принципов. Но достигнем ли мы когда-нибудь успеха? Иоганн Кеплер до открытия эллиптической формы планетных орбит выдвинул элегантную теорию, связанную с третьим из чисел в приведенной таблице. Он предположил, что орбиты Меркурия, Венеры, Земли, Марса, Юпитера и Сатурна находятся друг с другом точно в тех же соотношениях, как и вложенные друг в друга шесть сфер, между которыми вписаны соответственно октаэдр, икосаэдр, додекаэдр, тетраэдр и куб (рис. 7.2). Если закрыть глаза на тот факт, что эта теория вскоре была опровергнута на основании более точных измерений, она кажется в целом наивной. Сейчас мы знаем о существовании других планетных систем, и параметры орбит, измеренные в Солнечной системе, не дают фундаментальной информации о Вселенной и касаются лишь нашего положения в ней. В этом смысле мы можем считать цифры частью своего космического «почтового индекса». Чтобы объяснить внеземному почтальону, в какую из планетных систем мы хотим отправить посылку, можно сказать, чтобы он летел в ту из них, где имеется

восемь планет, орбиты которых в 1,84, 2,51, 4,33, 12,7, 24,7, 51,1 и 76,5 раз больше восьмой, самой маленькой орбиты, и тогда он может воскликнуть: «О, я знаю, какую планетную систему вы имеете в виду!» Ровно по той же причине у нас не будет шансов предсказать массу или радиус Земли на основе фундаментальных принципов, поскольку мы знаем, что существует много планет разных размеров.

А что можно сказать о массе и величине орбиты электрона? Эти числа одинаковы для всех проверенных электронов во Вселенной, поэтому появилась надежда, что они могут быть поистине фундаментальными свойствами нашего физического мира, которые мы однажды сможем вычислить на основе одной только теории – совершенно в духе кеплеровской модели орбит. И действительно, в 1997 году знаменитый струнный теоретик Эд Виттен сказал мне, что, по его мнению, теория струн рано или поздно сможет предсказать, во сколько раз электрон легче протона. Однако когда мы виделись с ним в последний раз, на шестидесятилетии Андрея Линде, за очередным бокалом вина он признался, что оставил надежду предсказать все фундаментальные постоянные.

Откуда этот пессимизм? Дело в том, что история повторяется. Мультиверс II уровня делает с массой электрона то же, что другие планеты сделали с массой Земли, превратив ее из фундаментального свойства природы лишь в часть нашего космического адреса. Изменить значение любого параметра, который варьирует внутри мультиверса II уровня – значит просто сузить список вселенных, в которых мы можем находиться.

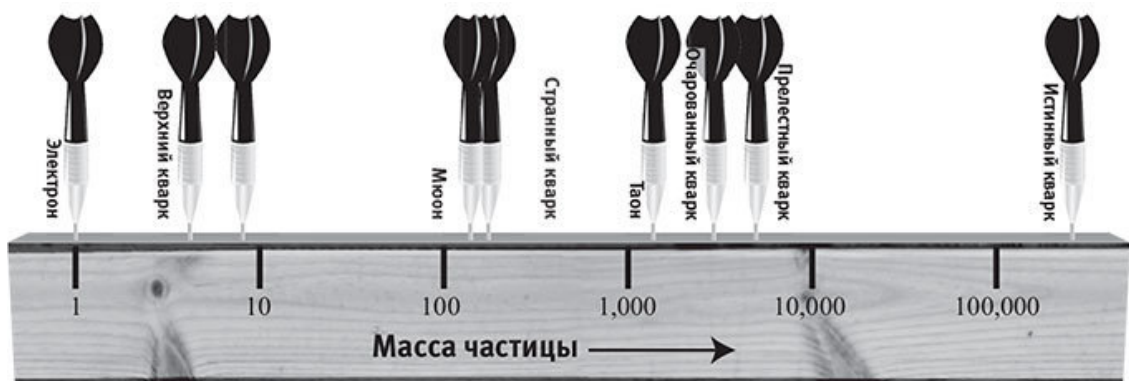


Рис. 6.8. Массы девяти частиц-фермионов, которые нам удалось измерить, кажутся совершенно случайными, как и предсказывают некоторые модели мультиверса. Они утверждают, что мы, исходя из фундаментальных принципов, никогда не сможем их предсказать. На шкале показано, во сколько раз каждая частица тяжелее электрона.

Сейчас известно 32 независимых параметра нашей Вселенной, для которых мы пытаемся измерить как можно больше знаков после запятой (гл. 10). Все ли они варьируют по мультиверсу II уровня, или некоторые из них могут быть вычислены на основе фундаментальных принципов (или иного, более короткого, списка параметров)? У нас пока нет успешной фундаментальной физической теории, которая смогла бы ответить на этот вопрос, и интересно присмотреться к результатам измерений в поисках подсказок. Параметры, которые варьируют по мультиверсу, должны казаться случайными, если мы живем в случайно выбранной вселенной. Кажутся ли измеренные значения случайными? Вы сами можете оценить это. Взгляните на рис. 6.8, где я изобразил массы девяти фундаментальных частиц, называемых фермионами. Если отвлечься от шкалы, на которой масса увеличивается в 10 раз на каждые несколько сантиметров, рисунок напоминает мне девять случайно воткнувшихся в мишень дротиков. Действительно, эти девять чисел успешно проходят строгий ста-

статистический тест на случайность, удовлетворяя равномерному распределению с наклоном линии регрессии менее 10 %.

Не все потеряно

Если мы живем в случайно пригодной для жизни вселенной, то числа должны казаться случайными, однако подчиняться распределению вероятностей, которое благоприятствует жизни. Сравнивая предсказания того, как параметры варьируют по мультиверсу с соответствующей физикой формирования галактик и т. д., мы можем сделать статистические предсказания о том, что должно фактически наблюдаться. До сих пор такие предсказания великолепно согласовывались с данными о темной энергии, темной материи и нейтрино (рис. 6.9). На самом деле, первое предсказание ненулевого значения плотности темной энергии, сделанное Стивеном Вайнбергом, было получено как раз таким образом.

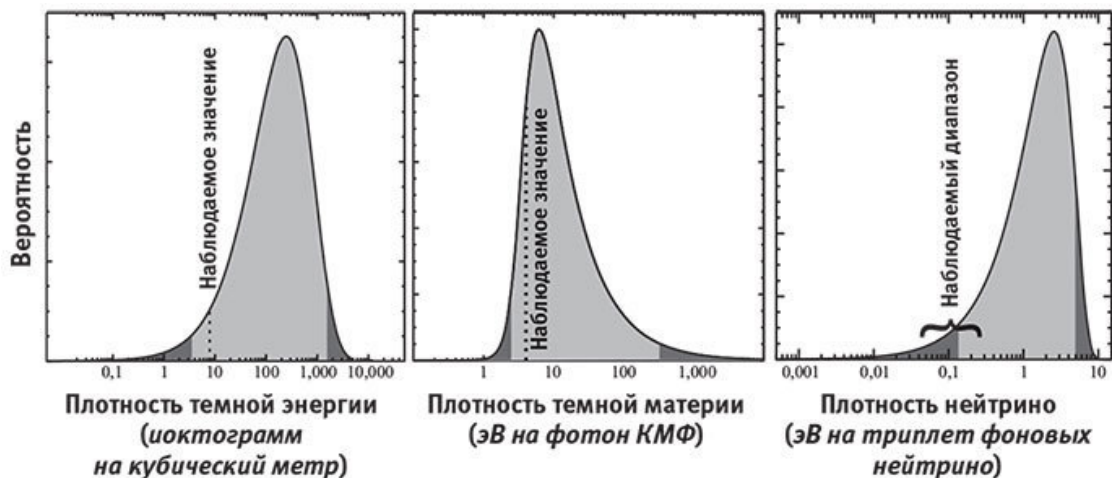


Рис. 6.9. Если плотность темной энергии, темной материи и нейтрино очень сильно варьирует по мультиверсу II уровня, то большинство вселенных будет лишено галактик и безжизненно, а случайный наблюдатель должен ожидать, что измеренные им значения лежат в очень узком численном диапазоне, соответствующем показанным распределениям вероятности. Нам следует ожидать, что измеренные значения окажутся в центральных серых интервалах, на которые приходится 90 % вероятности, и они действительно туда укладываются.

Я получил большое удовольствие, проходя по списку «рукояток» и разбираясь, что случится, если их повернуть. Например, ни в коем случае не трогайте на рис. 6.6 «рукоятки», задающие число измерений пространства и времени: это приведет к фатальным последствиям. Если установить число измерений пространства более трех, не будет существовать ни стабильных планетных систем, ни устойчивых атомов. Скажем, переход в четырехмерное пространство изменяет ньютоновский закон обратных квадратов для силы гравитации на закон обратных кубов, при котором вообще не существует устойчивых орбит. Я был очень горд этой своей догадкой, пока не узнал, что австрийский физик Пауль Эренфест пришел к этому выводу еще в 1917 году. Пространства с числом измерений менее трех тоже не позволяют существовать планетным системам, поскольку гравитация в них перестает притягивать. Кроме того, они, по-видимому, еще и по иным причинам слишком просты, чтобы содержать наблюдателей – например, в них отростки двух нейронов не могут пересекаться, не нарушая взаимную целостность. Изменение числа измерений времени не так абсурдно, как можно подумать, и общая теория относительности Эйнштейна отлично с этим справляется. Однако я однажды написал статью, в которой показал, что это уничтожило бы ключе-

вое математическое свойство физики, которое позволяет нам делать предсказания, а значит, бесполезным стало бы развитие мозга. Три измерения пространства и одно измерение времени (рис. 6.10) – вот единственное пригодное для жизни сочетание. Иными словами, бесконечно умный ребенок, не делая вообще никаких наблюдений, мог бы вычислить, исходя из первичных принципов, что в мультиверсе II уровня существуют другие комбинации размерности пространства и времени, но лишь вариант $3 + 1$ пригоден для жизни. Перефразируя Декарта, он мог бы, еще не открыв в первый раз глаза, подумать: «Я мыслю, следовательно, у пространства три измерения, а у времени – одно», и проверить свое предсказание.

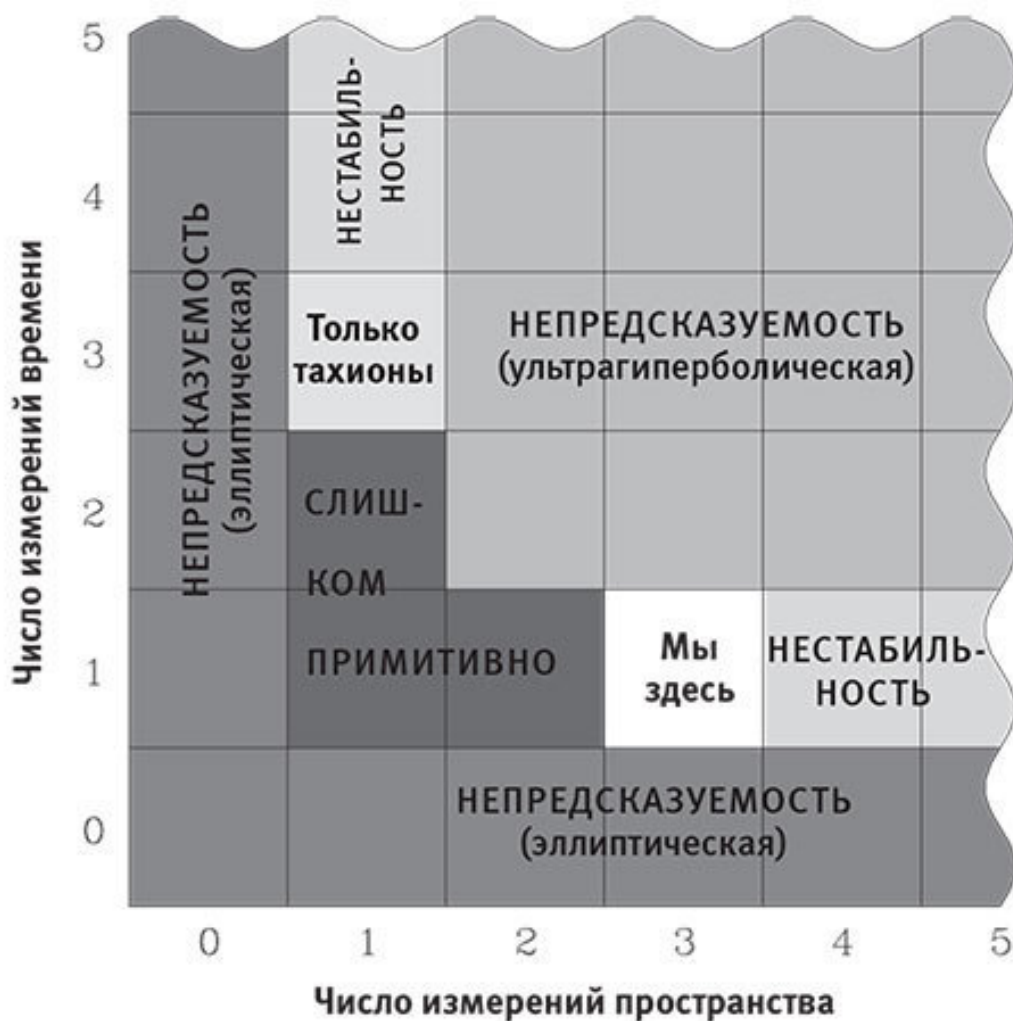


Рис. 6.10. При более чем трех измерениях пространства не существует стабильных атомов и планетных систем. При меньшем числе измерений не существует гравитационного притяжения. При размерности времени больше или меньше единицы физика утрачивает свою предсказательную силу, а значит, не будет смысла в развитии мозга. В мультиверсе II уровня, где число измерений пространства и времени изменяется от одной вселенной к другой, мы должны, таким образом, ожидать, что окажемся во вселенной с тремя измерениями пространства и одним – времени, поскольку все остальные вселенные, вероятно, необитаемы.

Если весь мультиверс II уровня существует в одном пространстве, то как внутри него может варьировать размерность? Дело в том, что, согласно наиболее популярным моде-

лям теории струн, изменяется лишь *кажущаяся* размерность: истинное пространство всегда имеет 9 измерений, но мы не замечаем 6 из них, поскольку они микроскопически свернуты наподобие цилиндра на рис. 2.7. Если пройти небольшое расстояние вдоль одного из 6 скрытых измерений, окажешься на том же месте, откуда отправился. Предполагается, что все 9 измерений первоначально были свернуты, а затем в нашей области космоса инфляция растянула три из них до астрономических размеров, оставив остальные крошечными, невидимыми. В других местах мультиверса II уровня инфляция породила миры с числом измерений от 0 до 9.

Математики нашли множество способов, как эти дополнительные размерности могут быть свернуты и наполнены энергией (скрытые измерения, например, могут быть окружены внутри обобщенным магнитным полем). Все эти варианты соответствуют в теории струн регулировочным «рукояткам». Различные варианты могут относиться не только к физическим постоянным в несвернутых измерениях, но и к правилам, определяющим, какие элементарные частицы могут существовать и какие эффективные уравнения их описывают. Могут иметься параллельные вселенные II уровня, в которых, например, 10, а не 6 типов кварков.

Короче говоря, хотя *фундаментальные* уравнения физики (возможно, составляющие теорию струн) остаются верны во всем мультиверсе II уровня, *видимые* законы физики, которые будут открывать наблюдатели, изменяются от одного мультиверса I уровня к другому. Видимые законы не являются *универсальными* не только в словарном смысле, то есть «всегда применимыми», но и в буквальном смысле, то есть «применимыми к нашему Универсуму (Вселенной)». Они *мультиверсальны* лишь на I, но не на II уровне. Фундаментальные же уравнения мультиверсальны даже на II уровне – они не будут меняться, пока мы не доберемся до мультиверса IV уровня (гл. 12).

Мультиверс: счет после первого периода

В этой главе мы рассмотрели множество безумно звучащих идей, так что отступим на шаг назад и осмотрим картину в целом. Я вижу в инфляции объяснение, которое не ограничивается расширением или раздуванием. Так же, как клеточное деление не приводит к рождению лишь одного ребенка, инфляция не ограничивается одной вселенной, а порождает огромный ансамбль параллельных вселенных, вероятно, реализующий все возможные варианты, о которых мы можем рассуждать в терминах фундаментальных постоянных. Это объясняет еще одну загадку – тот факт, что наша Вселенная «настроена» для жизни. Большинство параллельных вселенных, порождаемых инфляцией, мертво, однако условия в некоторых подходят для жизни, и неудивительно, что именно в такой вселенной мы находимся.

Мой коллега Эдди Фархи называет Алана Гута «Позволителем»: всему, что в принципе может случиться, вечная инфляция позволяет произойти. Она порождает пространство, где это может случиться, и создает начальные условия, позволяющие разыгаться всем историям. Иными словами, инфляция – это процесс, превращающий потенциальное в реальное.

Если вы чувствуете дискомфорт, рассуждая о мультиверсе II уровня, можете говорить о *пространстве*, помня, что все наши параллельные вселенные I и II уровня – лишь отдаленные области бесконечного пространства. Просто структура этого пространства гораздо богаче, чем мог себе представить Евклид: оно расширяется, и мы можем видеть лишь малую его часть, которую называем Вселенной, а свойства его отдаленных областей гораздо разнообразнее того, что видно в телескопы. Описание в гл. 3 нашей Вселенной как однородной – лишь часть картины, верная для промежуточных масштабов: гравитация заставляет веще-

ство сгущаться и образовывать интересные структуры на меньших масштабах, а инфляция порождает разнообразие и интересные возможности на больших масштабах.

Если вы все еще не привыкли к идее параллельных вселенных, вам может помочь следующее. Алан Гут упомянул в недавнем докладе, прочитанном в Массачусетском технологическом институте, следующее. Когда мы открываем в природе некий объект, научный подход к делу предполагает поиск породившего его механизма. Автомобили строят на автозаводах, кролики появляются на свет при участии родителей-кроликов, а планетные системы рождаются при гравитационном коллапсе гигантских молекулярных облаков. Резонно предположить, что наша Вселенная порождена неким механизмом созидания вселенных (возможно, инфляцией, а может, и чем-либо совершенно иным). И вот ключевой момент: все прочие упомянутые механизмы естественным образом порождают множество экземпляров того, что они создают. Космос, содержащий лишь один автомобиль, одного кролика и одну планетную систему, кажется очень неестественным. По той же причине гораздо естественнее такой механизм созидания вселенных (каким бы он ни был), который порождает множество вселенных, а не ту единственную, в которой обитаем мы.

Применив этот аргумент к механизму (каким бы он ни был), запустившему инфляцию и в итоге породившему наш мультиверс II уровня, мы приходим к выводу, что он, вероятно, породил множество мультиверсов II уровня, не связанных друг с другом. Однако этот вариант кажется непроверяемым, поскольку он не добавляет никаких качественно иных миров и не изменяет распределения вероятностей их свойств: ведь все возможные мультиверсы I уровня уже реализованы внутри каждого мультиверса II уровня.

Кроме инфляции могут существовать иные механизмы образования вселенных. Идея, предложенная Ричардом Толманом и Джоном Уилером и недавно доработанная Полом Стейнхардтом и Нилом Тароком, состоит в том, что наша космическая история циклична и проходит через бесконечную серию Больших взрывов. Если это так, то ансамбль воплощений также представляет собой мультиверс, разнообразие которого, вероятно, сравнимо с мультиверсом II уровня.

Ли Смолин предложил еще один механизм рождения вселенных, включающий мутации и отпочковывание новых вселенных через черные дыры, а не рождение их в ходе инфляции. Это тоже приводит к мультиверсу II уровня с естественным отбором, отдающим предпочтение вселенным, порождающим максимальное число черных дыр. Мой друг Эндрю Гамильтон (гл. 4), возможно, открыл такой механизм созидания вселенных: он исследовал неустойчивость, которая возникает внутри черных дыр вскоре после их образования. Она оказалась достаточно энергичной, чтобы запустить инфляцию, способную породить мультиверс I уровня, целиком содержащийся внутри исходной черной дыры – хотя его обитатели, вероятно, никогда не узнают об этом.

В *сценариях мира на бране* другой трехмерный мир может буквально быть параллелен нашему, находясь на небольшом расстоянии от него в дополнительном измерении. Однако я не думаю, что такой мир (*брана*) заслуживает названия параллельной вселенной, отдельной от нашей собственной, поскольку он может взаимодействовать с нами гравитационно во многом так же, как темная материя.

Параллельные вселенные остаются крайне спорным вопросом. Однако за последние десятилетия в научном сообществе наметился сдвиг: мультиверсы перестали быть предметом забот лишь безумцев. Теперь их обсуждают на физических конференциях и в рецензируемых статьях. Я думаю, что большую роль в этом сдвиге сыграл успех прецизионной космологии и теории инфляции, а также открытие темной энергии и неудачное объяснение иными способами ее точной настройки. Даже те из моих коллег, кому не нравится идея мультиверса, теперь склонны признать, что основные аргументы в его пользу имеют смысл. В целом критика изменилась с «это не имеет смысла, и я это ненавижу» на «я это ненавижу».

Я считаю, работа ученых состоит не в том, чтобы указывать Вселенной, как ей функционировать, а в том, чтобы непредубежденно исследовать ее и пытаться понять, как она функционирует.

Мы склонны высокомерно изображать себя центром мира, где все вращается вокруг нас. Постепенно мы усвоили, что вращаемся вокруг Солнца, которое вращается вокруг одной из бесчисленного числа галактик. Благодаря прорывам в физике мы все глубже познаем природу реальности. Пока мы поднялись только на два уровня мультиверсов. Предстоит пройти еще два, и в следующей главе мы начнем изучать мультиверс III уровня. За все это мы платим тем, что становимся скромнее (что, возможно, делает нас лучше), но обнаруживаем, что живем в реальности, которая величественнее всего, что могли себе представить предки в самых буйных фантазиях.

Резюме

- Параллельные вселенные – не теория, а предсказание некоторых теорий.
- Вечная инфляция предсказывает, что наша Вселенная (физическая область пространства, откуда свет успел дойти до нас за 14 млрд лет, с момента нашего Большого взрыва) – это лишь одна из бесконечного числа вселенных мультиверса I уровня, в котором происходит все, что может произойти.
- Чтобы теория была научной, нам не обязательно иметь возможность наблюдать или проверять все ее предсказания – достаточно хотя бы одного. Инфляция – это лучшая теория, объясняющая наше космическое происхождение, поскольку она выдерживает проверку наблюдениями, а параллельные вселенные, по-видимому, являются неотъемлемой частью этого теоретического пакета.
- Инфляция превращает потенциальное в реальное: если математические уравнения, описывающие однородное пространство, имеют множество решений, то вечная инфляция будет порождать бесконечные области пространства, реализующие каждое из этих решений. Так устроен мультиверс II уровня.
- Многие физические законы и постоянные в мультиверсе I уровня могут изменяться в мультиверсе II уровня, так что в параллельных вселенных I уровня студенты изучают одну и ту же физику, но разную историю, а в параллельных вселенных II уровня они изучают и разную физику.
- Это может объяснить, почему многие константы в нашей Вселенной настолько точно настроены для жизни, что если немного изменить их значения, то жизнь, какой мы ее знаем, станет невозможной.
- Кроме того, это наделяет новым смыслом множество числовых параметров, измеряемых в физике: они не говорят нам ничего фундаментального о физической реальности, а описывают в основном нечто, относящееся к нашему местоположению в ней, и образуют наш космический почтовый индекс.
- Хотя эти параллельные вселенные остаются предметом споров, основная критика в их адрес поменялась с «Это не имеет смысла, и я это ненавижу» на «Я это ненавижу».

Часть II. Все мельче и мельче

Глава 7. Космическое «лего»

Все, что мы называем реальным, состоит из вещей, которые не могут рассматриваться как реальные.

Нильс Бор

«Нет, это какая-то ерунда! Здесь где-то ошибка», – я один в комнате подруги в стокгольмском общежитии готовлюсь к первому экзамену по квантовой механике. В учебнике говорится: малые объекты, вроде атомов, могут находиться в нескольких местах одновременно, а крупные объекты, вроде людей, – не могут. «Как бы не так! – говорю я себе. – Люди состоят из атомов, и если те могут быть в нескольких местах сразу, то и мы, конечно, тоже!» Там также сказано, что всякий раз, когда некто наблюдает, где находится атом, тот случайным образом прыгает в одно из тех мест, где он ранее пребывал. Но я не нашел ни одного уравнения, описывающего, что именно полагается считать наблюдением. «Может ли робот считаться наблюдателем? А отдельный атом?» В книге говорилось лишь, что любая квантовая система изменяется детерминистическим образом согласно уравнению Шредингера. Но разве это логически совместимо с подобными случайными прыжками?

Я набрался смелости и постучался в дверь нашего крупнейшего эксперта, профессора физики из Нобелевского комитета. Двадцать минут спустя я вышел из кабинета в полном недоумении, убежденный, что я умудрился вообще ничего не понять. Так началось мое долгое и до сих пор не подошедшее к концу путешествие к квантовым параллельным вселенным. Лишь пару лет спустя, перебравшись для работы над диссертацией в Беркли, я понял, что это было вовсе не мое непонимание. Выяснилось, что многие знаменитые физики горячо спорят о проблемах квантовой механики, и я получил немало удовольствия от сочинения собственных статей на эту тему.

Но прежде чем рассказывать о своем понимании того, как все это увязывается (гл. 8), я хочу вернуться в прошлое, чтобы дать возможность в полной мере прочувствовать безумство квантовой механики и то беспокойство, которое она вызывает.

Атомное «лего»

Когда в прошлый раз я спросил Александра, своего сына, какой подарок он желает получить ко дню рождения, он ответил: «Удиви меня! Подойдет все, что угодно, если это будет „Лего“». Я тоже люблю «Лего», и, мне кажется, наша Вселенная – тоже: все в ней состоит из одинаковых «строительных блоков» (рис. 7.1). По-моему, замечательно, что один набор космического конструктора (80 стабильных атомов периодической таблицы²⁹) может служить для создания вообще всего на свете – от камней до кроликов, от звезд до стереосистем, – и вся разница сводится к тому, сколько нужно деталей каждого типа и как они расположены.

²⁹ Существует 80 типов стабильных атомов, содержащих все числа протонов от 1 (водород) до 82 (свинец), за исключением 43 (технеций) и 61 (прометий) – они радиоактивны и нестабильны. Многие из этих атомов имеют несколько стабильных разновидностей (изотопов) с разным числом нейтронов. Общее число стабильных изотопов составляет 257. В природе встречается около 338 изотопов, включая около 30 с периодом полураспада более 80 лет и около 50 менее долгоживущих.

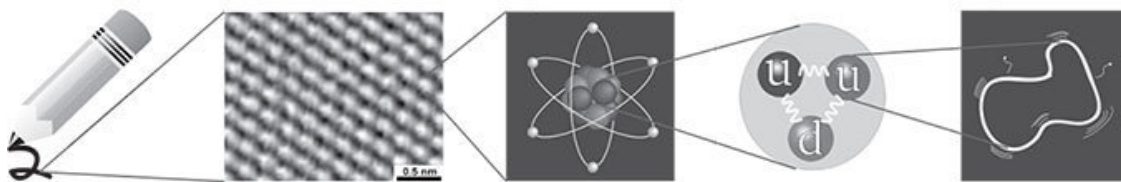


Рис. 7.1. Карандашный грифель сделан из графита, который состоит из слоев атомов углерода (здесь дано изображение, полученное сканирующим туннельным микроскопом), которые состоят из протонов, нейтронов и электронов. Протоны и нейтроны состоят из кварков, которые могут, в свою очередь, оказаться колеблющимися струнами. Сменный грифель, который я покупаю для работы, содержит около 2×10^{21} атомов, так что вы могли бы разрезать его пополам 71 раз.

Идея конструктора «Лего» – использование неделимых строительных блоков – имеет, конечно, долгую историю, причем самым термином «атом» мы обязаны древним грекам: это слово означает «неделимый». Платон в диалоге «Тимей» доказывал, что четыре основных элемента, признаваемых в то время (земля, вода, воздух и огонь), состоят из атомов четырех типов. Атомы представляют собой крошечные невидимые математические объекты – соответственно кубы, икосаэдры, октаэдры и тетраэдры, – четыре из пяти правильных многогранников, называемых в честь древнегреческого философа платоновыми телами (рис. 7.2). Платон писал, что острые углы тетраэдра обуславливают боль, причиняемую огнем, округлая форма икосаэдра обеспечивает текучесть воды, а уникальной способностью кубов к плотной укладке объясняется твердость Земли. Хотя эта очаровательная теория в итоге была опровергнута наблюдением, некоторые ее аспекты устояли, и среди них предположение о том, что каждый химический элемент состоит из определенного типа атомов, а свойства вещества определяются свойствами его атомов. Более того, в гл. 10 я объясню, что самые фундаментальные «строительные блоки» нашей Вселенной – математические (в ином смысле, нежели предполагал Платон: Вселенная не состоит из математических объектов, а сама является частью единственного математического объекта).



Рис. 7.2. Платоновы тела: тетраэдр, куб, октаэдр, додекаэдр и икосаэдр. Лишь додекаэдр не вошел в платоновскую атомистическую теорию.

Для становления современной атомной теории понадобилось два тысячелетия, а знаменитый австрийский физик Эрнст Мах еще в начале XX века отказывался верить в реальность атомов. Его, безусловно, впечатлили бы наши возможности получения изображений отдельных атомов (рис. 7.1) и даже манипулирования ими.

Ядерное «лего»

Огромный успех атомной гипотезы привел к вопросу, не ошибочно ли атом назван атомом, *неделимым*: если все макроскопические объекты состоят из «кубиков», которые мы

называем атомами, те, возможно, тоже делятся на еще меньшие «кубики», которые могут переупорядочиваться?

Мне кажется невероятно элегантным то, что атомы сложены всего из *трех* типов меньших «кубиков» – их даже меньше, чем в платоновской теории. Мы кратко говорили о них в гл. 3, а на рис. 7.1 видно, как «кубики» этих трех типов (протоны, нейтроны и электроны) komponуются наподобие миниатюрной планетной системы, где электроны обращаются вокруг компактного сгустка протонов и нейтронов – атомного ядра. В то время как Земля удерживается на орбите вокруг Солнца силой гравитации, электроны удерживаются в атомах электрическим взаимодействием, которое притягивает их к протонам (электроны имеют отрицательный заряд, протоны заряжены положительно, а противоположные заряды притягиваются). Поскольку электроны также чувствуют притяжение протонов других атомов, они помогают атомам соединяться друг с другом в более крупные структуры, называемые молекулами. Если атомные ядра и электроны перетасовываются без изменения их числа и типа, мы называем это химической реакцией, независимо от того, происходит ли это быстро, как лесной пожар (при котором в основном атомы углерода и водорода, входящие в состав древесины и листьев, соединяются с кислородом воздуха, образуя молекулы углекислого газа и воды), или медленно, как рост дерева (который в основном представляет собой обратную реакцию, протекающую под воздействием энергии солнечного света).

Столетиями алхимики пытались превратить атомы одного типа в другие: как правило, дешевые, например свинец, в более дорогие, такие как золото. Почему эти попытки терпели неудачу? Типы и названия атомов связаны с числом входящих в них протонов (1 = водород, 79 = золото и т. д.), так что алхимики просто не смогли поиграть в «лего» с протонами, перемещая их из одного атома в другой. Почему им это не удалось? Мы теперь знаем, что неудача постигла алхимиков не потому, что они брались за невозможное, а в основном потому, что у них было недостаточно энергии! Поскольку электрические силы заставляют одинаковые заряды отталкиваться, протоны в ядрах разлетелись бы, если бы их не удерживала вместе еще более могучая сила. Она вполне обоснованно получила название *сильного ядерного взаимодействия* и работает как своего рода застежка-липучка, удерживающая вместе и протоны, и нейтроны, если они сойдутся достаточно близко. Лишь чудовищное усилие способно преодолеть это взаимодействие: если столкновение двух молекул водорода (каждая из двух атомов) на скорости 50 км/с разрушит их так, что атомы разделятся, то два ядра гелия (каждое из двух протонов и двух нейтронов) понадобится столкнуть с головокружительной скоростью 36 тыс. км/с, чтобы иметь шанс разделить нейтроны и протоны. Указанная скорость составляет около 12 % скорости света (за десятую долю секунды можно добраться от Нью-Йорка до Сан-Франциско).

В природе такие зубодробительные столкновения происходят при очень высоких температурах – миллионах градусов. Когда Вселенная была молода, в ней не было иных атомов, кроме водорода (одиночных протонов), но, поскольку она была чрезвычайно горячей, протоны и нейтроны слипались, а более тяжелые атомы разбивались на части. В процессе расширения и охлаждения Вселенной был период длительностью несколько минут, когда столкновения еще были достаточно сильны, чтобы преодолевать электрическое отталкивание между протонами, но их силы уже не хватало на то, чтобы разъединять «липучки» сильного взаимодействия, которые соединяли протоны и нейтроны в ядра гелия. То был период гамовского первичного нуклеосинтеза (гл. 3). В ядре Солнца температура близка к магическому диапазону, в котором атомы водорода могут сливаться, образуя атомы гелия.

Законы экономики говорят нам, что атомы дороги, когда они редки, а законы физики говорят, что они редки, когда для их синтеза требуются необычайно высокие температуры. Распространенные атомы, вроде углерода, азота и кислорода (на них вкуче с водородом приходится до 96 % веса человеческого тела), очень дешевы. Обычные звезды, например

Солнце, выбрасывают их во время смертельной агонии, после чего из них формируются новые планетные системы в ходе своего рода космической переработки отходов. Золото, напротив, образуется, когда жизнь звезды оканчивается взрывом сверхновой, событием редким и столь мощным, что на доли секунды ее энерговыделение становится таким же, как у всех звезд в наблюдаемой Вселенной вместе. Неудивительно, что получение золота оказалось алхимикам не по плечу.

«Лего» элементарных частиц

Если вещи вокруг нас сложены из атомов, а атомы из еще меньших частиц (нейтронов, протонов и электронов), то не состоят ли эти последние, в свою очередь, из еще меньших деталей? История научила нас, как отвечать на такие вопросы экспериментально: столкните мельчайшие из известных «строительных блоков» по-настоящему сильно и проверьте, распадутся ли они. Эта процедура производилась на всех крупных коллайдерах, и все-таки не похоже, что электроны состоят из меньших частиц, хотя в ЦЕРНе их сталкивали на скорости, составляющей 99,999999999 % скорости света. С другой стороны, столкновения протонов показали, что и они, и нейтроны состоят из меньших частиц, называемых *верхними* и *нижними кварками*. Два верхних и один нижний кварк составляют протон (рис. 7.1), а два нижних и один верхний дают нейтрон. Более того, в этих столкновениях было получено множество прежде неизвестных частиц (рис. 7.3).

Все эти новые частицы с экзотическими названиями – *пионы*, *каоны*, *сигма*- и *омега-гипероны*, *мюоны*, *таоны*, *W*- и *Z*-бозоны – нестабильны и за доли секунды распадаются на более знакомые объекты. Тщательная детективная работа позволила выяснить, что все они, за исключением последних четырех, состоят из кварков – не только из верхнего и нижнего, но еще из четырех новых нестабильных типов, называемых *странными*, *очарованными*, *прелестными* и *истинными*³⁰. Оказалось, что *W*- и *Z*-бозоны отвечают за передачу *слабого взаимодействия*, обуславливающего радиоактивность, и являются братьями фотона, частицы света, которая переносит электромагнитное взаимодействие. Дополнительные члены семейства бозонов называются *глюонами*. Они как клей, связывающий кварки в более крупные частицы. А недавно обнаруженный бозон Хиггса наделяет другие частицы массой. Кроме того, открыты стабильные призрачные частицы – *электронные нейтрино*, *мюонные нейтрино* и *тау-нейтрино*. Они почти не взаимодействуют с иными частицами: если нейтрино врежется в Землю, то обычно пролетает ее насквозь, не меняя свою траекторию, и улетает в космос. Наконец, почти все эти частицы имеют «злых близнецов» – *античастицы*. При столкновении пара «близнецов» может аннигилировать друг друга с выбросом чистой энергии. В табл. 7.2 представлен список основных частиц и связанных с ними концепций, обсуждаемых в книге.

³⁰ Английские названия кварков таковы: *up*, *down*, *strange*, *charm*, *bottom/beauty* и *top/true*. Два последних названия еще не устоялись. В русской традиции предпочтение отдается *beauty* (прелестный) и *true* (истинный), поскольку, во-первых, от них легко образуются существительные, во-вторых, для *bottom* (самый нижний) и *top* (самый верхний) нет удобного перевода, отличающего их от верхнего и нижнего кварков. – Прим. пер.



Рис. 7.3. Стандартная модель физики элементарных частиц.

До сих пор нет признаков того, чтобы какая-либо частица из всех этих бозонов, кварков, лептонов (общее название для электрона, мюона, таона и соответствующих нейтрино) или их античастиц состояла из меньших или более фундаментальных частиц. Однако с учетом кварков как «строительных блоков» в иерархии нашего «лего» (рис. 7.1) получается три полных уровня. И не надо быть Шерлоком Холмсом, чтобы задаться вопросом, нет ли еще уровней, которые мы не можем открыть просто потому, что наши ускорители частиц не дают достаточной энергии. В самом деле, теория струн (гл. 6) предполагает, что так и есть. Если бы мы могли сталкивать частицы с гораздо (возможно, в 10 трлн раз) большей энергией, чем сегодня, то открыли бы, что все состоит из крошечных колеблющихся струн и что и что различные типы колебаний одинаковых фундаментальных струн могут соответствовать различным типам частиц (подобно тому, как колебания гитарной струны соответствуют разным нотам). Конкурирующая теория, известная как петлевая теория гравитации, предполагает, что все состоит не из струн, а из спиновой сети квантованных петель возбужденных гравитационных полей. Это труднопроизносимо, и если вы не вполне понимаете, что это значит, не беспокойтесь: и среди самых активных разработчиков теории струн и петлевой квантовой гравитации найдутся те, кто не скрывают, что не до конца понимают собственные теории... Так из чего же все состоит? Основываясь на современных экспериментальных данных, ответим: мы этого еще не знаем, но есть серьезные основания предполагать, что все, с чем мы были знакомы – включая саму ткань пространства-времени, – в конечном счете состоит из более фундаментальных «строительных блоков».

Математическое «лего»

Несмотря на то, что мы пока не знаем окончательного ответа на вопрос, из чего все состоит, мы получили очень интригующий намек. Лично мне кажется безумием, что, сталкивая два протона на Большом адронном коллайдере в ЦЕРНе, мы можем получить Z-бозон, который весит в 97 раз больше протона. Я привык думать, что масса сохраняется. Ну не

очевидно ли, что столкнув два «Феррари», вы не получите круизный лайнер – ведь он весит больше, чем два автомобиля? Однако если вам кажется, что образование подобных новых частиц – это мошенничество наподобие финансовой пирамиды, то вспомните, что, как учил нас Эйнштейн, энергия E может превращаться в массу m по формуле $E = mc^2$, где c – скорость света. Так что если при столкновении частиц у вас в распоряжении есть огромный запас энергии движения, то доли этой энергии действительно позволено пойти на образование новых частиц. Иными словами, полная энергия сохраняется, но столкновение частиц «переупаковывает» эту доступную энергию по-новому, что может приводить к превращению ее доли в новые частицы, которых в исходный момент не существовало. То же самое происходит с импульсом³¹: полная его величина сохраняется, но он перераспределяется в ходе столкновения так же, как в бильярде, когда биток, отправляя прежде неподвижный шар в лузу, замедляется. Одним из самых важных открытий в физике были новые величины, которые, подобно энергии и импульсу, кажутся всегда сохраняющимися (знакомый пример – электрический заряд), но есть и иного рода сохраняющиеся величины – изоспин и цвет. Есть также величины, которые сохраняются при многих важных обстоятельствах, в частности лептонное число (количество лептонов минус количество антилептонов) и барионное число (разность числа кварков и антикварков, разделенная на три, так что нейтроны и протоны считаются за + 1). В табл. 7.1 приведены квантовые числа – значения этих величин для разных частиц. Обратите внимание: большинство значений выражено целыми числами или простыми дробями. Значения трех масс как следует не измерены.

Частицы	Масса (МэВ)	Заряд	Спин	Изоспин	Барионное число	Лептонное число
Протон	938,3	1	1/2	1/2	1	0
Нейтрон	939,6	0	1/2	1/2	1	0
Электрон	0,511	-1	1/2	-1/2	0	1
Верхний кварк	1,5-4	2/3	1/2	1/2	1/3	0
Нижний кварк	4-8	-1/3	1/2	-1/3	1/3	0
Электронное нейтрино	$< 10^{-6}$	0	1/2	1/2	0	1
Фотон	0	0	1	0	0	0

Я помню шутку времен холодной войны: на Западе все, что не запрещено, то разрешено, а на Востоке все, что не разрешено, то запрещено. Физика частиц, по-видимому, предпочитает первую формулу, и любая реакция, которая не запрещена (из-за нарушения одного из законов сохранения), похоже, в природе действительно происходит. Это значит, что о фундаментальном «лего» физики частиц можно думать не как о собственно частицах, а как о сохраняющихся величинах. Тогда физика частиц – это просто перераспределение новым способом энергии, импульса, заряда и других сохраняющихся величин. В табл. 7.1 приводится «рецепт приготовления» верхнего кварка: смешать 2/3 единицы заряда, 1/2 еди-

³¹ Импульс объекта характеризует глубину воронки, которую тот может образовать, врезавшись в препятствие. Более строго – это время, которое потребуется, чтобы остановить объект, умноженное на среднюю силу, которую для этого придется прикладывать. Импульс p объекта с массой m , движущегося со скоростью v , – вычисляется как $p = mv$ (в случае, если v много меньше скорости света).

ницы спина, $1/2$ единицы изоспина, $1/3$ единицы барионного числа и дополнить энергией до нескольких МэВ.

Так из чего состоят квантовые числа вроде энергии и заряда? Ни из чего – это просто числа! У кота тоже есть энергия и заряд, но у него, помимо этих чисел, есть много других свойств, например кличка, запах и характер, так что нельзя сказать, будто кот – чисто математический объект, полностью описываемый двумя числами. А вот наши друзья из мира элементарных частиц полностью описываются своими квантовыми числами и, по-видимому, помимо этих чисел свойств не имеют. В этом смысле мы завершили полный круг и возвратились к Платону: наимельчайшие «кубики», из которых состоит все остальное, кажутся чисто математическими, не имеющими никаких свойств, кроме математических. Мы вернемся к этой идее в гл. 10 и увидим, что это лишь вершина математического айсберга.

На техническом уровне некоторые специалисты по физике элементарных частиц любят на вопрос, что такое частица, бойко отвечать: «Элемент неприводимого представления группы симметрий лагранжиана». Это чисто математическое понятие лишь немного более общее, чем представление о числовом множестве. И, конечно, теория струн или ее конкурент могут углубить наше понимание того, что в действительности представляют собой частицы, но все эти ведущие теории просто заменяют одни математические сущности иными. Так, если квантовые числа из табл. 7.1 окажутся соответствующими типами колебаний суперструн, не стоит думать о *струнах* как о крошечных объектах с внутренними свойствами, будто это колтуны в рыжевато-коричневой кошачьей шерсти. Следует смотреть на них как на чисто математические конструкции, которые физики называют «струнами» лишь для того, чтобы подчеркнуть их одномерную природу и провести аналогию с чем-либо знакомым и в меньшей степени математическим.

Табл. 7.2. Основные физические термины, необходимые для понимания микромира.

Шпаргалка по физике элементарных частиц	
Импульс	Глубина воронки, которая может образоваться при столкновении с препятствием. Или, более строго, — время, которое потребуется, чтобы остановить объект, умноженное на среднюю силу, которую для этого придется к нему приложить.
Момент импульса (угловой момент)	Мера количества вращения объекта. Более строго: время, которое потребуется, чтобы остановить его вращение, умноженное на средний момент сил (крутящий момент), который придется для этого приложить.
Спин	Угловой момент отдельной частицы, крутящейся вокруг своего центра.
Сохраняющаяся величина	Величина, которая остается постоянной во времени и не может ни создаваться, ни уничтожаться. Таковы энергия, импульс, угловой момент, электрический заряд.
Атом	Электроны, обращающиеся вокруг ядра из протонов и нейтронов; число протонов определяет тип и название атома (1 = водород, 2 = гелий и т. д.).
Электрон	Отрицательно заряженная частица, составляющая электрического тока.
Протон	Положительно заряженная частица, входящая в состав атомных ядер и состоящая из двух верхних кварков и одного нижнего.
Нейтрон	Частица без электрического заряда, входящая в состав атомных ядер и состоящая из двух нижних и одного верхнего.
Фотон	Частица света.
Глюон	Частица, которая помогает “склеивать” кварковые триплеты, образуя протоны и нейтроны.
Нейтрино	Частица настолько скрытная, что может пройти Землю насквозь, ни с чем не взаимодействуя.
Фермион	Частица, которая не может находиться в одном и том же месте и состоянии с другой идентичной частицей. Таковы электроны, кварки, нейтрино.
Бозон	Частица, которая предпочитает находиться в том же месте и состоянии, что и другие идентичные частицы. Таковы фотоны, глюоны, частица Хиггса.

Подводя итог, скажем, что природа сродни конструктору с иерархическим устройством. Если мой сын играет со своим «лего», полученным ко дню рождения, то все, что он может перестраивать, — фабричные «кубики». Если бы он играл в атомное «лего» — поджигал, погружал в кислоту или иным способом перестраивал их атомы, — он занимался бы химией. Если бы он играл с нуклонным «лего», перегруппируя нейтроны и протоны в дру-

гие типы атомов, это была бы ядерная физика. Если бы он сталкивал детали друг с другом на околосветовой скорости, реорганизуя энергию, импульс, заряд и т. д. составляющих их нейтронов, протонов и электронов в новые частицы, он бы занимался физикой элементарных частиц. Детали «лего» самого глубокого уровня, по-видимому, являются чисто математическими объектами.

Фотонное «лего»

Но не только «грубая материя» состоит из «строительных блоков», подобных деталям «Лего». Свет также состоит из частиц, *фотонов*, что было показано Эйнштейном в 1905 году.

Четырьмя десятилетиями ранее Джеймс Клерк Максвелл открыл, что свет – это электромагнитные волны, разновидность электрического возмущения. Если вы научитесь точно измерять напряжение между двумя точками в световом луче, то обнаружите, что оно колеблется во времени. Частота f этих колебаний (сколько раз они повторяются за секунду) определяет цвет света, а сила колебаний (максимальные значения в вольтах) – интенсивность света. «Омнископ» из гл. 4 измеряет такое напряжение. Мы, люди, даем электромагнитным волнам названия в зависимости от их частоты (в порядке увеличения частоты мы называем их радиоволнами; микроволнами; инфракрасным излучением; красным, оранжевым, желтым, зеленым, голубым, синим и фиолетовым светом; ультрафиолетовым, рентгеновским и гамма-излучением), но все они представляют собой формы света и состоят из фотонов. Чем больше фотонов испускает объект каждую секунду, тем ярче он кажется.

Эйнштейн понял, что количество энергии E в фотоне определяется его частотой f по формуле $E = hf$, где h – постоянная Планка. Постоянная h очень мала, поэтому типичный фотон содержит очень мало энергии. Если я одну секунду лежу на пляже, меня согревают около секстиллиона (10^{21}) фотонов. Вот почему это воспринимается как непрерывный поток света. Однако если у моих друзей есть солнечные очки, поглощающие 90 % света, я смогу надеть 21 пару сразу и только один из всех исходных фотонов будет доходить до меня каждую секунду. Это можно подтвердить с помощью высокочувствительного детектора.

Эйнштейн удостоился Нобелевской премии за то, что он использовал эту идею для объяснения *фотоэлектрического эффекта*: как выяснилось, способность света выбивать электроны из металла зависит лишь от частоты (энергии фотонов), но не от интенсивности (числа фотонов). Низкочастотные фотоны не обладают достаточной энергией для выполнения этой задачи. Фотоэлектрический эффект связан с процессами, используемыми в современных солнечных батареях и светочувствительных матрицах цифровых камер.

Макс Планк получил в 1918 году Нобелевскую премию за демонстрацию того, что идея фотона позволила разрешить другую знаменитую загадку: почему расчеты теплового излучения горячего тела прежде не давали правильного результата. Радуга (рис. 2.5) демонстрирует спектр солнечного света, то есть количество содержащегося в нем света разных частот. Физики знали, что температура T тела является некоей мерой того, насколько быстро движутся его частицы, и что обычная энергия E движения частиц описывается формулой $E = kT$, где k – число, называемое постоянной Больцмана. Когда частицы на Солнце сталкиваются, энергия их движения в количестве примерно kT превращается в энергию света. К сожалению, точное предсказание вида радуги наталкивалось на так называемую ультрафиолетовую катастрофу: интенсивность излучения бесконечно возрастала на правом краю рис. 2.5 (в направлении высоких частот), как будто при взгляде на любое теплое тело вы должны были ослепнуть от его гамма-излучения. Вас спасает то, что свет состоит из частиц: Солнце может испускать световую энергию только по одному фотону за раз, а характерная энергия kT , доступная для образования фотонов, не дотягивает до энергии hf , необходимой для испускания даже одного гамма-кванта.

Выше закона?

Если все состоит из частиц, каким физическим законам они подчиняются? Если мы знаем, что делают в данный момент все частицы во Вселенной, то по каким уравнениям можно рассчитать, как они будут себя вести в будущем? Если такие уравнения существуют, то мы можем надеяться, что они позволят – по крайней мере, в принципе – предсказывать будущее исходя из знания настоящего: от траектории только что поданного бейсбольного мяча до победителей Олимпийских игр 2048 года – только выясните, что будут делать все эти частицы, и получите ответ.

Хорошая новость состоит в том, что, похоже, действительно существует почти то самое уравнение, которое нам нужно. Это уравнение Шредингера (*рис. 7.4*). Однако оно не предсказывает точно, как поведут себя частицы. Даже почти сто лет спустя после того, как Эрвин Шредингер его записал, физики продолжают спорить об его смысле.

Все согласны с тем, что микроскопические частицы не подчиняются классическим законам физики, которые мы изучаем в школе. Поскольку атом напоминает планетную систему (*рис. 7.1*), естественно предположить, что электроны обращаются вокруг ядра по законам Ньютона, как и планеты вокруг Солнца. В самом деле, если выполнить расчеты, идея сначала выглядит многообещающей. Игрушку йо-йо можно раскрутить над головой за шнурок. Если он оборвется, йо-йо начнет двигаться по прямой с постоянной скоростью, так что сила, с которой вы ее тянете, требуется для отклонения ее от прямолинейного движения и вывода на круговое. В Солнечной системе эту силу обеспечивает тяготение Солнца, а в атоме – сила электрического притяжения со стороны атомного ядра. Если сделать расчет для орбиты размером с атом водорода, получится, что электрон вращается практически с той же скоростью, которая измерена в лаборатории – настоящий теоретический триумф! Однако для большей точности в расчеты надо включить еще один эффект: электрон, который испытывает ускорение (изменение скорости или направления движения), будет излучать энергию – в вашем мобильном телефоне колебания электронов внутри антенны используются, чтобы испускать радиоволны. Поскольку энергия сохраняется, излучаемая энергия должна откуда-то браться. В телефоне она поступает из аккумулятора, а в атоме водорода – из движения электрона. Она заставляет его опускаться все ближе к атомному ядру, подобно тому, как сопротивление воздуха в верхних слоях атмосферы заставляет спутники на низких околоземных орбитах терять энергию движения и, в конце концов, падать. Это означает, что электрон крутится не по орбите, а по смертельной спирали (*рис. 7.5*): примерно после 100 тыс. оборотов он врежется в протон, то есть произойдет коллапс атома водорода, долгая и счастливая жизнь которого длится около $0,02 \text{ нс}$ ³².

³² Электрон, прежде чем он столкнется с протоном, совершает около $1/8\pi\alpha^3 \sim 10^5$ витков, где $\alpha \approx 1/137,03599968$ – безразмерная сила электромагнитного взаимодействия, называемая также постоянной тонкой структуры. Замечательный расчет смертельной спирали см. здесь: <http://www.physics.princeton.edu/~mcdonald/examples/orbitdecay.pdf>.



Рис. 7.4. Эрвин Шредингер умер, но его уравнение живет. С 1996 г., когда я сделал этот снимок, шрифт надписи загадочно изменился. Может, и вправду квантовые причуды никогда не заканчиваются?

Это плохо. Очень плохо. Здесь речь не о небольшом, скажем на 1 %, расхождении теории с экспериментом, а о предсказании того, что все атомы водорода (а также все прочие атомы) в нашей Вселенной коллапсируют за миллиардную долю того времени, которое вы тратите на то, чтобы прочесть последнее слово в этом предложении. С учетом того, что в действительности большинство атомов водорода существует около 14 млрд лет, они уже прожили на 28 порядков величины дольше, чем предсказывает классическая физика. Данный расчет был худшим количественным предсказанием в физике, пока сомнительный рекорд не был превзойден расхождением на 123 порядка величины между предсказанной и измеренной плотностью темной энергии (гл. 3).

Физики, считавшие, что элементарные частицы подчиняются законам классической физики, сталкивались и с иными проблемами. Например, количество энергии, требуемой для нагревания очень холодных предметов, оказалось меньше, чем предсказывалось. Проблемы можно перечислять и дальше, но послание Природы и так ясно: микроскопические частицы нарушают законы классической физики.

Что же, микрочастицы ставят себя выше закона? Нет, они подчиняются другому закону – шредингеровскому.

Кванты и радуга

Чтобы объяснить, как устроены атомы, датский физик Нильс Бор предложил в 1913 году весьма радикальную идею. Возможно, не только материя и свет квантуются (то есть существуют в виде дискретных фрагментов, подобных деталям «Лего»). Это может относиться и к свойствам движения. Что если движение не непрерывно, а скачкообразно, как в компьютерной игре «Пэкмен» или в фильмах с Чарли Чаплином, где частота кадров была слишком низкой? На рис. 7.5 показана модель атома Бора: круговые орбиты разрешены,

лишь если их окружности имеют определенные, магические длины. Существует наименьшая орбита, помеченная $n = 1$, а далее есть орбиты большего размера ($n = 2$ и т. д.), радиусы которых в n^2 раз больше радиуса минимальной орбиты³³.

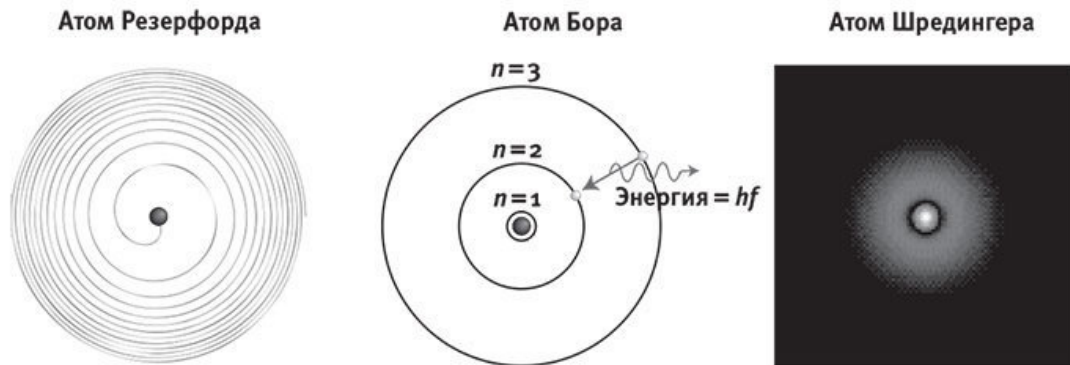


Рис. 7.5. Эволюция наших представлений об атоме водорода. Классическая (планетарная) модель Эрнеста Резерфорда, к сожалению, была неустойчивой: в ней электрон по спирали падал на находящийся в центре протон (я изображаю, как бы это выглядело, если бы электрическое взаимодействие было в 20 раз сильнее; иначе спираль имела бы около 100 тыс. витков, что невозможно нарисовать). Модель Бора удерживает электрон на дискретных орбитах, пронумерованных $n = 1, 2, 3, \dots$, между которыми он перепрыгивает, когда испускает или поглощает фотоны. Эта модель не работает для всех атомов, кроме атома водорода. В модели Шредингера один электрон находится одновременно во многих местах электронного облака, форма которого задается математической функцией Ψ .

Первый, самый очевидный успех состоял в том, что боровский атом не коллапсировал, как классический (рис. 7.5, слева). Когда электрон находится на самой внутренней орбите, просто не существует меньшей орбиты, куда он мог бы перескочить. Однако модель Бора объясняла далеко не только это. Высокие орбиты обладают большей энергией, чем низкие, а полная энергия сохраняется. Поэтому, когда электрон, будто «Пэкмен», соскакивает на более низкую орбиту, избыток энергии должен быть испущен атомом в виде фотона (рис. 7.5), а чтобы занять более высокую орбиту, электрон должен быть способен заплатить энергетическую «цену», поглотив фотон с нужной энергией. Поскольку существует только дискретный набор орбитальных энергий, атом может испускать и поглощать фотоны лишь с «магическими» энергиями. Иными словами, атом может испускать и поглощать свет только на определенных частотах. Это разрешает давнюю проблему. В спектре солнечного света (рис. 2.5) обнаружены темные линии на определенных частотах (то есть некоторые цвета отсутствуют), а при изучении горячих светящихся газов в лаборатории наблюдалось, что каждый тип атомов имеет уникальный спектральный «отпечаток» в виде частот света, которые он может испускать и поглощать. Боровская модель атома не просто объяснила существование этих спектральных линий, но и позволила точно вычислить их частоты для водорода³⁴.

³³ То, что сделал Бор, было в действительности эквивалентно тому предположению, что *угловой момент* электронной орбиты квантуется и может быть равен только кратному значению приведенной постоянной Планка \hbar , определяемой как $h/2\pi$. По аналогии с импульсом можно рассматривать угловой момент вращающегося объекта как меру времени, которое потребуется, чтобы остановить вращение, умноженное на приложенный момент сил (крутящий момент). Объект, вращающийся по круговой орбите радиуса r с импульсом p , имеет угловой момент rp .

³⁴ Энергии орбит равны E^1/n^2 , где E^1 называют энергией низшей орбиты, так что, перескакивая между орбитами n^1 и

Это был отличный результат, и Бор получил за него Нобелевскую премию (как и большинство остальных ученых, упомянутых в этой главе). Плохой новостью стало то, что боровская модель не работала для атомов, отличных от водорода, за исключением случая, когда с них сорваны все электроны, кроме одного.

Образование волн

Несмотря на первые успехи, физики по-прежнему не знали, что делать с этими странными, на первый взгляд произвольными квантовыми правилами. Что они в действительности означают? *Почему* угловой момент квантуется? Есть ли этому более глубокое объяснение? Одно из них предложил Луи де Бройль: электроны (а на самом деле все частицы) обладают волновыми свойствами, подобно фотонам. Во флейте стоячие звуковые волны могут колебаться только на некоторых определенных частотах. Может быть, чем-либо аналогичным определяются и частоты, с которыми электроны обращаются в атомах?

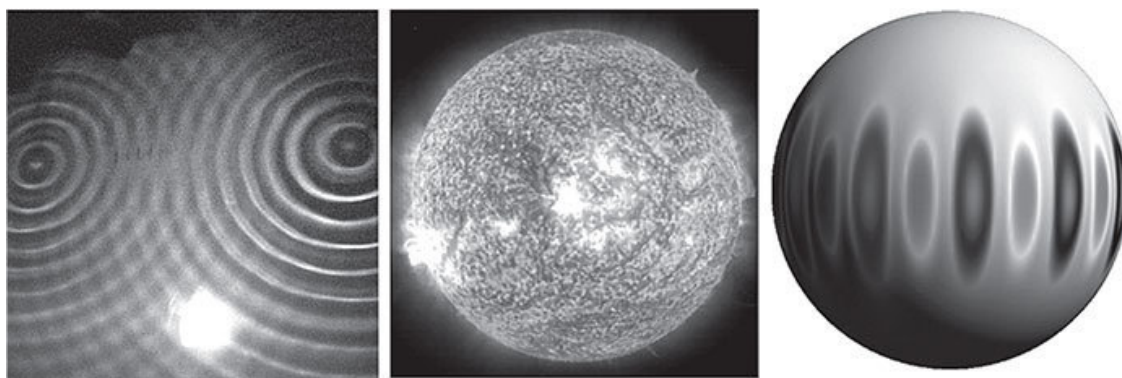


Рис. 7.6. Волны в емкости с водой (слева) и на Солнце (справа).

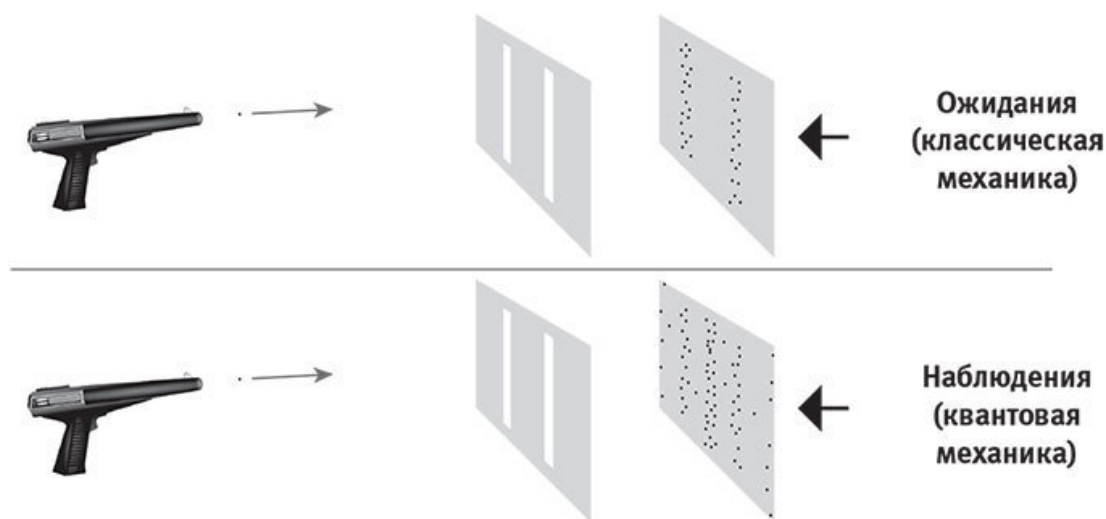


Рис. 7.7. Если стрелять частицами (скажем, электронами или фотонами из лазерного ружья) по барьеру с двумя вертикальными щелями, то, согласно предсказанию классической физики, частицы будут попадать в детектор вдоль двух вертикальных полос позади щелей. Квантовая механика предсказывает, что каждая частица будет вести себя как волна, проходя

n^2 , электрон может испускать фотоны со всеми значениями энергии вида $(1/n^2_2 - 1/n^2_1)E_1$.

через *обе* щели в квантовой суперпозиции, интерферируя при этом сама с собой и образуя интерференционную картину (рис. 7.6). Этот знаменитый эксперимент демонстрирует, что квантовая механика корректна: частицы регистрируются у целого ряда вертикальных полос.

Две волны способны без помех проходить друг сквозь друга, как круги на поверхности воды (рис. 7.6, слева). В любой момент их воздействия просто складываются. В некоторых местах видно, что гребни двух волн складываются в еще более высокий гребень (конструктивная интерференция), в других местах гребень одной волны подавляется впадиной другой, оставляя воду совершенно невозмущенной (деструктивная интерференция). На поверхности Солнца (рис. 7.6, справа) наблюдаются звуковые волны в горячем газе (плазме). Если такая волна обойдет вокруг Солнца (справа), она погасит сама себя в результате деструктивной интерференции, если только не совершит за время обхода целое число колебаний, чтобы, вернувшись, совпасть с самой собой. Это значит, что, как и флейта, Солнце колеблется только на некоторых определенных частотах³⁵.

В своей диссертации 1924 года де Бройль применил это рассуждение к волнам, распространяющимся не по Солнцу, а по атому водорода, и получил точно те же частоты и энергии, которые предсказывала модель Бора. А двухщелевой эксперимент (рис. 7.7) более явно продемонстрировал, что частицы ведут себя как волны.

Волновая картина делает нагляднее и объяснение того, почему атомы не коллапсируют, как предсказывает классическая физика: если попытаться заключить волну в очень малое пространство, она немедленно начнет распространяться в стороны. Например, если дождевая капля падает на поверхность воды в тазу, она сначала возмущает воду лишь в очень небольшой области, с которой она соприкоснулась, но возмущение начинает быстро распространяться во все стороны в виде кольцевых волн (рис. 7.6). В этом суть *принципа неопределенности Гейзенберга*. Вернер Гейзенберг показал: если зажать некий объект в малую область пространства, он приобретет огромный случайный импульс, который заставит его двигаться и чувствовать себя менее стесненным. Иными словами, объект не может одновременно иметь точное положение и точную скорость!³⁶ Это означает, что если атом водорода попытается коллапсировать (рис. 7.5, слева), притянув электрон к протону, то растущая «зажатость» придаст электрону достаточный импульс, а с ним и скорость, чтобы вновь улечь на высокую орбиту.

Диссертация де Бройля вызвала большое волнение, и в ноябре 1925 года Эрвин Шредингер провел по ней семинар в Цюрихе. После его доклада Питер Дебай задал ключевой вопрос: «Вы говорите о волнах, но где же волновое уравнение?» Шредингер взялся его вывести и подобрал (рис. 7.4) отмычку к большей части современной физики. Эквивалентная формулировка, использующая таблицы чисел, называемые *матрицами*, была примерно в то же время предложена Максом Борном, Паскуалем Йорданом и Вернером Гейзенбергом. На этом новом математическом фундаменте квантовая теория испытала взрывной рост. Всего за несколько лет удалось успешно объяснить целый ряд прежде непонятных результатов измерений, включая спектры сложных атомов и различные числовые параметры, описывающие свойства химических реакций. Наконец, квантовая физика дала нам лазер, транзистор, интегральные схемы, компьютеры и смартфоны. Развитием успеха квантовой механики стала расширяющая ее квантовая теория поля, которая лежит в основе передовых современных исследований, таких как поиск частиц темной материи.

³⁵ Такое же явление наблюдается в автомобильных шинах на очень высокой скорости, а возникающие при этом звуковые волны резонируют внутри камеры, чем могут нанести ущерб вашему бюджету.

³⁶ Если неопределенность положения частицы составляет Δx , а неопределенность импульса Δp , то принцип неопределенности Гейзенберга гласит, что $\Delta x \cdot \Delta p \geq \hbar/2$, где \hbar , как и прежде, – приведенная постоянная Планка $\hbar/2\pi$. Математически неопределенность каждой величины определяется как стандартное отклонение ее распределения вероятности.

Что служит признаком хорошей науки? Есть несколько определений науки, которые мне нравятся, и одно из них – это *сжатие данных*, объяснение многого посредством немногого. От хорошей науки вы получаете больше, чем в нее закладываете. Я применил обычную программу-архиватор к текстовому файлу, содержащему черновик этой главы, и он сжался втрое за счет использования закономерностей и шаблонов, которые встречаются в моем тексте. Сравним это с квантовой механикой. Я только что загрузил со страницы http://physics.nist.gov/PhysRefData/ASD/lines_form.html список более чем из 20 тыс. спектральных линий, для которых в лабораториях по всему миру тщательно измерены частоты. С учетом закономерностей и повторяющихся структур, содержащихся в этих данных, уравнение Шредингера позволяет сжать их всего до трех чисел: постоянной тонкой структуры $\alpha \approx 1/137,036$, которая задает силу электромагнетизма; числа 1836,15, которое указывает, во сколько раз протон тяжелее электрона, и орбитальной частоты водорода. Это эквивалентно такому сжатию данных, при котором моя книга сократится до одного предложения!

Эрвин Шредингер – один из моих физиков-супергероев. Когда я был постдоком в Институте физики общества им. Макса Планка в Мюнхене, копировальная машина в тамошней библиотеке разогревалась так долго, что я коротал время, снимая с полок и просматривая классические книги. Однажды я взял журнал «Анналы физики» за 1926 год и поразился: почти все, изучавшееся мной на лекциях по квантовой теории в аспирантуре, было описано в четырех статьях Шредингера! Он был не только блестящим физиком, но и свободным мыслителем: он отвергал авторитеты, размышлял и делал то, что считал правильным. Получив профессорскую должность в Институте Общества им. Макса Планка в Берлине, одну из самых престижных в мире, Шредингер подал в отставку в знак протеста против преследования нацистами своих коллег-евреев. Затем он отклонил предложение поработать в Принстоне, поскольку там не одобряли его взгляды на брак (он жил с двумя женщинами и имел ребенка от той, на которой не был женат). Предприняв в 1996 году, во время отпуска в Австрии, паломничество к могиле Шредингера, я обнаружил, что свободомыслие не в почете и в родном городке ученого. Как видно на сделанной мной фотографии (*рис. 7.4*), крошечный Альпбах похоронил своего самого знаменитого гражданина в предельно скромной могиле на самом краю кладбища.

Квантовые причуды

Но что это за волны, которые описываются уравнением Шредингера? Главная загадка квантовой механики по сей день сохраняет свою глубину и дискуссионность.

Когда физики что-то описывают математически, обычно описание должно включать две вещи:

1. Состояние в заданное время.
2. Уравнение, описывающее, как это состояние будет изменяться во времени.

Например, для описания орбиты Меркурия Ньютон определял его состояние шестью числами: три задают положение его центра (скажем, его x -, y - и z -координаты), а еще три – компоненты скорости по этим направлениям³⁷. В качестве уравнений движения он применил закон (известен теперь как закон Ньютона), гласящий: ускорение определяется гравитационным притяжением Солнца, которое зависит от расстояния до Солнца по закону обратных квадратов.

³⁷ Если вы знакомы с векторным анализом, можете рассматривать состояние как радиус-вектор r и его производную \dot{r} (вектор скорости).

Нильс Бор в своей планетарной модели атома (рис. 7.5, в центре) изменил вторую часть описания, введя квантовые скачки между особыми орбитами, но сохранил первую часть. Шредингер пошел еще дальше, изменив и первую часть: он отбросил саму мысль, что частица *обладает* четко определенными положением и скоростью. Вместо этого Шредингер описал состояние частицы совершенно новой математической бестией, называемой *волновой функцией* (Ψ), которая характеризует степень присутствия частицы в разных местах. На рис. 7.5 (справа) показан квадрат³⁸ волновой функции $|\Psi|^2$ для электрона в атоме водорода на орбите с $n = 3$, и там видно, что вместо пребывания в одном конкретном месте он выглядит находящимся в равной мере со всех сторон от протона (предпочитая при этом одни радиальные расстояния иным). Интенсивность *электронного облака* (рис. 7.5, справа) в разных участках характеризует степень, в которой электрон там присутствует. Если вы возьметесь экспериментально отслеживать электрон, окажется, что квадрат волновой функции дает вероятность того, что вы обнаружите его в разных местах, так что некоторые физики предпочитают думать о волновой функции как об описании *облака вероятности* или *волны вероятности*. Например, вы никогда не найдете частицу там, где волновая функция равна нулю. Если вы хотите расшевелить вечеринку, выдав себя за квантового физика, то вот вам еще одно словечко, – *суперпозиция*: о частице, которая находится одновременно здесь и там, говорят, что она находится в суперпозиции положений *здесь* и *там*, а ее волновая функция описывает все, что нужно знать об этой суперпозиции.



Рис. 7.8. Волновая функция Ψ на грани коллапса.

Квантовые волны разительно отличаются от классических волн на рис. 7.6: классическая волна, на которой можно заниматься серфингом, состоит из воды, а сущностью, которая принимает волнистую форму, является поверхность воды. А вот сущность, которая является

³⁸ Если вы ценитель математики и любите комплексные числа, вам будет приятно узнать, что волновая функция задает комплексное число $\Psi(r)$ для каждой точки r в пространстве. То, что я называю в этой книге «квадратом» волновой функции, в действительности есть $|\Psi|^2$, – квадрат абсолютной величины $|\Psi|$ волновой функции, который определяется как квадрат вещественной части плюс квадрат мнимой части. А если вы не любитель математики, не тревожьтесь: вы все равно сможете понять мои ключевые рассуждения.

волнистой или облачной в атоме водорода – это не вода или какая-то иная субстанция (ведь там есть лишь один электрон). То, что является волнистым в его волновой функции – это степень, с которой он присутствует в разных местах.

Коллапс консенсуса

Итак, можно сказать, что Шредингер изменил классическое описание мира в двух аспектах:

1. *Состояние* описывается не положениями и скоростями частиц, а волновой функцией.
2. *Изменение* этого состояния во времени описывается не законами Ньютона и Эйнштейна, а уравнением Шредингера.

Всеми признано, что эти открытия Шредингера входят в число главных достижений XX века: ведь они произвели революцию и в физике, и в химии. Но они также заставляют недоумевать: если предметы могут находиться в нескольких местах сразу, то почему мы никогда этого не наблюдаем (во всяком случае, на трезвую голову)? Эта загадка известна как *проблема измерения* (в физике *измерение* и *наблюдение* – синонимы).

После долгих дискуссий Бор и Гейзенберг нашли поразительно радикальное средство, *копенгагенскую интерпретацию*, которую сегодня отстаивает большинство учебников квантовой механики. Ее ключевым элементом является добавление ко второму из упомянутых выше пунктов увертки, гласящей: изменения управляются уравнением Шредингера лишь *часть времени*, зависящую от того, осуществляется ли *наблюдение*. А именно, если нечто *не* наблюдается, его волновая функция меняется согласно уравнению Шредингера. А если производится наблюдение объекта, его волновая функция *коллапсирует* таким образом, что объект обнаруживается лишь в одном месте. Процесс коллапса скачкообразный и принципиально случайный, а вероятность того, что вы обнаружите частицу в любом конкретном месте, определяется квадратом волновой функции. Таким образом, коллапс волновой функции удобно избавляет от шизофренических суперпозиций и объясняет знакомый нам классический мир, где вещи наблюдаются лишь в одном месте в каждый момент времени. В табл. 7.3 приводятся ключевые квантовые идеи, которые мы успели обсудить, и указываются их взаимосвязи.

Табл. 7.3. Ключевые концепции квантовой механики (гильбертово пространство и последние три понятия мы введем в следующей главе).

Шпаргалка по квантовой механике	
Волновая функция	Математическая сущность, описывающая состояние объекта. Волновая функция частицы описывает степень, в которой частица присутствует в разных местах.
Суперпозиция	Квантово-механическая ситуация, при которой нечто находится более чем в одном состоянии сразу, например в двух разных местах.
Уравнение Шредингера	Уравнение, которое предсказывает, как волновая функция станет изменяться в будущем.
Гильбертово пространство	Абстрактное математическое пространство, в котором обитает волновая функция.
Коллапс волновой функции	Гипотетический случайный процесс, в котором волновая функция резко меняется в нарушение уравнения Шредингера и придает измерению однозначный результат. Отсутствие коллапса волновой функции имеет следствием мультиверс уровня III Хью Эверетта.
Проблема измерения	Спорный вопрос: коллапсирует ли волновая функция во время квантового измерения?
Копенгагенская интерпретация	Набор предположений, включающий коллапс волновой функции при измерении.
Интерпретация Эверетта	Предположение, что волновая функция никогда не коллапсирует. Это приводит к мультиверсу уровня III (гл. 8).
Декогеренция	Эффект цензуры, вытекающий из уравнения Шредингера, согласно которому суперпозиции становятся ненаблюдаемыми, если они не сохраняются в тайне от остального мира. Это порождает впечатление коллапса волновой функции, даже если он на самом деле не происходит (гл. 8).
Квантовое бессмертие	Идея, что мы субъективно вечны, если существует мультиверс уровня III. Я подозреваю, что квантового бессмертия не существует, поскольку континуум является иллюзией (гл. 11).

В копенгагенской интерпретации есть и другие элементы, но с приведенной частью согласно большинство физиков. Постепенно я стал замечать, что коллеги, признающие наилучшей копенгагенскую интерпретацию квантовой механики, обычно не соглашались друг с другом относительно некоторых других ее элементов, отчего правильнее говорить о *копенгагенских интерпретациях*. Один из пионеров релятивизма Роджер Пенроуз язвил: «Существует больше разных отношений к квантовой механике, чем квантовых физиков. Это не является противоречием, поскольку некоторые квантовые физики придерживаются различных взглядов одновременно». На самом деле даже Бор и Гейзенберг расходились во взглядах на природу реальности. Однако все физики соглашались: копенгагенская интерпретация великолепно подходит для повседневной работы в лаборатории.

Не все, однако, были в восторге. Если коллапс волновой функции действительно происходит, то, значит, фундаментальная случайность учтена законами природы. Эйнштейн был глубоко огорчен этой интерпретацией и выразил свое предпочтение детерминистической

Вселенной в часто цитируемом высказывании: «Я не могу поверить, что Бог играет в кости». В конце концов, сама суть физики состоит в предсказании будущего исходя из настоящего, а это становится невозможным не только практически, но и принципиально. Даже если вы бесконечно мудры и знаете волновую функцию всей Вселенной, вы не сможете вычислить, какой станет волновая функция в будущем: как только кто-либо в нашей Вселенной выполнит наблюдение, волновая функция случайным образом изменится.

Еще один пугающий аспект коллапса состоит в том, что наблюдение приобрело статус центральной концепции. Когда Бор воскликнул: «Нет реальности без наблюдения!» – казалось, он вновь поместил человека в центр мироздания. После Коперника, Дарвина и других, постепенно выпускавших воздух из раздутого человеческого самомнения, копенгагенская интерпретация порождает впечатление, что мы в некотором смысле создаем реальность, просто глядя вокруг.

Наконец, некоторых физиков раздражало отсутствие математической строгости. Традиционные физические процессы описываются математическими уравнениями, а в копенгагенской интерпретации нет уравнения, определяющего, что представляет собой наблюдение, то есть когда именно коллапсирует волновая функция. Действительно ли для этого требуется наблюдатель-человек, или для коллапса волновой функции достаточно сознания в некоем более широком смысле? Эйнштейн сказал: «Существует ли Луна потому, что на нее смотрит мышь?» Может ли робот вызвать коллапс волновой функции? А что можно сказать о веб-камере?

Без причуд никуда

Короче говоря, копенгагенская интерпретация предполагает, что малые объекты могут вести себя причудливо, а крупные – нет. То есть объекты столь малые, как атомы, обычно находятся в нескольких местах сразу, а крупные, вроде людей, – лишь в одном. Немного неудобно, конечно, но это вполне разумная точка зрения, пока странности остаются пленниками микромира и не могут каким-либо образом проникнуть в макромир, подобно тому, как заключенный в бутылку злой джинн не может вырасти и опустошить все вокруг. Но в самом ли деле они остаются в заключении?

Одной из вещей, взволновавших меня, сидевшего в комнате стокгольмского общежития, была вот такая: крупные предметы состоят из атомов, а поскольку атомы могут находиться в нескольких местах сразу, то и предметы на это способны. Но поскольку то, что они *могут*, не означает, что они *должны*, есть надежда, что не существует физических процессов, усиливающих микроскопические причуды до макроскопических чудес. Сам Шредингер, однако, пошатнул эту надежду своим дьявольским мысленным экспериментом: кот посажен в ящик с ампулой цианида, которая разобьется, если распадется один радиоактивный атом. Спустя некоторое время атом будет находиться в суперпозиции распавшегося и нераспавшегося состояний, а кот окажется в суперпозиции мертвого и живого. Иными словами, безобидная, казалось бы, микросуперпозиция, затрагивающая один-единственный атом, усиливается со временем до макросуперпозиции, в которой кот, содержащий октиллионы частиц, находится в двух состояниях сразу. Более того, подобное усиление причуд происходит постоянно, даже без всяких садистских приспособлений. Вы, возможно, слышали о теории хаоса, о том, что законы классической физики могут экспоненциально усиливать незначительные различия, так что пекинская бабочка, махнув крылом, вызывает бурю в Стокгольме. Еще более простой пример: поставленный вертикально карандаш, который в зависимости от микроскопического начального толчка выбирает направление, в котором он упадет. Где бы ни проявлялась хаотическая динамика, начальное положение одного атома

может все переменить, так что если атом находится сразу в двух местах, вы в результате получите макроскопические предметы, находящиеся сразу в двух местах.

Такое усиление причуд, очевидно, случается всякий раз, когда мы производим квантовые измерения: если вы измеряете положение отдельного атома, который находится в двух местах сразу³⁹, и записываете результат на листе бумаги, то положение частицы будет определять движение вашей руки, а следовательно, карандаш окажется в двух местах сразу.

И последнее по порядку, но не по важности: усиление причудливости регулярно происходит даже внутри вашего мозга. Возбудится ли определенный нейрон в определенное время, зависит от того, превысит ли сумма его входных сигналов некоторый порог, и это может сделать нейронную сеть крайне нестабильной, наподобие погоды или поставленного вертикально карандаша. В самом начале этой книги описан именно такой случай: я ехал на велосипеде и решал, посмотреть ли вправо. Представьте, что мое спонтанное решение, которое позволило мне уцелеть, зависело от того, попадет ли всего один атом кальция в конкретное синаптическое соединение моей префронтальной коры, заставив конкретный нейрон выдать электрический сигнал, запускающий целый каскад действий других нейронов в мозге, под общим условным названием «Давай посмотрим!» И если бы этот атом кальция оказался в двух местах сразу, то через полсекунды мои глаза смотрели бы сразу в двух направлениях, а тело оказалось бы сразу в двух местах, одним из которых был бы морг. Это стало бы моей собственной версией эксперимента с котом Шредингера, где я исполнял бы роль кота.

Квантовое недоразумение

Итак, я в печали и замешательстве сидел в комнате подруги в общежитии. Приблизился первый экзамен по квантовой теории, но чем больше я думал о копенгагенской интерпретации, подаваемой в учебнике в качестве очевидной и абсолютной истины, тем большее беспокойство меня охватывало. Квантовые причуды, очевидно, не могли ограничиваться микромиром. Кот Шредингера выбрался из ящика. Я имею в виду не причуды как таковые, а то, что беспокоило меня тогда: представьте, что вы лично выполняете эксперимент с котом. Если учебник прав, то волновая функция кота коллапсирует и он становится определенно мертвым или определенно живым в тот момент, когда вы лично на него посмотрите. Но что если я нахожусь вне лаборатории и рассматриваю волновую функцию, описывающую все частицы, которые составляют кота, вас и все остальное в лаборатории? Все эти частицы должны подчиняться уравнению Шредингера независимо от того, являются ли они частью живых существ или нет, так? А в этом случае, согласно учебнику, волновая функция кота коллапсирует только тогда, когда я сам войду в лабораторию, а не раньше, когда взгляд бросите вы. И в этом случае прежде, чем взгляну я, вы сами были бы в суперпозиции сожаления о смерти кота и радующегося тому, что он уцелел. Иными словами, копенгагенская интерпретация в лучшем случае неполна (она отказывается отвечать на вопрос, когда именно происходит коллапс волновой функции), а в худшем – противоречива, поскольку волновая функция всей нашей Вселенной никогда не коллапсирует с точки зрения кого-либо из параллельной вселенной, кто не может нас наблюдать.

В следующей главе мы рассмотрим, что в действительности говорит квантовая механика о природе реальности. Возможно, шведы генетически предрасположены очернять своих юго-западных соседей, но когда я думаю о копенгагенской интерпретации, я не могу выбросить из головы фразу из «Гамлета»: «Какая-то в державе датской гниль».

³⁹ Классический эксперимент, в котором это делается, включает отправку атома серебра через аппарат Штерна – Герлаха, который направляет его в два места в зависимости от спина.

Резюме

- Все, включая свет и нас самих, кажется состоящим из частиц.
- Эти частицы являются чисто математическими объектами в том смысле, что имманентно им присущи лишь математические свойства – вроде чисел, называемых зарядом, спином и лептонным числом.
- Эти частицы не подчиняются законам классической физики.
- Состояние этих частиц (которые следовало бы называть «волницами») математически описывается не совокупностями из шести чисел (задающих положение и скорость), а волновой функцией, описывающей меру их нахождения в разных местах.
- За счет этого они обладают свойствами и традиционных частиц (могут быть либо здесь, либо там), и волн (могут быть в нескольких местах одновременно в состоянии суперпозиции).
- Частицы не могут находиться всего в одном месте (принцип неопределенности Гейзенберга), и это препятствует коллапсу атомов.
- Поведение частиц в будущем описывается не законами Ньютона, а уравнением Шредингера.
- Это уравнение показывает, что безобидные микроскопические суперпозиции могут усиливаться, превращаясь в безумные макроскопические суперпозиции вроде кота Шредингера, так что вы сами находитесь в двух местах одновременно.
- В учебниках утверждается, что волновая функция иногда «коллапсирует», нарушая уравнение Шредингера и принося в природу фундаментальную случайность.
- Физики с жаром доказывают, что все это имеет смысл.
- Изложения квантовой механики в учебниках либо неполны, либо внутренне противоречивы.

Глава 8. Мультиверс III уровня

Если судьба поставила вас перед вилкой, возьмите вилку.
Йоги Бера

«Как красиво внизу!» Залив Сан-Франциско блестел в лучах вечернего солнца, и я радовался больше, чем в тот день, когда родители подарили мне первый набор для фокусов. Я прилип к окну, стараясь не упустить ни одной детали ландшафта, который видел впервые в жизни. С тех пор как я, поработав продавцом, в 17 лет накопил достаточно денег, чтобы купить билет на поезд в Испанию, мной все сильнее овладевала страсть к путешествиям. А после чтения Фейнмана в колледже я все сильнее влюблялся в физику. И вот наконец, после 23 лет жизни в снегах и льдах, мне выпало счастье провести четыре года в одном из самых замечательных мест на Земле.

Благодаря невероятной удаче меня приняли в аспирантуру Беркли, и, хотя мои ожидания были неразумно велики, те четыре года превзошли все, на что я и рассчитывал. Беркли оказался во всех отношениях именно таким вдохновляющим, фантастическим местом, на которое я рассчитывал. (Уже на следующий день после приезда у меня появилась подруга-австралийка.) Я обнаружил, как удобно быть представителем малоизвестной страны, которую большинство даже не может отыскать на карте. Моя национальность позволяла мне быть в меру своего желания странным — исходя из презумпции невиновности, люди допускали, что это нормальное для Швеции поведение, так что я вскоре заслужил прозвище «Безумный Макс» и с удовольствием на него откликался. Не то чтобы мне надо было за это извиняться. Студент, который жил через улицу, всего лишь ходил на занятия голым и попал в национальные новости, когда был отчислен. Мой одноклассник по курсу физики подрабатывал порноактером, чтобы оплатить обучение. Парень из комнаты напротив в международном общежитии был арестован с огнестрельным оружием и списком «людей, которых надо уничтожить»⁴⁰. Так что, если самыми большими вашими странностями были шведское происхождение и необычные физические идеи, это место годилось как нельзя лучше.

Еще в школе мой друг Магнус Бодин заразил меня духом противоречия. Если остальные отсылали письма в прямоугольных конвертах, он делал треугольные. Теперь, когда я вижу, что большинство делает нечто одним способом, я инстинктивно ищу альтернативы. Например, в первый год однокурсники тратили массу времени на домашние задания по электромагнетизму, так что я договорился с профессором, чтобы пропустить всю эту работу в обмен на устный экзамен в конце курса. Вместо этого я бесчисленные часы проводил в библиотеке, подкармливая свое любопытство изучением самой разнообразной физики, о которой не говорилось в учебниках и которая продолжает помогать мне по сей день. Кроме того, я получил время для исследований не по программе.

Впервые у меня появились друзья, разделявшие мою одержимость безумными физическими вопросами, и было восхитительно беседовать с ними ночи напролет о природе реальности. Джастин Бендих, напоминавший мне Шэгги из «Скуби-Ду», являл собой кладезь информации и давал глубокие ответы даже на самые странные вопросы. Билл Пуарье был без ума от теории информации, и мы вместе на ее основе замечательно усовершенствовали принцип неопределенности Гейзенберга. Это очень нас воодушевляло, пока я не нашел в библиотеке статью о том же самом. Я чувствовал себя счастливейшим человеком на планете: я знал, чем я больше всего хотел заниматься, и занимался именно этим.

⁴⁰ Студенческая газета *The Daily Cal* процитировала меня с оговоркой: «По словам шведского студента, живущего напротив и пожелавшего остаться анонимным...», и еще много дней друзья подкалывали меня: «Эй, Макс, ты сегодня выглядишь таким анонимным».

Мультиверс III уровня

Мои новые преподаватели тоже были весьма вдохновляющими. Я гораздо глубже понял квантовую механику благодаря Юджину Комминсу, чей суховатый юмор оживлял уравнения на доске. Однажды я поднял руку и спросил: «Правда ли, что это как складывать яблоки с персиками?» (Это шведская идиома.) «Нет, – ответил он. – Это как складывать яблоки с апельсинами».

Хотя его годичный курс научил меня многим полезным техническим приемам, он не давал ответов на жгучие квантовые вопросы. В рамках курса они даже не поднимались, так что мне оставалось сражаться с ними самому. Является ли квантовая механика внутренне противоречивой? Действительно ли волновая функция коллапсирует? Если да, то когда? А если нет, то почему мы не видим вещи в двух местах сразу? Откуда появляются случайности и вероятности в квантовой механике?

Я слышал, что в 1957 году принстонский аспирант Хью Эверетт III предложил поистине радикальный ответ, подразумевающий существование параллельных вселенных, и мне было любопытно узнать подробности. Однако эту идею в основном игнорировали. Хотя мне встретились несколько человек, слышавших о ней, никто из них не читал затерявшуюся среди распроданных изданий диссертацию Эверетта. Все, что нашлось в нашей библиотеке, – предельно сжатая версия, в которой вопросы, связанные с параллельными вселенными, не поднимались. В ноябре 1990 года я наконец достал неуловимую книгу. Весьма характерно, что нашел я ее в Беркли, в магазине, специализировавшемся на радикалистской литературе (там можно было купить, например, «Поваренную книгу анархиста»).

Диссертация Эверетта захватила меня. Словно пелена спала с глаз. Внезапно все это приобрело для меня смысл. Эверетта волновали точно те же вещи, что и меня, но вместо того, чтобы смириться, он открыл нечто поразительное. Когда у вас появляется радикальная идея, так легко сказать себе: «Это, конечно, не сработает» и отбросить ее. Но если вы задержитесь на этой мысли хоть немного и, спросив себя: «А почему именно это не сработает?» – обнаружите, что найти логически неопровержимый ответ трудно, то, возможно, вы нашли нечто важное.

Так в чем же идея Эверетта? Это на удивление простое утверждение:

Волновая функция не коллапсирует. Никогда.

Иными словами, волновая функция, которая полностью описывает нашу Вселенную, всегда изменяется детерминистически, всегда подчиняется уравнению Шредингера, независимо от того, выполняются наблюдения или нет. Так что уравнение Шредингера – это верховный закон без всяких «если», «и» или «но». Это означает, что теорию Эверетта можно рассматривать как «облегченную версию квантовой механики»: возьмите версию из учебника и просто выбросьте постулат о коллапсе волновой функции и вероятностях.

Меня это удивило, поскольку, по слухам, Эверетт постулировал безумно звучащие вещи вроде параллельных вселенных и того, что наша Вселенная должна расщепляться на параллельные вселенные всякий раз, когда вы выполняете наблюдение. На самом деле даже сегодня многие из моих коллег-физиков продолжают считать, что Эверетт исходил из таких предположений. Чтение книги Эверетта стало для меня уроком не только по физике, но и по социологии: я понял, как важно оглядываться на прошлое и самостоятельно проверять первоисточники, не полагаясь на информацию из вторых рук. Далеко не только политиков неверно цитируют, интерпретируют и презентуют, и диссертация Эверетта – отличный при-

мер того, о чем в первом приближении каждый физик имеет мнение, но чего при этом почти никто не читал⁴¹.

Я буквально не мог оторваться от книги Эверетта. Его логика была прекрасна: он не выдвигал предположений ни о каких безумных вещах, но все они возникали в качестве следствий из его предположений! Сначала это казалось настолько простым, что не должно было работать. В конце концов, Нильс Бор и его коллеги были умными людьми, и они изобрели коллапс волновой функции, чтобы объяснить, почему в экспериментах мы видим тот или иной исход. Но Эверетт понял: даже если у экспериментов нет определенных исходов, они могут *выглядеть* так, будто такие исходы у них есть!

⁴¹ Диссертация появилась в интернете в 2008 году (<http://www.pbs.org/wgbh/nova/manyworlds/pdf/dissertation.pdf>). Представление о том, что в некоторые волшебные моменты реальность испытывает своего рода метафизическое расщепление на две ветви, которые в дальнейшем никогда не взаимодействуют, — это ошибочное изложение диссертации Эверетта. Оно, кроме того, противоречит его постулату о том, что волновая функция никогда не коллапсирует, поскольку дальнейшее развитие может, в принципе, заставить эти ветви интерферировать друг с другом. Согласно Эверетту, была, есть и всегда будет лишь одна волновая функция, и только расчеты декогеренции (суть которых я объясню в этой главе), а не постулаты, могут показать, когда с хорошим приближением можно рассматривать две ветви как не взаимодействующие.

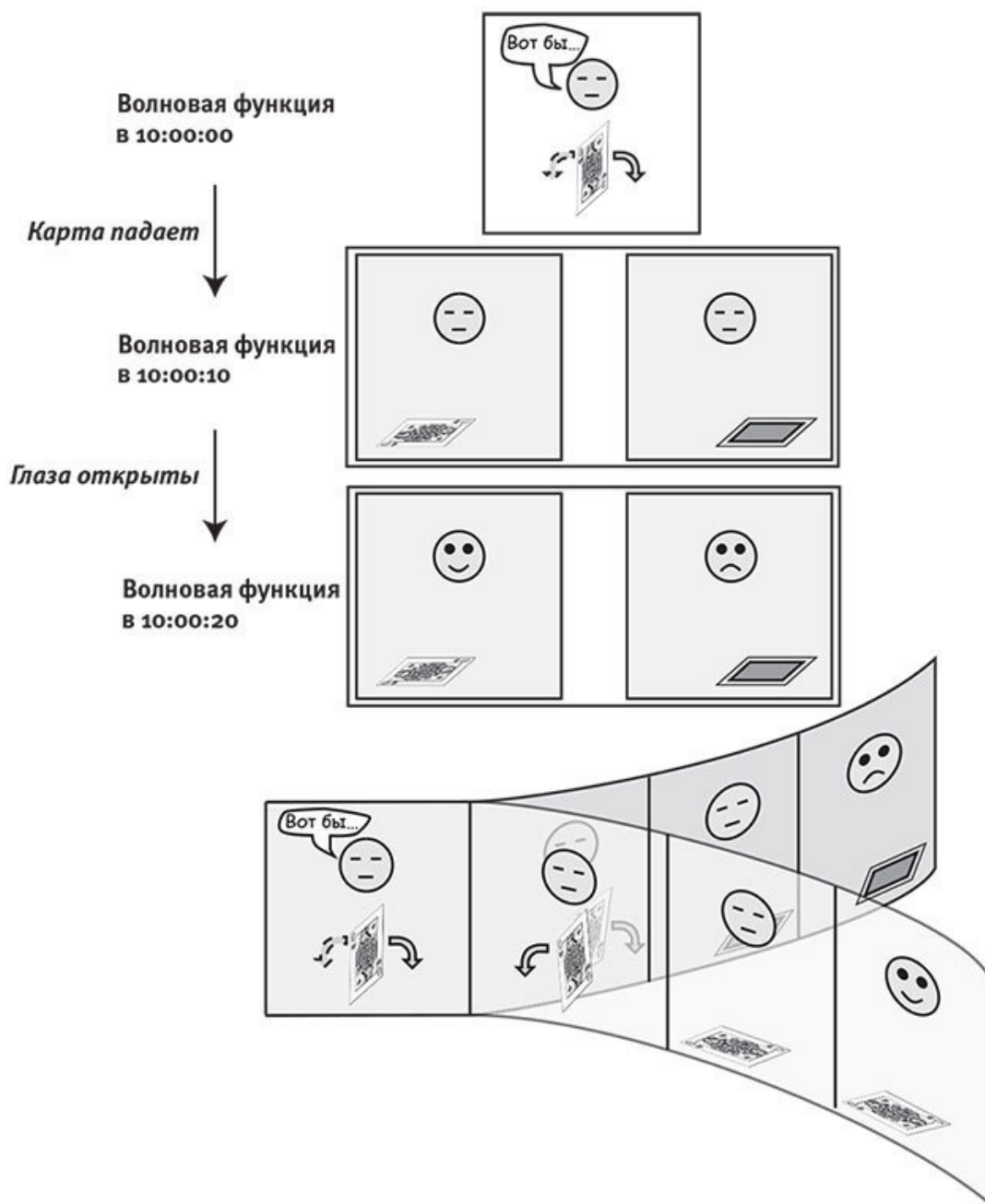


Рис. 8.1. Мысленный эксперимент с «квантовыми картами». Ровно в 10 часов утра вы устанавливаете карту на ребро, ставите 100 долларов на то, что она упадет лицом вверх, и закрываете глаза. Спустя 10 секунд карта упала одновременно налево и направо в квантовой суперпозиции, так что волновая функция описывает карту, находящуюся в двух местах сразу. Еще через 10 секунд вы открываете глаза и смотрите на карту, так что волновая функция описывает вас одновременно как довольного и как разочарованного. Хотя существует лишь одна волновая функция и одна квантовая реальность (в которой частицы, составляющие вас и карту, находятся в двух местах одновременно), Эверетт понял, что на практике это эквивалентно тому, что наша Вселенная расщепилась на две параллельные вселенные (внизу) с определенным исходом в каждой.

Взгляните на рис. 8.1: вот как я это воспринимаю. В мысленном эксперименте «квантовые карты» вы берете карту с идеально ровным нижним краем, устанавливаете ее на столе

вертикально и ставите 100 долларов на то, что она, падая, ляжет лицом вверх. Закрываете глаза и ждете. Согласно классической физике карта, в принципе, останется в равновесии навсегда⁴². Согласно уравнению Шредингера, она упадет в течение нескольких секунд, даже если вы приложите все силы, чтобы идеально ее сбалансировать, поскольку принцип неопределенности Гейзенберга утверждает, что она не может находиться лишь в одном положении (строго вертикальном) без всякого движения. Но если исходное состояние было симметричным относительно направления вправо-влево, то таким должно быть и окончательное состояние. Это подразумевает, что карта упадет в обе стороны сразу, в суперпозиции.

Когда вы открываете глаза и смотрите на карту, вы совершаете наблюдение. Согласно копенгагенской интерпретации, волновая функция коллапсирует, и вы видите карту лежащей либо лицом вверх, либо лицом вниз с вероятностью 50 % для каждого исхода. Вы либо радуетесь легкой добыче, либо сокрушаетесь, что лишились сотни баксов, — но законы физики не позволяют предсказать, что случится, поскольку исход связан с внутренней случайностью природы. А что говорит Эверетт? Для него в наблюдении нет ничего магического: это просто физический процесс, связанный с передачей информации — в данном случае от карты к вашему мозгу. Если волновая функция описывает карту только как лежащую лицом вверх, вы будете обрадованы (и наоборот). Связывая эти факты с помощью уравнения Шредингера, Эверетт легко вычисляет, что в точности происходит с волновой функцией: она превращается в описание суперпозиции двух различных конфигураций частиц, составляющих вас и карту, — в одной карта лежит лицом вверх, а вы улыбаетесь, в другой она лежит лицом вниз, а вы расстроены. Три ключевых момента:

1. Эксперимент переводит ваше сознание в два состояния сразу. Это, по сути, нелетальная версия эксперимента с котом Шредингера — с вами в роли кота.
2. Эти два состояния сознания совершенно ничего не знают друг о друге.
3. Состояние вашего сознания оказывается связанным с состоянием карты таким образом, что все кажется согласованным. (Волновая функция не описывает никаких конфигураций частиц, при которых вы воспринимали бы карту лежащей лицом вверх, когда она лежит лицом вниз.)

Легко доказать, что уравнение Шредингера всегда обеспечивает такую совместимость. Например, если ваш приятель войдет в комнату и спросит, как дела, состояние всех частиц (из которых сделаны карта, вы и ваш приятель) эволюционирует в квантовую суперпозицию «карта лежит лицом вниз — вы опечалены — приятель вам сочувствует» и «карта лежит лицом вверх — вы довольны — приятель просит у вас в долг».

Итак, Эверетт понял (*рис. 8.1*): несмотря на то, что существует лишь одна волновая функция и одна квантовая реальность (в которой множество частиц, составляющих нашу Вселенную, находится в двух местах одновременно), на практике это эквивалентно тому, что наша Вселенная расщепляется на две параллельных! В конце этого эксперимента будут существовать две ваши копии, и каждая субъективно ощущает себя реальной, но совершенно не воспринимает существование другой.

На этом месте моя голова по-настоящему закружилась. Ведь эксперимент с квантовыми картами — это лишь частный пример того, как микроскопические квантовые причуды усиливаются до макроскопических квантовых чудес. Как говорилось в предыдущей главе, такое усиление малых различий до больших происходит практически все время: когда

⁴² На практике эта неустойчивая карта, конечно, вскоре упадет из-за едва заметного движения воздуха, так что лучше взять нормальную карту с толстым нижним краем и использовать квантовое устройство вроде шредингеровского триггера с радиоактивным атомом, чтобы подтолкнуть ее в ту или иную сторону.

частица космических лучей вызывает или не вызывает раковую мутацию, когда текущие атмосферные условия развиваются или не развиваются к будущему году в ураган четвертой категории, либо когда вы используете свои нейроны для принятия решений. Иными словами, расщепление параллельных вселенных происходит постоянно, делая число квантовых параллельных вселенных поистине ошеломляющим. Поскольку такое расщепление идет с момента нашего Большого взрыва, практически любая версия истории, которую можно вообразить, реально разыгрывается в одной из квантовых параллельных вселенных, если только она не нарушает физических законов. Поэтому существует гораздо больше параллельных вселенных, чем песчинок во всей нашей Вселенной. Короче говоря, Эверетт показал, что если волновая функция никогда не коллапсирует, то знакомая нам реальность – лишь самая вершина онтологического айсберга, ничтожно малая часть истинной квантовой реальности.

Мы встречались в гл. 6 с параллельными вселенными, но другого типа. Чтобы не свихнуться от передозировки параллельными вселенными, вернемся к обзору терминологии, принятой в гл. 6. Под *нашей Вселенной* мы подразумеваем физическую область пространства, свету из которой хватило времени, чтобы дойти до нас за 14 млрд лет, прошедших с момента нашего Большого взрыва, со всеми ее классическими наблюдаемыми свойствами (где какая галактика находится, что записано в исторических книгах и т. д.). В гл. 6 мы называли другие такие сферические области, находящиеся далеко от нас в огромном или бесконечном пространстве, *параллельными вселенными I* или *II уровня* в зависимости от того, действуют ли там те же законы физики, что у нас. Назовем квантовые параллельные вселенные, открытые Эвереттом, *параллельными вселенными III уровня*, а их совокупность – *мультиверсом III уровня*. Где находятся все эти параллельные вселенные? Если вселенные I и II уровней находятся в старом добром трехмерном пространстве очень далеко, то вселенные III уровня могут в смысле нашего трехмерного пространства располагаться прямо здесь, но они отделены от нас в *гильбертовом пространстве* – абстрактном математическом пространстве с бесконечным числом измерений, в котором обитает волновая функция⁴³.

После первоначального отвержения и десятилетнего почти полного игнорирования эвереттовскую версию квантовой механики стал популяризировать знаменитый теоретик квантовой гравитации Брайс Девитт. Он называл эвереттовскую теорию *многомировой интерпретацией*, и это название вошло в научный обиход. Позднее я встречался с Брайсом, и он рассказал, как пожаловался Эверетту на то, что ему нравится математика теории, но сильно беспокоит то, что он не *ощущает* постоянного расщепления параллельных версий самого себя. Эверетт ответил вопросом на вопрос: «А вы чувствуете, что вращаетесь вокруг Солнца со скоростью 30 км/с?» «Туше!» – воскликнул Брайс и признал поражение. Так же, как классическая физика предсказывает то, что мы вращаемся вокруг Солнца и не должны этого чувствовать, Эверетт показал, что избавленная от коллапса квантовая физика предсказывает, что мы расщепляемся, никак не чувствуя этого.

Иногда бывает трудно примирить то, во что я верю, с тем, что я ощущаю. В мае 1999 года я ждал, что аист вот-вот принесет мне первенца. Я беспокоился и надеялся, что роды скоро произойдут и окажутся успешными. При этом мои физические расчеты показывали, что в параллельных вселенных роды пройдут одновременно и успешно, и неудачно. Что, в таком случае, я имею в виду под надеждой? Возможно, я надеюсь оказаться в одной из вселенных, где все кончилось хорошо? Нет: я окажусь во всех этих параллельных вселенных, в одних – ликующим, в других – подавленным. Или, может, это означает надежду на то, что в большинстве параллельных вселенных роды окажутся успешными? Нет: долю удач-

⁴³ Волновая функция соответствует одной точке в этом бесконечномерном пространстве, а из уравнения Шредингера вытекает, что эта точка будет двигаться вокруг центра пространства на фиксированном расстоянии.

ных исходов в принципе можно рассчитать с помощью уравнения Шредингера, и нелогично строить надежды относительно того, что предопределено. Однако, по-видимому – вероятно, к счастью, – мои эмоции не вполне логичны.

Иллюзия случайности

У меня есть и другие вопросы. Известно, что если повторять квантовый эксперимент много раз, обычно получаются разные результаты, которые кажутся случайными. Например, можно измерять направление спина множества одинаковым образом приготовленных атомов так, что получится внешне беспорядочная последовательность результатов, скажем, «по часовой стрелке», «против часовой стрелки» «по часовой стрелке», «по часовой стрелке», «против часовой стрелки» и т. д. Квантовая механика не предсказывает эти исходы, а говорит лишь о вероятности каждого из них. Но эти вероятностные дела завязаны на постулат копенгагенской интерпретации о коллапсе, от которого Эверетт отказался. Так как он заставляет квантовую механику предсказывать нечто случайное? В уравнении Шредингера нет ничего случайного: если вы знаете волновую функцию нашей Вселенной в данный момент, то с его помощью можете, в принципе, предсказать, какой будет волновая функция в любой момент в будущем.

Осенью 1991 года я записался на необычный курс по интерпретации квантовой механики, который читал аспирант Энди Элби. Его комната в общежитии находилась рядом с комнатой моей девушки. Дверь Энди украшали полезные советы в духе: «Прокрастинация: 7 простых шагов». Как и я, он очень интересовался подлинным смыслом квантовой механики и в качестве части своего курса предложил мне прочесть две лекции о работе Эверетта. Для меня это был обряд инициации: я в первый раз делал доклад по физике, и большую его часть я посвятил тому, как Эверетт объяснял случайность. Прежде всего, если вы ставите эксперимент с квантовыми картами (*рис. 8.1*), обе ваши копии (каждая в параллельной вселенной) будут видеть вполне определенный исход. Обе копии будут чувствовать, что этот исход случаен в том смысле, что его было невозможно предсказать: для любого предсказанного исхода противоположный ему случается в столь же реальной вселенной. Теперь к вопросу о вероятностях. Если вы повторите эксперимент с четырьмя картами, то получите $2^4 = 16$ исходов (*рис. 8.2*), и в большинстве случаев вам покажется, что вероятность выигрыша – около 50 %. Лишь в 2 из 16 случаев вы все четыре раза получите одинаковый результат. По мере того, как число повторений эксперимента растет, ситуация становится все интереснее. Согласно теореме французского математика Эмиля Бореля, доказанной в 1909 году, если повторить эксперимент с картами бесконечно много раз, вы будете наблюдать выигрыш в 50 % проб почти во всех случаях (за исключением того, что в математике называется множеством меры нуль). Поэтому в окончательной суперпозиции почти все ваши копии будут считать, что законы вероятности действуют, невзирая на то, что в стоящей за ними физике (уравнении Шредингера) нет никакой случайности.

Иными словами, субъективное восприятие вашей копии в типичной параллельной вселенной – внешне случайная последовательность выигрышей и проигрышей, как если бы она генерировалась случайным процессом с вероятностью 50 % для каждого исхода. Строгость эксперимента можно повысить, если делать пометки, записывая 1 всякий раз, когда вы выигрываете, и 0 при проигрыше, а перед всеми цифрами поставить нуль и десятичную запятую. Например, если ваша последовательность такова: проигрыш, проигрыш, выигрыш, проигрыш, выигрыш, выигрыш, выигрыш, проигрыш, проигрыш, выигрыш, то вы записываете: 0,0010111001. Но именно так выглядят вещественные числа между 0 и 1, если записывать их в двоичной системе счисления, которую используют компьютеры для хранения данных в памяти! Если представить себе, что эксперимент с квантовыми картами повторя-

ется бесконечное число раз, то на вашем листе бумаги появится бесконечно много цифр, что позволяет сопоставить каждой параллельной вселенной число между 0 и 1. Теперь вспомним, что согласно теореме Бореля, почти во всех этих числах половина цифр равна 0, половина – 1, а это означает, что почти во всех параллельных вселенных в половине случаев вы выигрываете, а в половине – проигрываете⁴⁴. Причем дело не только в долях исходов. Число 0,0101010101... содержит 50 % нулей, но, очевидно, не является случайным, поскольку оно содержит простой повторяющийся шаблон. Теорему Бореля можно обобщить, показав, что почти все числа состоят из последовательности цифр случайного вида, без каких-либо шаблонов. То есть почти во всех параллельных вселенных III уровня последовательности ваших выигрышей и проигрышей также будут совершенно случайными, а значит, все, что можно предсказать, – это то, что вы будете выигрывать в половине случаев.

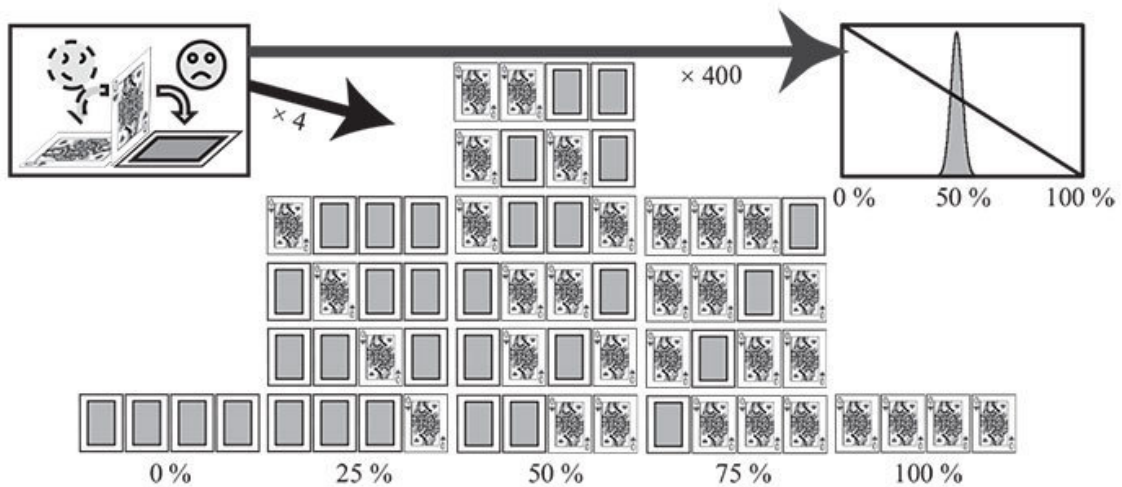


Рис. 8.2. Происхождение квантовых вероятностей. В квантовой физике карта, идеально сбалансированная на своем ребре, будет падать, не теряя симметрии, сразу в обоих направлениях (это называется суперпозицией). Если вы поставите деньги на то, что дама упадет лицом вверх, то состояние мира станет суперпозицией двух исходов: вас, улыбающегося, с дамой лицом вверх, и вас, опечаленного, с дамой лицом вниз. Если вы повторите эксперимент с четырьмя картами, получится $2 \times 2 \times 2 \times 2 = 16$ исходов. В большинстве случаев вам будет казаться, что дама выпадает случайно с вероятностью около 50 %. Лишь в 2 из 16 случаев вы получите один и тот же результат все 4 раза. Если вы повторите эксперимент 400 раз, то из 2400 исходов около 50 % будут дамами (*справа вверху*). Согласно знаменитой теореме, в пределе, когда вы повторяете эксперимент с картой бесконечное число раз, дама будет наблюдаться в 50 % раз почти во всех случаях. Таким образом, в окончательной суперпозиции почти все ваши копии будут считать, что закон вероятности действует несмотря на то, что в стоящей за ним физике нет ничего случайного и, как говорил Эйнштейн, «Бог не играет в кости».

Постепенно до меня дошло, что фокус с иллюзией случайности вовсе не специфичен для квантовой механики. Допустим, некая технология будущего позволила клонировать вас во сне и две ваши копии помещены в комнаты №№ 0 и 1 (*рис. 8.3*). Когда они проснутся, они

⁴⁴ Любопытно, что теорема Бореля произвела сильное впечатление на многих математиков его времени, и некоторые считали, что концепция вероятности слишком философична, чтобы признать ее строгой математикой. Неожиданно Борель возразил им с помощью математической теоремы, допускающей интерпретацию в терминах вероятностей, хотя в самой теореме упоминания о вероятностях нет. Борелю, несомненно, было бы интересно узнать, что его работа вызвала неожиданный рост значимости вероятностей не только в математике, но и в физике.

будут ощущать, что номер на двери их комнаты совершенно непредсказуем и случаен. Если в будущем появится возможность загружать свое сознание в компьютер, то, что я сейчас говорю, покажется совершенно очевидным, поскольку клонировать себя будет не сложнее, чем скопировать программу. Если вы многократно повторите эксперимент по клонированию (рис. 8.3) и запишете найденные номера комнат, то почти во всех случаях вы увидите, что зафиксированная последовательность нулей и единиц выглядит случайной, и нуль встречается в номере примерно в половине случаев.

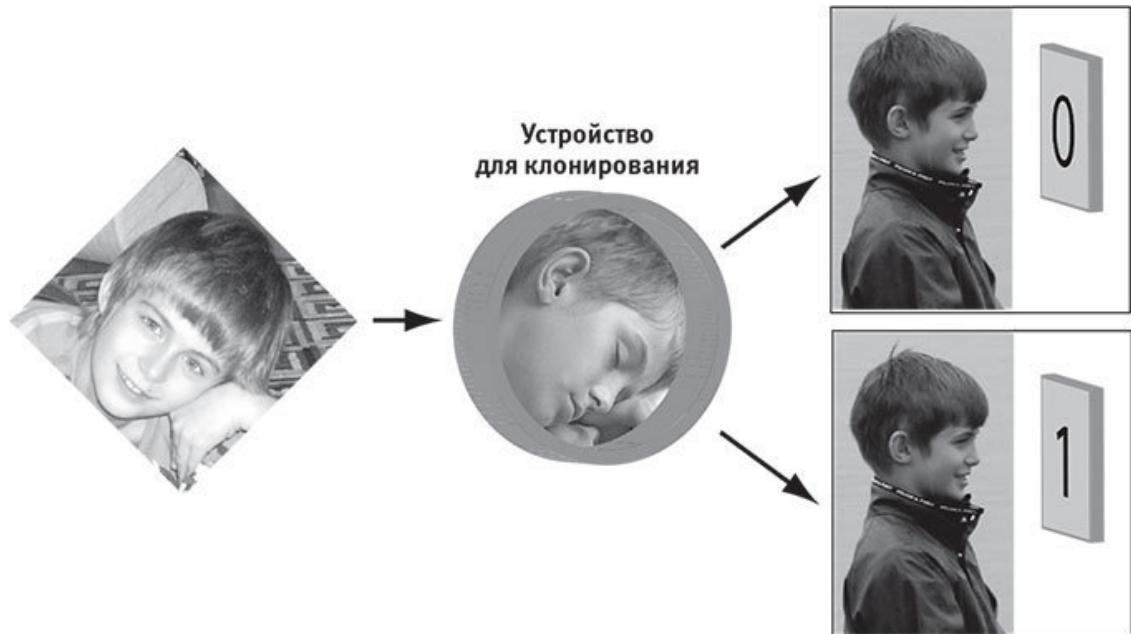


Рис. 8.3. Иллюзия случайности возникает всякий раз, когда вы клонируете себя, так что здесь нет ничего специфически квантово-механического. Если некая технология будущего позволит клонировать моего сына Филиппа, пока он спит, и две его копии будут помещены в комнаты с номерами 0 и 1, обеим копиям будет казаться, что номер комнаты непредсказуем и случаен.

Иными словами, обычная физика будет порождать иллюзию случайности (с вашей, субъективной точки зрения) в любой ситуации, когда вас клонируют. Фундаментальная причина того, что квантовая механика кажется случайной несмотря на то, что волновая функция эволюционирует детерминистически, состоит в том, что, согласно уравнению Шредингера, волновая функция с единственным вашим экземпляром может эволюционировать в такую, согласно которой ваши клоны существуют в параллельных вселенных.

Так что вы ощущаете, когда вас клонируют? Вы чувствуете случайность! И каждый раз, когда с вами происходит нечто кажущееся случайным на фундаментальном уровне, когда исход нельзя предсказать даже в принципе, это признак того, что вас клонировали.

Работа Хью Эверетта все еще остается спорной, но, я думаю, он все-таки был прав и волновая функция никогда не коллапсирует. Я считаю, что однажды его признают гением, равным Ньютону и Эйнштейну – по крайней мере, в большинстве параллельных вселенных. К сожалению, в нашей Вселенной его теорию десятилетиями игнорировали. Он забросил физику, ожесточился и стал замкнутым, начал курить, много пить и скончался от сердечного приступа в 1982 году. Я многое узнал о нем, недавно познакомившись с его сыном Марком на съемках документального фильма «Параллельные миры, параллельные жизни». Продюсер хотел, чтобы я объяснил Марку суть работ его отца, и я был этим счастлив и горд: когда-то, в той книжной лавке для радикалов, я и в самых смелых мечтах не мог представить, что

однажды у меня появится такая связь с одним из моих физических супергероев. Марк – рок-звезда, если вы смотрели «Шрека», то слышали, как он поет. Судьба его отца причинила большие страдания семье. Марк и его сестра почти не общались с отцом, несмотря на то, что жили вместе с ним. Сестра покончила с собой, оставив записку о том, что собирается встретиться с отцом в параллельной вселенной.

Поскольку я считаю, что параллельные вселенные Хью Эверетта реальны, я не могу не задумываться о том, что они собой представляют. В нашей Вселенной его не приняли в аспирантуру физического факультета Принстонского университета, и он поступил на математический факультет, через год все-таки перейдя на физический. Из-за нехватки времени диссертация по квантовой физике осталась единственной работой Эверетта. Во многих других вселенных, я думаю, его приняли на физический факультет сразу же, и у него нашлось достаточно времени, чтобы сначала добиться успеха в более привычных областях, и это затруднило игнорирование его последующих квантовых идей. Это стало для него началом карьеры, подобной той, что сделал Эйнштейн. Специальную теорию относительности тоже встретили с подозрением (особенно учитывая тот факт, что ее выдвинул не представитель академического сообщества, а служащий патентного бюро), но ее нельзя было игнорировать, поскольку Эйнштейн уже сделал себе имя другими открытиями. Так же, как Эйнштейн, войдя в академическую среду, смог открыть общую теорию относительности, Эверетт, получив профессорскую должность, сделал новые прорывы столь же замечательные, как и первый, – как бы я хотел знать, что именно он открыл...

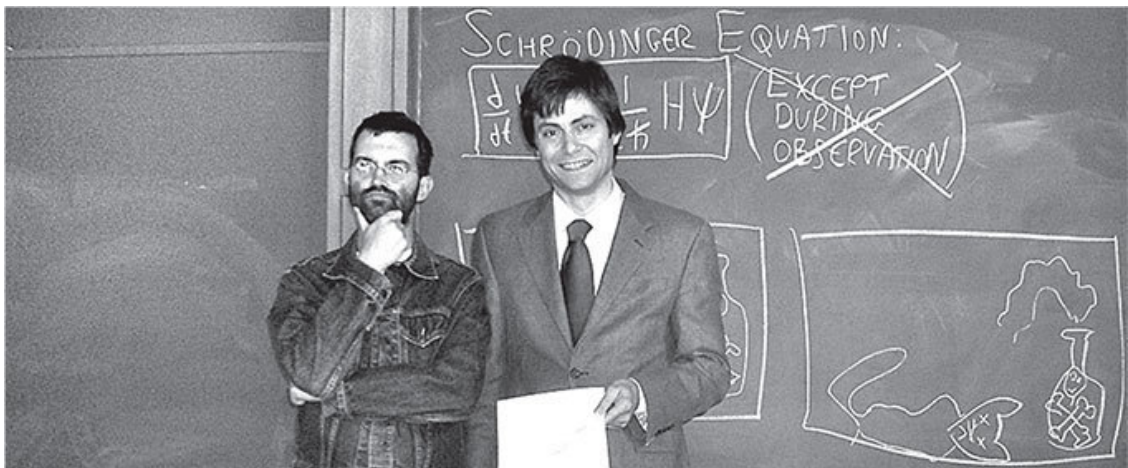


Рис. 8.4. Марк, рок-музыкант и сын Хью Эверетта, в 2007 году с моей помощью разбирается в теории своего отца.

Одно из событий, в котором, я думаю, Эверетт был бы рад принять участие, случилось в конце августа 2001 года в доме Мартина Риса в Кембридже. Многие из ведущих физиков мира собрались на неформальную встречу, посвященную параллельным вселенным и связанным с ними вопросам. Для меня это был первый случай, когда параллельные вселенные стали рассматривать как нечто респектабельное (хотя все еще спорное). Я думаю, многие участники перестали чувствовать неудобство и вину за интерес к таким вещам, увидев, кто еще там собрался, и шутили: «Хм... Что вы делаете на этой сомнительной встрече?» В ходе долгой горячей дискуссии о параллельных вселенных я неожиданно понял, что разногласия отчасти вызваны путаницей в языке: люди использовали термин «параллельная вселенная» для обозначения совершенно разных вещей! «Погодите, – подумал я, – существует две, нет, три их разновидности! Даже четыре». Тщательно все обдумав, я поднял руку и предложил четырехуровневую схему классификации мультиверсов, которую использую в этой книге.

При всем своем блеске диссертация Эверетта оставляла открытым важный вопрос: если крупный объект может находиться в двух местах одновременно, почему мы этого никогда не наблюдаем? Конечно, если вы измерите его положение, две ваши копии в двух возникших параллельных вселенных обнаружат его каждая в определенном месте. Но такой ответ оказывается недостаточным: тщательные эксперименты свидетельствуют, что крупные объекты *никогда* не ведут себя так, как если бы они находились в двух местах сразу, даже если вы на них не смотрите. В частности, они никогда не проявляют волноподобных свойств, которые порождает квантовый интерференционный узор. Ответа на эту загадку не было ни в диссертации Эверетта, ни в моих учебниках.

Квантовая цензура

Конец ноября 1991 года в Беркли. На улице темно. Я сижу за столом и отчаянно царапаю математические значки на обрывке бумаги. Я чувствую такой прилив возбуждения, какого прежде не бывало. Неужели я – маленький бестолковый я – только что открыл нечто по-настоящему важное?

Думаю, в науке нередко труднее всего дается не поиск правильного ответа, а постановка правильного вопроса. Если вам попался действительно интересный, хорошо сформулированный физический вопрос, он может начать жить своей жизнью, сам подсказывая, какие вычисления нужно проделать, чтобы получить ответ, и все остальное идет почти механически. Даже если математические выкладки занимают часы и дни, это воспринимается в основном как рутинное вытягивание лески: надо же посмотреть на добычу. И я только что нашел один из таких счастливых вопросов.

Я знал, что коллапс волновой функции можно элегантно описать посредством числовых таблиц, на квантово-физическом языке называемых *матрицами плотности*. В них закодировано не только состояние чего-либо (то есть волновая функция), но и, возможно, мое неполное знание этой волновой функции⁴⁵. Так, если нечто может находиться лишь в двух местах, то мое знание этого можно описать таблицей чисел размером два на два:

$$\begin{pmatrix} 0,5 & 0,5 \\ 0,5 & 0,5 \end{pmatrix} = \text{Он здесь и там в одно и то же время.}$$

$$\begin{pmatrix} 0,5 & 0 \\ 0 & 0,5 \end{pmatrix} = \text{Он здесь или там — я просто не знаю, где.}$$

В обоих случаях вероятность того, что я найду его в каждом из мест, составляет 0,5. Это кодируется двумя числами на диагонали обеих матриц (0,5 в левом верхнем углу и 0,5 в правом нижнем). Остальные два числа в каждой таблице (*недиагональные элементы матрицы плотности*) кодируют разницу между квантовой и классической неопределенностями. В случае, когда они тоже равны 0,5, мы имеем дело с квантовой суперпозицией (кот Шре-

⁴⁵ Матрицы плотности – это обобщения волновых функций. Каждой волновой функции соответствует матрица плотности, а каждой матрице плотности – уравнение Шредингера. Если у вас есть склонность к математике, то волновую функцию Ψ можно представлять как комплексное число Ψ_i , заданное для любого возможного состояния i , и тогда соответствующая матрица плотности будет $P_{ij} = \Psi_i \Psi_j^*$, где звездочка означает комплексное сопряжение. Если вы не знаете волновой функции объекта, а известна только вероятность того, что он имеет определенную волновую функцию, то надо использовать матрицу плотности, которая представляет собой взвешенное среднее от матриц плотности, и имеется свое собственное уравнение Шредингера для матриц плотности, соответствующих этим волновым функциям.

дингера либо жив, либо мертв), но когда они равны нулю, фактически все сводится к старой доброй классической неопределенности (как в случае, когда я забыл, где оставил ключи). Так что если вы сможете заменить недиагональные элементы нулями, то превратите «и» в «или» и вызовете коллапс волновой функции.

Копенгагенская интерпретация квантовой механики гласит: если ваш приятель наблюдает объект, не сообщая вам о результате, то он вызывает коллапс волновой функции, так что объект находится или здесь, или там, а вы просто не знаете, где. Иными словами, согласно копенгагенской интерпретации, наблюдатель некоторым образом обнуляет эти недиагональные члены. Я задумался: не может ли какой-нибудь менее загадочный физический процесс приводить к тому же эффекту? Если имеется изолированная система, которая не взаимодействует больше ни с чем, то, применяя уравнение Шредингера, легко доказать, что эти нежелательные числа никогда не исчезнут. Но реальные системы почти никогда не бывают изолированными, и меня заинтересовало, к чему это должно приводить. Например, когда вы читаете это предложение, с вами постоянно сталкиваются молекулы и фотоны. И если нечто находится в двух местах одновременно, что случится с таблицей чисел два на два, описывающей систему, которая испытывает воздействие внешних толчков?

Это был один из тех замечательных вопросов, которые сами дают на себя ответы, и все остальное оказалось делом техники. Я рассмотрел объект и сталкивающуюся с ним частицу как единую изолированную систему и воспользовался уравнением Шредингера для вычисления того, что произойдет. Спустя пару часов я сидел над листками с математическими символами, и у меня перехватывало дыхание: недиагональные члены стремились к нулю, как если бы волновая функция коллапсировала! Она, конечно, *в действительности* не коллапсировала, и соответствующие параллельные вселенные оставались в целости и сохранности, но это был совершенно новый эффект, который выглядел, как коллапс волновой функции, и запах имел, как коллапс волновой функции, и, как и при настоящем коллапсе, делал невозможным наблюдение объекта в двух местах одновременно. Так что квантовые причуды не прекращаются: они просто подвергаются цензуре!

Я пришел к выводу, что квантовая механика требует секретности: объект может быть найден в двух местах сразу в состоянии квантовой суперпозиции лишь до тех пор, пока его положение остается в секрете для всего остального мира. Если секрет раскрывается, все эффекты квантовой суперпозиции становятся ненаблюдаемыми, и во всех практических отношениях он находится либо здесь, либо там, а вы просто не знаете, где. Если лаборант измеряет и записывает его положение, информация, очевидно, раскрывается. Но даже если один-единственный фотон отразится от объекта, информация об его местоположении также утечет: она будет закодирована в последующем положении фотона. Спустя наносекунду (рис. 8.5) фотон будет находиться в двух разных местах в зависимости от положения объекта, так что, измерив этот фотон, вы узнаете, где зеркало.

Вернемся к началу предыдущей главы: мы разбирались, нужен ли для коллапса волновой функции наблюдатель-человек – или достаточно робота. Теперь я убедился, что сознание никакой роли не играет, поскольку и одна-единственная частица может осуществить этот трюк: одиночный фотон, отразившись от объекта, вызовет тот же эффект, что и наблюдающий его человек. Я понял, что квантовое наблюдение связано не с сознанием, а просто с передачей информации. Вот почему мы никогда не видим макроскопические объекты в двух местах сразу, даже если они действительно находятся одновременно в двух местах: не потому, что они большие, а потому что их трудно изолировать! Шар для боулинга на свежем воздухе каждую секунду подвергается ударам 10^{20} фотонов и 10^{27} молекул воздуха. Я по определению не могу увидеть что-либо, не ударив по нему фотоном, поскольку видеть предмет можно только благодаря отраженным им фотонам (свету), так что шар для боулинга, находящийся в двух местах сразу, утратит свое состояние квантовой суперпозиции быстрее,

чем у меня появится шанс обратить на него внимание. Напротив, если откачать молекулы воздуха хорошим вакуумным насосом, то электрон, как правило, сможет просуществовать около секунды без столкновений с чем-либо, и этого времени более чем достаточно, чтобы продемонстрировать странные свойства квантовой суперпозиции. Так, электрон затрачивает в квадриллион раз меньше времени (около 10^{-15} секунды) на один оборот внутри атома, а значит, ничто не мешает ему находиться со всех сторон атома сразу.

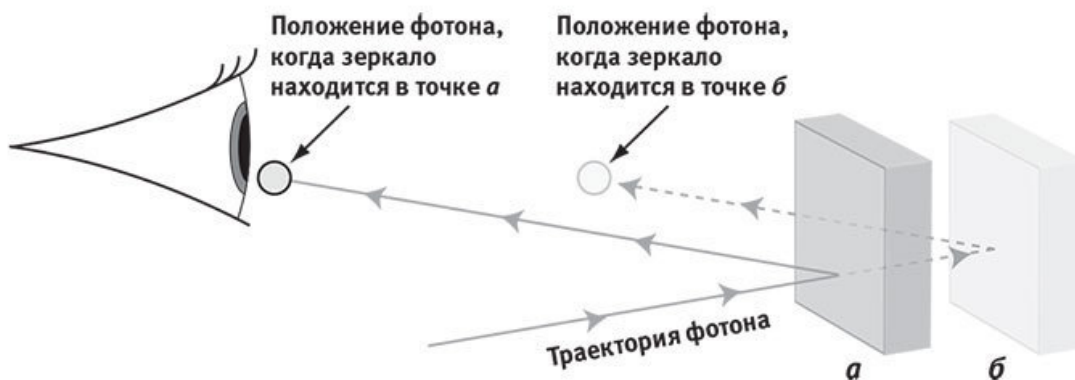


Рис. 8.5. Если фотографировать со вспышкой темную комнату, фотоны, возвращающиеся в камеру, будут нести информацию о том, что находится в комнате. Здесь показано, как даже одиночный фотон может «измерять» предметы: после того как он отразился от зеркала, информация о положении зеркала кодируется в его собственном положении. Если зеркало находится одновременно в положениях (а) и (б) в квантовой суперпозиции, то неважно, человек или фотон обнаружит, где оно: в любом случае квантовая суперпозиция разрушается.

Более того, если молекула воздуха отскочит от шара для боулинга и зафиксирует информацию об его положении в своем собственном положении (рис. 8.5), эта молекула вскоре столкнется со многими другими молекулами, которые также получают эту информацию. Это похоже на публикацию секретных материалов на «Викиликс»: информацию копируют, затем копируют ее копии, и вскоре кот высовывается из мешка настолько, что почти невозможно загнать его обратно. И так же, как вы не можете вновь засекретить распространившуюся информацию, нельзя восстановить квантовую суперпозицию. Теперь, наконец, понятно, почему параллельные вселенные III уровня остаются параллельными!

Я чувствовал, что той ночью ко мне пришел успех. Вместе с тем я проработал вопрос в количественном аспекте. Большинство предметов могут находиться не в двух, а сразу во многих местах, и я рассмотрел этот случай (рис. 8.6). По сути, я открыл, что хотя фотон в основном разрушает квантовую суперпозицию, части ее позволяет уцелеть: суперпозиция остается сравнимой по ширине с длиной волны фотона. Фотон, имеющий длину волны 0,0005 мм, действует практически так же, как наблюдатель, способный измерить положение предмета с точностью до 0,0005 мм. В предыдущей главе мы видели, что все частицы ведут себя, как волны, и характеризуются длиной волны. Я показал, что когда любая частица отскакивает от чего-либо, квантовая суперпозиция в масштабах, превосходящих длину ее волны, разрушается.

Уже много лет я знал, что люблю физику и хочу посвятить ей жизнь. Я всегда задавался вопросом, смогу ли я сам что-нибудь привнести в нее, а не только изучать ее, подбадривая с трибуны «игроков». Когда в ту ночь я отправился спать, то впервые в жизни подумал: «Да, я могу это!» Может быть, мое открытие назовут *эффектом Тегмарка*? Я знал: что бы ни случилось, я никогда не забуду тот вечер. Я чувствовал себя счастливым благодаря возмож-

ностям, которые у меня были, и замечательным людям, которые позволили мне присоединиться к великому делу развития науки. Мне казалось, что все это слишком хорошо, чтобы быть правдой.



Рис. 8.6. Ваше знание о положении упавшей карты описывается матрицей плотности, которая может быть представлена в виде бугристой поверхности. Высота этой поверхности на диагонали (пунктирная линия) дает вероятность того, что вы обнаружите карту в определенных местах, тогда как высота этой поверхности в других точках характеризует, грубо говоря, количество квантовых причуд, степень, в которой карта находится более чем в одном месте сразу. Левая матрица плотности соответствует карте, которая в равной мере находится в квантовой суперпозиции в обоих изображенных внизу положениях, на что указывают два пика, помеченных “Квантовая интерференция”. После того, как от карты отразится фотон, декогеренция уничтожает эти два пика, приводя матрицу плотности к виду, изображенному справа. Она соответствует карте, фактически находящейся в одном из двух мест, но вы не знаете, в каком именно. Небольшая ширина этих пиков соответствует остающейся квантовой неопределенности вблизи положений лицом вверх и лицом вниз.

Так и оказалось. Через две недели я изложил свои соображения в первом черновике статьи, которую назвал «Кажущийся коллапс волновой функции, вызванный рассеянием». Рассеяние – это научный термин для описания поведения частиц, отскакивающих от вещества. Я впервые готовил статью для публикации и чувствовал себя, как ребенок у рождественской елки. Я левша, и у меня ужасный почерк (почти каждое школьное задание возвращалось с пометкой «Поработайте над аккуратностью!»), так что было восхитительно видеть, как мои каракули превращаются в прекрасно набранные уравнения. В то же время было смешно, как я панически боялся, что найденное мной кто-то уже открыл. Я полагал, что нечто столь фундаментальное, если оно уже известно, должно упоминаться в учебниках и на моих аспирантских занятиях. Ничего подобного не было, но все равно меня чуть не бросало в дрожь каждый раз, когда в процессе поиска литературы я открывал подозрительную ссылку. Пока все было хорошо...

Готовясь к своей первой публикации, я даже изменил фамилию: вместо отцовской, Шапиро, взял материнскую – Тегмарк. В Швеции мне нравилось называться Шапиро. Мы привыкли быть единственной в стране семьей с такой фамилией. А в международном научном сообществе Шапиро было столько, сколько в Швеции Андерсонов. Последний каплей стало то, что, введя в базе данных физических статей «М. Шапиро», я получил тысячи результатов. Даже на моем физическом факультете, в Беркли, нашлось трое М. Шапиро, и одна из них, Марджори, обучала меня физике элементарных частиц! Напротив, моя мать и ее родственники были, насколько я могу судить, единственными Тегмарками на планете. Меня

слегка тревожило, что отец может воспринять перемену фамилии как своего рода отстранение, но он заверил, что его это не беспокоит, процитировав Шекспира: «Что значит имя?»

Радости обойденного

Так продолжалось целый месяц, пока я не вернулся с рождественских каникул из Швеции. Я уже был готов отослать статью, когда все рухнуло. Кто виноват? Энди Элби. Это он рассказал мне, что польский физик Войцех Зурек уже сделал все это. Забудьте про эффект Тегмарка – у него уже есть название: *декогеренция*. Вскоре я узнал, что немецкий физик Дитер Це открыл этот эффект еще в 1970 году.

Сначала я мало что почувствовал, как обычно, когда получаешь плохие новости. Потом я шутил об этом со своими друзьями Уэйном, Джастином и Тедом. Потом пошел домой, не понимая, насколько я был близок к краю, и вступил в глупую перепалку с подругой о чем-то совершенно тривиальном: что она сварила рис только для себя, а мне дает размороженный рис, из холодильника. Неожиданно я почувствовал такую тоску, что захотелось рыдать, но даже на это я оказался неспособен.

Постепенно, однако, мое отношение к тому, что меня опередили, полностью переменялось. Прежде всего, главная причина, по которой я занимаюсь наукой, состоит в том, что мне доставляет наслаждение открывать, как устроены вещи, и переоткрыть нечто бывает столь же восхитительно, как и впервые открыть, поскольку в момент открытия вы не знаете, с чем имеете дело. Во-вторых, поскольку я верю, что где-то существуют другие, более развитые цивилизации – в параллельных вселенных, если не в нашей собственной, – все, что мы откроем здесь, на нашей планете, будет переоткрытием, и этот факт нисколько не умаляет нашей радости. В-третьих, когда вы открываете лично для себя, вы, вероятно, понимаете это гораздо глубже и, конечно, выше это цените. Изучая историю, я также пришел к пониманию того, что значительная часть всех прорывов в науке совершалась неоднократно: когда правильные вопросы носят в воздухе, а инструменты для работы с ними уже доступны, многие независимо друг от друга будут, естественным образом, находить одни и те же ответы. Я помню, как на лекции по квантовой механике Юджин Комминс с серьезным лицом произнес: «Это называется уравнением Клейна – Гордона, поскольку его открыл Шредингер».

С тех пор я переоткрыл еще много вещей. Обычно, когда переоткрываешь нечто фундаментальное, обнаруживаешь интересные детали, которые не заметили другие (и наоборот), что позволяет получать пользу от негромких публикаций, которые ссылаются на предыдущие работы и что-то к ним добавляют. Но мой случай был почти безнадежным. Я составил список из десяти наиболее существенных природных источников декогеренции (от очевидных материй вроде воздуха и солнечного света до таких трудно экранируемых вещей, как фоновая радиоактивность и солнечные нейтрино), а затем обнаружил прекрасную статью Це и его студента Эриха Йоса шестилетней давности, с практически идентичной таблицей. И все же в моей статье набралось достаточно нового материала (<http://arxiv.org/pdf/gr-qc/9310032.pdf>), чтобы опубликовать ее в менее престижном журнале. Но если я надеялся начать свою публикационную активность с могучего всплеска, то получился, скорее, смешной шлепок.

Оглядываясь назад, я могу сказать, что самым уморительным повторением был не этот первый случай, а тот, который произошел в 1995 году, когда я изобрел метод измерения квантового состояния (волновой функции матрицы плотности) частицы. Никогда не забуду: я уже собирался подавать статью, когда наткнулся на чужую опубликованную работу, и вечером как идиот стоял в опустевшей библиотеке, глядя в журнал. Эти ребята не только опередили меня, но и подготовили тщательно проработанный, понятный рисунок, почти идентичный моему графику, и предложили для своего метода в точности то же туманное название, кото-

рое придумал я – *томография фазового пространства*. Все, что я мог сделать – это воскликнуть: «ХУРФ!» – особое слово, выдуманное мной вместе с братом Пером. Оно идеально соответствовало моменту.

В конце концов я встретился со многими из этих ужасных анонимных конкурентов и нашел, что они по-настоящему замечательные люди. Це и Зурек прислали мне одобрительные письма о моей работе и пригласили выступить с докладом. В 2004 году я побывал у Войцеха Зурека в Лос-Аламосе и открыл одну из самых замечательных привилегий ученого: вас приглашают посетить экзотические места, где вы проводите все время в общении с замечательными людьми – и это называется *работой*! И вам даже оплачивают эти поездки! У Зурека пышная шевелюра и озорные огоньки в глазах, выдающие его пристрастие к приключениям как в науке, так и в развлечениях. Однажды он убедил меня залезть под скалу, нависающую над закрытым участком рядом с огромным исландским водопадом Гюдльфосс, и пройти в метре от падающей воды, когда поток вдруг поменял направление, и я не знаю, сколько параллельных вселенных потеряли двух теоретиков декогеренции. Когда я посетил Це и его группу в Гейдельберге в 1996 году, то удивился, как мало почестей ему воздали за колоссальной значимости открытие декогеренции. Его ворчливые коллеги с физического факультета Гейдельбергского университета в основном отвергали его работу как слишком философскую, несмотря на то, что факультет расположен на *Философской улице*. Собрания его группы были перенесены в здание церкви, и меня поразило, что единственным источником средств, который он нашел для поддержки написания самой первой книги о декогеренции, стала лютеранская церковь.

Это привело меня к убеждению, что Хью Эверетт не был исключением: изучение оснований физики – это вовсе не способ прославиться. Это больше похоже на искусство: лучшая причина для таких занятий – если вы их любите. Лишь немногие из моих коллег физиков решили работать над по-настоящему большими вопросами, и когда я встречаюсь с ними, то чувствую подлинное родство душ. Я представляю их группой друзей, которые отказались от доходной карьеры, чтобы стать поэтами, способными чувствовать подобные связи, зная, что все они занимаются этим не ради денег, а в качестве интеллектуального приключения.

Всякий раз, когда попутчик в самолете задает мне вопросы о науке, я припоминаю правильный способ думать о соревновании и возможности оказаться обойденным. Здесь, в кресле самолета, я – посол страны Физики, и для меня радость и гордость состоит в описании не того, что сделал я лично, но того, что сделали мы, физики, сообща. Иногда я опережаю коллег, чаще они опережают меня, но главное то, что мы учимся друг у друга, вдохновляем друг друга и достигаем большего, чем по силам одному человеку даже в самых буйных фантазиях. Это удивительное сообщество, и я невероятно счастлив быть в его составе.

Почему ваш мозг – не квантовый компьютер

«Сэр Роджер Пенроуз некогерентен⁴⁶, и Макс Тегмарк утверждает, что может это доказать». Ничего себе! Я прочел первую строчку заметки в журнале «Сайенс» от 4 февраля 2000 года и почувствовал, что меня застали врасплох. Я никогда не называл знаменитого математического физика некогерентным, но журналистам по душе скандалы и каламбуры, а я написал статью (<http://arxiv.org/pdf/gr-qc/9310032.pdf>), в которой показал, что одна из идей Пенроуза неверна из-за декогеренции.

В последние годы наблюдается всплеск интереса к квантовым компьютерам, которые могли бы использовать причуды квантовой механики для ускоренного решения некоторых

⁴⁶ Английское слово *incoherent* означает также «бессвязный», «непоследовательный», вплоть до «бестолковый». – Прим. пер.

задач. Допустим, вы купили эту книгу в интернет-магазине. Номер вашей кредитной карты был зашифрован методом, который основан на том факте, что перемножение двух 300-значных простых чисел делается быстро, а разложение на множители получившегося 600-значного числа осуществить трудно, и с лучшими современными компьютерами это заняло бы времени больше, чем возраст нашей Вселенной. Если удастся построить большой квантовый компьютер, хакеры смогут с помощью квантового алгоритма, изобретенного моим коллегой по Массачусетскому технологическому институту Питером Шором, очень быстро найти ответ и украсть ваши деньги. Как утверждает пионер квантовых вычислений Дэвид Дойч, «квантовые компьютеры распределяют информацию по огромному числу версий самих себя в мультиверсе» и могут быстрее получить ответ здесь, в нашей Вселенной, в известном смысле, получая помощь от тех, других версий. Квантовый компьютер может также эффективно моделировать поведение атомов и молекул, заменяя измерения в химических лабораториях таким же образом, как моделирование на обычных компьютерах заменило измерения в аэродинамических трубах. Многие современные компьютеры действуют быстрее за счет параллельной работы множества процессов. О квантовом компьютере можно думать как об идеальном параллельном компьютере, использующем мультиверс III уровня в качестве вычислительного ресурса и, в некотором смысле, запускающем параллельные вычисления в параллельных вселенных.

Прежде чем строить такую машину, надо справиться с огромными инженерными проблемами, такими как достаточно надежная изоляция квантовой информации, чтобы декогеренция не разрушала квантовые суперпозиции. Здесь еще предстоит сделать очень многое: в то время как компьютер в сотовом телефоне хранит, вероятно, миллиарды битов информации (нулей и единиц), самые совершенные квантовые компьютеры в лабораториях мира могут хранить лишь по несколько штук. Однако Пенроуз и другие выдвинули шокирующее предположение: возможно, у вас уже есть квантовый компьютер – в голове! Они предположили, что наши мозги (по крайней мере некоторые) являются квантовыми компьютерами и что это ключевой момент для понимания природы сознания.

Поскольку декогеренция нарушает квантовые эффекты, я решил применить те самые формулы для декогеренции, с которыми меня опередили, для проверки идеи Пенроуза. Сначала я выполнил расчеты для нейронов (рис. 8.7), нервных клеток, которые, подобно проводам, передают электрические сигналы в мозге. Нейроны тонкие и длинные: если вы выложите свои нейроны один за другим, они обогнут Землю около 4 раз. Нейроны передают электрические сигналы, перемещая атомы натрия и калия, у каждого из которых не хватает электрона (а потому они несут положительный электрический заряд). Если подключить отдыхающий нейрон к вольтметру, тот определит, что напряжение между внутренней и наружной областями клетки составляет 0,07 В. Если одно из окончаний нейрона снизит это напряжение, в клеточной мембране откроются чувствительные к напряжению каналы, заряженные атомы натрия начнут проходить по ним, напряжение снизится еще сильнее, и поток атомов усилится. Это цепная реакция, называемая *разрядом*, распространяется по всей длине нейрона со скоростью до 300 км/ч, пропуская внутрь клетки около миллиона атомов натрия. Аксон вскоре восстанавливается, и быстрые нейроны могут повторять этот процесс разряда более тысячи раз в секунду.

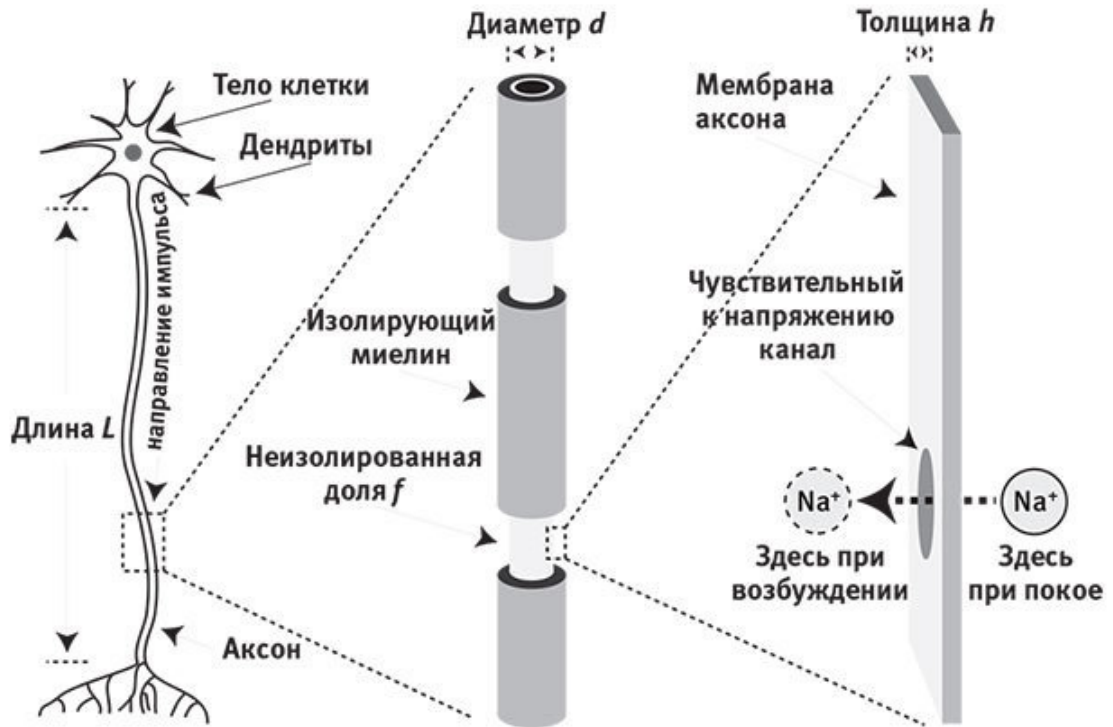


Рис. 8.7. Схематическое изображение нейрона (слева), участка его длинного отростка, называемого аксоном (посередине) и фрагмента мембраны аксона (справа). Большая доля площади аксона покрыта непроводящим веществом миелином, но на нем есть небольшие оголенные участки (примерно каждые полмиллиметра), где концентрируются чувствительные к электрическому напряжению натриевые и калиевые каналы. Когда нейрон находится в суперпозиции состояний возбуждения и покоя, около 1 млн атомов натрия (Na) находится в суперпозиции состояний внутри и снаружи клетки (справа).

Теперь предположим, что мозг — действительно квантовый компьютер и разряд нейронов каким-либо образом вовлечен в эти вычисления. Тогда отдельный нейрон должен быть способен находиться в суперпозиции выдавшего и не выдавшего разряд, а значит, около миллиона атомов натрия должны находиться в двух местах одновременно — внутри и снаружи нейрона. Квантовый компьютер работает лишь постольку, поскольку его состояние остается тайной для мира. Так долго ли нейрон может хранить в секрете, выдал он разряд или нет? Когда я подставил числа, ответ получился — «очень недолго»: около десяти миллиардных долей триллионной доли секунды (10^{-20} с). Столько времени обычно проходит, прежде чем случайная молекула воды столкнется с одним из миллиона атомов натрия и обнаружит себя, тем самым разрушив квантовую суперпозицию. Я также обчислил другую модель Роджера Пенроуза, в которой квантовые вычисления выполняются не нейронами, а микротубулами, элементами цитоскелета клеток, и обнаружил, что они поддаются декогеренции примерно за 10^{-13} секунды (100 квадриллионных долей). Чтобы мои мысли соответствовали квантовым вычислениям, они должны завершаться прежде, чем случится декогеренция, так что мне следует думать со скоростью 10 000 000 000 000 мыслей в секунду. Может быть, Пенроуз умеет думать так быстро, а я нет.

На самом деле не удивительно, что мозг не работает подобно квантовому компьютеру. Мои коллеги, которые пытаются построить квантовый компьютер, ведут затяжную войну с декогеренцией и обычно изолируют свои устройства в холодном темном вакууме, чтобы сохранить их состояние в секрете от остального мира, в то время как мозг — теплое влаж-

ное место, отделы которого не изолированы. Однако некоторые остались недовольны моей статьей, и я получил первый опыт научной полемики. Стюарт Хамерофф, один из авторов концепции квантового сознания, заявил, что я «подбросил зловонную бомбу на это исследовательское поле» и доставил массу проблем исследователям квантового сознания. «Вы что, наемный убийца от научной ортодоксии?» – спрашивал он меня.

Меня это изрядно повеселило, поскольку обычно я сам склонен противостоять научной ортодоксии и инстинктивно поддерживаю слабейшую сторону, тех, кто придерживается нетрадиционных идей. Кроме того, я не делал эти расчеты в надежде на конкретный результат, а просто разбирался, каким будет ответ. На самом деле, я был бы счастлив, если бы пришел к противоположному заключению, поскольку было бы по-настоящему прикольно иметь собственный квантовый компьютер. Вместе с двумя соавторами Хамерофф опубликовал возражения к моей статье, которые, как я чувствовал, были ошибочными⁴⁷, и я не мог избавиться от ощущения, что порой ученые прикипают к идее почти с религиозным жаром, так что никакие факты не могут их разубедить. Неужели все эти нагромождения специальной терминологии были всего лишь попыткой рационализировать тезис: «Сознание – это загадка, и квантовая механика – это загадка, так что они должны быть связаны»?

В 2009 году в Нью-Йорке я наконец встретил Стюарта Хамероффа. Он оказался очень общительным и дружелюбным человеком. Мы пообедали вместе и, что интересно, не нашли ни одной выкладки или измерения, по поводу которых не были бы согласны друг с другом. Мы решили, что дело в разном понимании того, как все это относится к сознанию.

Субъект, объект и среда

Я должен сделать одно признание: мои расчеты декогеренции мозга были только предлогом. Это не было настоящей причиной написания той статьи. Я был сильно взволнован, очень хотел опубликоваться, но догадывался, что мои идеи покажутся слишком философскими, чтобы их приняли к публикации. Поэтому я применил троянскую стратегию: скрыть философскую часть, которую я хотел протащить мимо рецензентов, за многими страницами вполне респектабельно выглядящих уравнений. Стратегия и сработала – в том смысле, что статью приняли, – и провалилась (читатели обращали внимание только на маскировку – на то, что мозг не является квантовым компьютером).

Так в чем состояло мое скрытое сообщение? Это был унифицированный способ думать о квантовой реальности (рис. 8.8). Фейнман подчеркивал, что квантовая механика разделяет нашу Вселенную на две части: рассматриваемый объект и все остальное (*среда*). Но я чувствовал, что в этой квантовой головоломке отсутствует важный элемент – сознание. Как показано в работе Эверетта, понимание процесса наблюдения требует подключения третьей части Вселенной – состояния сознания наблюдателя, отмеченного словом «субъект» на рис. 8.8⁴⁸.

⁴⁷ Они утверждали, что модель микрокапсулы, которую я проверял, взята не из книги Пенроуза, но в 2006 году Стюарт любезно признал, что она оттуда. Они также доказывали, что мои вычисления должны быть ошибочными, поскольку выведенный мной временной масштаб декогеренции убывает при снижении температуры мозга, в то время как интуитивно ожидается, что должно быть наоборот. Момент, который они упустили, состоит в том, что как только вы снизите абсолютную температуру на 10 %, то есть ниже 0 °C, мозг замерзнет и время декогеренции резко возрастет. Небольшое уменьшение времени декогеренции при незначительном снижении температуры отражает тот хорошо известный факт, что объекты с большей вероятностью сталкиваются друг с другом при снижении температуры, подобно тому, как медленные нейтроны с большей вероятностью, чем быстрые, попадают по мишеням в ядерном реакторе. Они также утверждали, что мозг способен выполнять квантовые вычисления, используя «другие» механизмы, не указывая достаточно ясно, какие именно, чтобы я мог это проверить, а еще они говорили, что в мозге могут иметь место иные квантовые эффекты, которые не являются вычислениями (с чем я, собственно, никогда не спорил).

⁴⁸ Здесь я имею в виду лишь те отделы мозга, которые отвечают за сознательное восприятие.

Если вы не физик, вам может показаться забавным, что в физическом сообществе так мало говорят о сознании при всей суете вокруг наблюдений в квантовой механике. В конце концов, разговор о наблюдениях без упоминания сознания напоминает дискуссию о близорукости без упоминания глаза. Я думаю, это объясняется тем, что поскольку мы не понимаем, как устроено сознание, большинство физиков чувствует себя некомфортно, даже упоминая его в разговоре, из опасения, что их сочтут излишне философствующими. Лично мне кажется, что одно лишь непонимание чего-либо вовсе не означает, что мы должны это игнорировать, надеясь притом получить корректные ответы.

Я подробно расскажу о сознании в следующей главе. Для понимания рис. 8.8 эти детали не нужны: предположу лишь, что ваше сознание возникает в результате удивительно сложного движения частиц, составляющих мозг, и эти частицы подчиняются уравнению Шредингера, подобно всем остальным частицам.

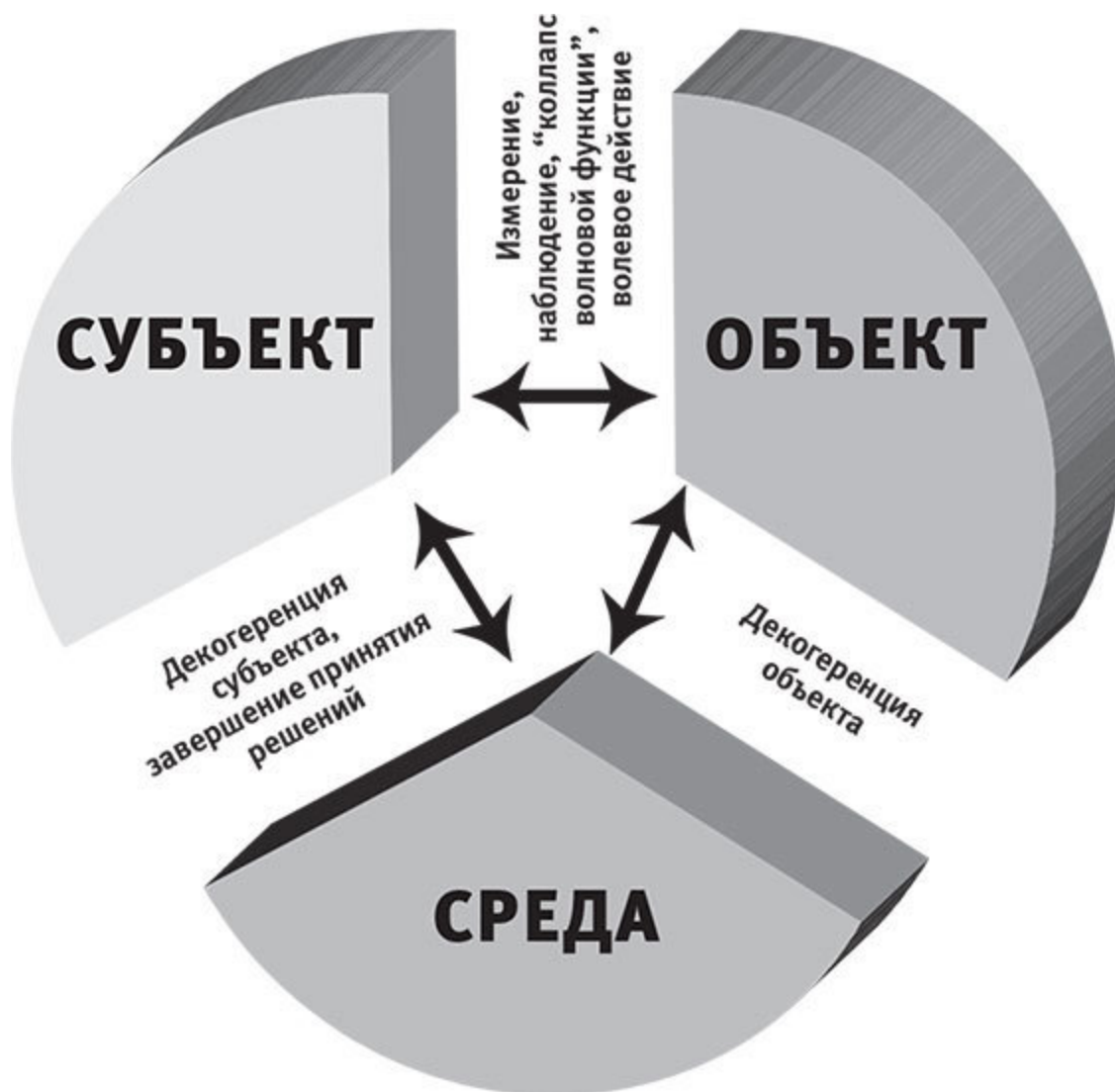


Рис. 8.8. Удобно разбивать мир на три части: соответствующую вашему субъективному восприятию (субъект), ту, которая подвергается изучению (объект), и все остальное (среда). Взаимодействие между тремя частями вызывает качественно различные эффекты, благодаря которым складывается единая картина, включающая и декогеренцию, и кажущийся коллапс волновой функции.

В своей «троянской» статье я разделил уравнение Шредингера на части: три из них управляли составляющими Вселенной (субъектом, объектом и средой), а дополнительные части управляли взаимодействием между этими составляющими. Затем я изучил влияние всех частей уравнения и показал, что одна часть его дает содержимое моих учебников, вторая – множество миров Эверетта, третья – декогеренцию Це, а еще одна часть дает нечто новое. Стандартные учебники концентрируются лишь на той части уравнения Шредингера, которая управляет объектом (например атомом), следуя духу редукционизма (согласно которому такие вещи должны анализироваться сами по себе, без учета целого). Взаимодействие между субъектом и объектом дает параллельные вселенные Эверетта, распространяя квантовые суперпозиции с объекта на вас, субъект. Взаимодействие между средой и объектом дает декогеренцию, объясняя, почему крупные объекты (например дама червей) никогда не показывают признаков странного квантового поведения вроде нахождения в двух местах одновременно. На практике попытки избавиться от декогеренции безнадежны в обычных условиях, но даже в мысленном эксперименте (скажем, при повторении эксперимента с квантовыми картами в темном холодном помещении без воздуха и с единственным фотоном, падающим на карту и затем наблюдаемым вами) существенного отличия не будет. Если карта находится в двух местах сразу, то же самое должно быть и с фотоном. Значит, по крайней мере один нейрон зрительных нервов перейдет в состояние суперпозиции выдавшего и не выдавшего разряд в тот момент, когда вы взглянули на карту. Эта суперпозиция испытает декогеренцию примерно через 10^{-20} секунды.

Декогеренция все же не до конца объясняет, почему вы никогда не ощущаете странностей квантового мира, поскольку мыслительный процесс (внутренняя динамика субъекта) может порождать странные суперпозиции знакомых состояний сознания. К счастью, на помощь приходит третье из представленных на рис. 8.8 взаимодействий – между субъектом и средой. Тот факт, что нейроны испытывают декогеренцию значительно быстрее, чем обрабатывают информацию, означает, что если сложная схема разрядов нейронов в мозге имеет какое-либо отношение к сознанию, то декогеренция мозга будет препятствовать переживанию странных суперпозиций.

Взаимодействие субъекта и среды помогает связать и другие концы. Войцех Зурек пошел в исследования декогеренции дальше того, что я переоткрыл, и показал, что она делает для нас еще одно важное дело. Декогеренция не только объясняет, почему крупные объекты никогда не видимы в двух местах сразу, но и дает понимание, в чем особенность обычных состояний (таких как пребывание лишь в одном месте). Из всех состояний, которые квантовая механика допускает для крупных объектов, эти обычные состояния являются одними из самых устойчивых к декогеренции, и именно они выживают. Они, подобно кактусам в пустыне, более устойчивы к воздействию суровой среды и потому встречаются там чаще, чем розы. На самом деле именно статья на эту тему, написанная мной совместно с отцом, стала причиной, по которой Войцех пригласил меня сделать доклад в Лос-Аламосе.

Итак, декогеренцию можно уменьшить, используя сложное лабораторное оборудование вроде вакуумных насосов и установок, охлаждающих до экстремально низких температур, но мы никогда не сможем отключить декогеренцию наших нейронов. Мы не знаем, как устроено наше сознание, но знаем наверняка, что вся информация, поступающая в сознание из окружающего мира, должна сначала пройти по нейронам от органов чувств, например от глаз по зрительным нервам или от ушей по слуховым нервам, а они испытывают декогеренцию за смехотворно короткое время. Так что к моменту, когда мы субъективно воспринимаем впечатление о внешнем мире, декогеренция уже завершилась, а это гарантирует невозможность восприятия нами квантовых странностей и объясняет, почему мы воспринимаем лишь устойчивые обычные состояния.

Среди спорных вопросов в физике есть несколько столь величественных, что они уже несколько поколений возвышаются над всеми остальными. Великая полемика об интерпретации квантовой механики, очевидно, из их числа. Другая касается *второго начала термодинамики*. Оно утверждает, что энтропия изолированной системы никогда не убывает. Энтропия – это количественная мера *неполноты информации*, которая имеется у нас о системе, по сути, количество битов информации, которые потребовались бы нам для задания ее квантового состояния. Некоторые ученые превозносят второе начало едва ли не до небес, как великий астрофизик сэр Артур Эддингтон, сказавший: «Закон монотонного возрастания энтропии – второе начало термодинамики – занимает, как мне кажется, высшее положение среди законов природы. Если кто-нибудь заметит вам, что ваша любимая теория Вселенной не согласуется с уравнениями Максвелла, то тем хуже для уравнений Максвелла. Если окажется, что ваша теория противоречит наблюдениям, – ну что же, и экспериментаторам случается ошибаться. Но если окажется, что ваша теория противоречит второму началу термодинамики, то у вас не остается ни малейшей надежды: ваша теория обречена на бесславный конец»⁴⁹. Другие ученые, в том числе Максвелл, Гиббс, Лошмидт, Пуанкаре выдвинули серьезные возражения против второго начала. До сих пор нет консенсуса относительно того, даны ли удовлетворительные ответы на их возражения.

По-моему, эти две великие дискуссии, квантово-механическая и термодинамическая, связаны в том смысле, что обе можно разрешить разом, если применить стандартное квантово-механическое определение энтропии Джона фон Неймана, отказаться от коллапса волновой функции и принимать во внимание все составляющие реальности: субъект, объект и среду.

Как показано на рис. 8.8, измерение и декогеренция отражают взаимодействие объекта соответственно с субъектом и со средой. Хотя процессы измерения и декогеренции могут выглядеть различно, энтропия открывает между ними интересный параллелизм: нехватка у нас информации об объекте является очень важной величиной, в физике называемой *энтропией*. Если объект ни с чем не взаимодействует, его энтропия остается постоянной: спустя секунду вы будете знать об его состоянии ровно столько же, сколько знаете сейчас, поскольку можете вычислить его будущее состояние по исходному с помощью уравнения Шредингера. Если объект взаимодействует с вами, то обычно вы получаете о нем больше информации, и его энтропия уменьшается. Например, после открывания глаз (*рис. 8.1*) существует две ваши копии. Они наблюдают различные исходы, но обе знают, как легла карта в соответствующей параллельной вселенной, а значит, получают об этой карте один бит дополнительной информации. Но если объект взаимодействует со средой, вы обычно теряете информацию о нем, и его энтропия увеличивается. (Если Филипп знает, где лежат его карточки с покемонами, то у него станет меньше информации об их местоположении после того, как с ними поиграет Александр.) Если вы знаете, что карта находится в квантовом состоянии, соответствующем ее присутствию в двух местах сразу, а затем какой-нибудь человек или фотон обнаружит ее, но не сообщит вам об этом, то вы потеряете один бит информации о ней. Сначала вы знали ее квантовое состояние, а теперь она фактически пребывает в одном из двух квантовых состояний, но вы не знаете, в каком. Короче говоря, я представляю это так: энтропия объекта убывает, когда вы на него смотрите, и возрастает, когда не смотрите. Декогеренция – это просто измерение, результатов которого вы не знаете. Стремясь к большей строгости, можно точнее сформулировать второе начало термодинамики:

1. Энтропия объекта не может убывать, если он не взаимодействует с субъектом.

⁴⁹ Цит. по: Бармасов, А. В., Холмогоров, В. Е. *Курс общей физики для природопользователей. Молекулярная физика и термодинамика*. СПб.: БХВ-Петербург, 2009. С. 199. – Прим. пер.

2. Энтропия объекта не может возрасть, если он не взаимодействует со средой.

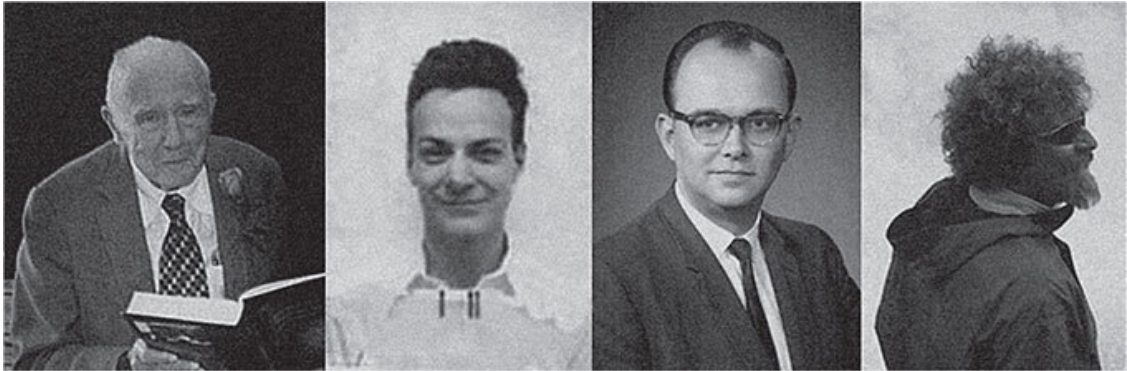


Рис. 8.9. Таким я запомнил Джона Уилера (на этом снимке 2004 г. он держит книгу, изданную к конференции, приуроченной к его 90-летию). Далее его аспиранты: Ричард Фейнман (ок. 1943 г.), Хью Эверетт (ок. 1957 г.) и Войцех Зурек (2007 г., возле исландского водопада). (Права на снимки: *Pamela Bond-Contractor [Ellipses Enterprises]*, *Mark Oliver Everett*, *Anthony Aguirre*.)

Традиционная формулировка этого закона просто соответствует игнорированию субъекта. Публикуя статью по этому вопросу (<http://arxiv.org/pdf/1108.3080.pdf>)⁵⁰, я включил в нее доказательство второй части утверждения (как декогеренция увеличивает энтропию), однако строгое доказательство первой части (того, что в среднем наблюдение всегда уменьшает энтропию) мне не удалось, несмотря на то, что мои компьютерные модели надежно его подтверждали. Затем случилось нечто удивительное, напомнившее мне приход в Мас-сачусетский технологический институт: полный энергии 21-летний студент Грант Гарибян попросил у меня интересную задачу. Мы объединили усилия, и он взялся за дело с огромным рвением, поглощая математические книги как попкорн и осваивая математические инструменты вроде произведения Шура или спектральной мажоризации, незнакомые большинству физиков и известные мне в основном от отца-математика. Однажды, увидев Гранта, я понял по его торжествующей улыбке: он решил задачу! Мы надеемся опубликовать его доказательство, как только я закончу эту книгу.

Квантовый суицид

Я привык делить физиков на две категории: титанов и простых смертных. Титаны – великие исторические фигуры вроде Ньютона, Эйнштейна, Шредингера, Фейнмана, легендарные, наделенные сверхъестественной силой. Смертные – это физики, с которыми я встречался, хотя и, возможно, блестящие ученые, однако определенно обычные люди вроде нас. И еще был Джон Уилер. Я встретил его в январе 1996 года. Случилось это в копенгагенском кафетерии, во время ланча на конференции. Ему было тогда 94 года. Для меня Уилер был «последним титаном». Он работал с Нильсом Бором над проблемами ядерной физики. Он придумал термин «черная дыра». Он первым заговорил о пространственно-временной пене. Фейнман и Эверетт были его аспирантами. Он стал одним из моих супергероев благодаря

⁵⁰ Если вы не брезгуете математикой, эта статья также показывает, как данный результат в сочетании с инфляцией может объяснить низкое значение энтропии в ранней Вселенной. Это, в свою очередь, объясняет стрелу времени (прекрасно изложено в книгах Шона Кэрролла и Дитера Це, см. раздел «Рекомендованная литература»). В статье также приводится квантово-механическое обобщение стандартной процедуры для актуализации наших знаний с использованием новой информации (известной как теорема Байеса).

своему пристрастию к безумным идеям. И вот он *просто обедает!* Я почувствовал, что обязан познакомиться с ним, иначе никогда себе этого не прощу. Подходя к его столу, я очень нервничал. Незадолго до того люди, стоящие выше меня в академической пищевой цепочке, поколебали мою уверенность в себе: в разных ситуациях два профессора посреди разговора вдруг повернулись ко мне спиной и ушли, а ведь они были простыми смертными. А вот Уилер приветствовал меня, неопытного постдока, улыбкой, и пригласил присоединиться к ланчу! Услышав, что я интересуюсь квантовой механикой, он поделился свежими соображениями относительно понятия существования и дал свои недавние заметки. Он ни разу меня не перебил и говорил так, что я чувствовал себя равным ему. Через две недели я даже получил от него электронное письмо – письмо от титана! Он писал:

Мне было очень приятно и интересно пообщаться с вами в Копенгагене, поскольку, я уверен, вы разделяете мое убеждение в том, что за квантовой механикой стоит еще не открытый глубокий и удивительный принцип, наподобие великой идеи Эйнштейна, пролившего свет на силу и пределы всеобщей, как казалось, ньютоновской теории. Вероятность такого открытия, конечно, пропорциональна нашей вере в то, что существует нечто, подлежащее открытию.

Он пригласил меня приехать в Принстон: «Я хотел бы иметь возможность ежедневно с вами беседовать». В то время я выбирал между предложениями должности постдока – и как я мог после этого отклонить предложение из Принстона? Переехав туда, я стал регулярно посещать Уилера и лучше его узнал. Он и его жена пришли на вечеринку по поводу моего новоселья. Он даже расписался у меня в свидетельстве о браке, выданном штатом Нью-Джерси – в моем мире это было все равно, что заполучить в свидетели Господа Бога.

В кабинете его часто отвлекали, так что он предпочитал разговаривать, накручивая круги по коридорам третьего этажа вокруг внутреннего двора физического корпуса Принстонского университета. История оживала, когда он описывал, что чувствовал, наблюдая за первым испытанием водородной бомбы, или при встрече с Клаусом Фуксом, с помощью которого Советский Союз получил доступ к ядерному оружию. Уилер дал мне чувство личной связи с отцами-основателями в моей области, которые для него были простыми смертными.

Я показал ему самую безумную свою статью об идее математической Вселенной, и она ему понравилась. Когда редактор отклонил ее как «слишком умозрительную», несмотря на положительный отзыв рецензента, Уилер поддержал мою апелляцию, и это сработало. Позднее мы вместе написали статью для «Сайентифик американ»⁵¹ под названием «Сто лет квантовым тайнам», в которой пытались обычным языком объяснить идеи квантовых параллельных вселенных и декогеренции. Когда я спросил Уилера, в самом ли деле он верит в квантовые параллельные вселенные, он ответил: «Я пытаюсь найти время верить в них по понедельникам, средам и пятницам».

Мне очень редко случается плакать. В 2008 году, узнав, что Джон Уилер умер, я плакал. Он сильно на меня повлиял, а поминальная служба показала, сколько еще людей чувствовали то же самое. На приеме после нее был открытый микрофон для тех, кто чувствовал потребность говорить о покойном, и я произнес несколько фраз о том, как много он значил для меня. О том, что если выразить это одним словом, то это было бы слово «вдохновил». Он вдохновил меня тем, что человек столь яркий и знаменитый был настолько любезен, что с каждым общался на равных. Я говорил, что это вдохновило меня следовать зову своего сердца и работать над тем, что меня по-настоящему волновало. И что лучшее доказатель-

⁵¹ На русском языке журнал выходит под названием «В мире науки». – Прим. пер.

ство того, как он вдохновлял окружающих, можно получить, оглядев эту комнату и увидев, сколько потрясающих людей съехалось не менее чем с трех континентов. Это собрание без-ошибочно давало понять, кто есть кто в физике.

Однажды в конце рабочего дня, когда я подвозил Джона в пансионат Мидоу-Лейкс, где он жил, я стал рассказывать ему о безумно звучащей идее, которую назвал квантовым суицидом. Я потратил массу времени, размышляя, возможен ли эксперимент, который убедил бы в том, что эвереттовские параллельные вселенные реальны, и, наконец, я придумал такой.

Удивительно, но этот эксперимент требовал довольно нехитрого оборудования. Однако также требовал, чтобы вы были на редкость фанатичным экспериментатором, поскольку включал в себя многократно повторяющуюся ускоренную версию эксперимента Шредингера с вами в роли кота. Оборудование представляло собой «квантовый пулемет», который стреляет в зависимости от исхода квантового измерения. То есть всякий раз, когда пулемет запускается, он помещает частицу в состояние суперпозиции двух равновероятных состояний (скажем, вращения по или против часовой стрелки), а затем выполняет измерение частицы. Если оказывается, что она находится в первом из двух состояний, пулемет выстреливает, а в противном случае лишь громко щелкает. Детальное устройство этого механизма не имеет значения⁵², важно лишь, что интервал времени между квантовым измерением и выстрелом гораздо короче характерного времени человеческого восприятия – скажем, 1/100 секунды.

Теперь предположим, что вы запускаете квантовый пулемет в автоматическом режиме, и он срабатывает один раз в секунду. Независимо от того, верите ли вы в параллельные вселенные Эверетта, нетрудно предсказать, что вы услышите кажущуюся случайной последовательность выстрелов и щелчков: *выстрел-щелчок-выстрел-выстрел-выстрел-щелчок-щелчок-выстрел-щелчок-щелчок*. И тут вы делаете нечто экстремальное: помещаете голову на линию огня и ждете. Что вы ожидаете почувствовать? Это зависит от того, реальны эвереттовские параллельные вселенные или нет. Если нет, то у каждого квантового измерения только один исход, так что секунду спустя вы определенно будете мертвы либо живы – и то, и другое с вероятностью 50 %. И если вы умеренно везучий человек, то услышите один-другой щелчок, и больше ничего – игра окончена. Вероятность прожить n секунд составляет $1/2^n$, так что ваши шансы прожить минуту составляют менее одной квинтиллионной (10^{-18}). С другой стороны, если эвереттовские параллельные вселенные *реальны*, то через секунду будут существовать две параллельные вселенные: в одной вы живы, а во второй мертвы, и все вокруг забрызгано кровью. Иными словами, существует ровно одна ваша копия, обладающая восприятием и до, и после события-триггера, а поскольку процесс протекает слишком быстро для восприятия, предсказание состоит в том, что вы услышите *щелчок* со стопроцентной вероятностью. Подождите немного, и вы обнаружите нечто странное: поместив голову на линию огня с, казалось бы, случайной чередой выстрелов и щелчков, вы услышите *щелчок-щелчок-щелчок-щелчок-щелчок-щелчок-щелчок* и т. д. После десяти щелчков вы сможете исключить коллапс волновой функции с уверенностью 99,9 % в том смысле, что если коллапс волновой функции действительно происходит, то вероятность быть мертвым к этому моменту превысит 99,9 %. Через минуту вероятность того, что Эверетт ошибался, будет составлять одну квинтиллионную. Чтобы снять любые сомнения в исправности квантового пулемета, вы убиваете голову с линии огня и обнаруживаете, что волшебным образом выстрелы и щелчки снова начали чередоваться.

Если вы теперь убеждены, что Эверетт прав, и зовете подругу, чтобы она понаблюдала за экспериментом, есть одна тонкость. Хотя вы остаетесь в живых только в одной параллель-

⁵² Например, частица может быть атомом серебра, спин которого измеряется прибором Штерна – Герлаха, или это может быть фотон, который либо проходит, либо не проходит через полупрозрачное зеркало.

ной вселенной, она остается жить во всех и обычно видит, как через несколько секунд вы умираете. Так что единственное, в чем она убедится, так это в том, что вы сумасшедший.

Джон Уилер нашел это интересным. Я сказал, что, по-моему, многие физики обрадовались бы, если бы на смертном одре к ним явился всезнающий джинн и в награду за неизменное любопытство в течение жизни дал ответ на любой физический вопрос. Но что если бы джинн запретил рассказывать об этом другим? Возможно, величайшая ирония квантовой механики состоит в том, что если Эверетт прав, то ситуация аналогична тому, как если бы вы были готовы умереть и многократно повторяли попытки квантового суицида: вы лично убедились бы в существовании параллельных вселенных⁵³, но больше никого не убедили бы.

Вы, конечно, можете убедить друзей, если проведете эксперимент с суицидом совместно, скажем, присоединив квантовый триггер к атомной бомбе, так что вы окажетесь лишь в тех параллельных вселенных, где все ваши друзья живы или все мертвы. Но после этого они вряд ли останутся вашими друзьями.

Квантовое бессмертие?

После публикации о «квантовом суициде» статьи на эту тему появились в журнале «Сайентифик америкэн» и газете «Гардиан». Они привлекли внимание публики, и было забавно наблюдать, как эта идея появляется в многочисленных научно-фантастических рассказах. Я уже упоминал, что когда приходит время, у многих людей возникают сходные идеи, и я позднее обнаружил, что другие люди размышляли ранее подобным образом, начиная, вероятно, с австрийского математика Ханса Моравека, который упоминает об этой идее в книге об искусственном интеллекте «Дети разума» (1988). Однако я считаю, что, в отличие от моих прежних переоткрытий, в данном случае я внес некоторый вклад, популяризовав идею.

Вскоре меня засыпали электронными письмами с интересными вопросами о «квантовом суициде». Это заставило меня глубже поразмыслить об его следствиях, и вот мое самое любимое: если считать все потенциально летальные события в природе экспериментами с «квантовым суицидом», не получится ли, что вы должны ожидать бессмертия? Ответить на этот вопрос можно с помощью простого эксперимента: подождать и посмотреть! Если однажды после большого числа кажущихся невероятными совпадений вы окажетесь самым старым человеком на Земле, то почти наверняка все так и есть. Заметьте, что вам не следует ждать, что *другие* станут невероятно старыми – так же, как вы не ожидаете увидеть других долгожителями, если они ставят на себе эксперимент с «квантовым суицидом».

Так что предсказывают законы физики, если считать, что Эверетт прав и волновая функция никогда не коллапсирует? Чтобы иметь шансы на успех, эксперимент с «квантовым суицидом» должен удовлетворять трем критериям:

1. Генератор случайных чисел должен быть квантовым, а не классическим (детерминистическим), чтобы вы действительно оказывались в состоянии суперпозиции живого и мертвого.
2. Он должен убивать вас (или по крайней мере лишать сознания) за время короче того, что нужно вам для осознания исхода квантового измерения; в противном случае вы на секунду или больше получите лишь очень несчастную версию самого себя, твердо знающую, что она обречена, и весь эффект пропадет.
3. Он должен гарантированно убивать вас, а не просто ранить.

⁵³ Британский философ Пол Олмонд привел интересный контраргумент к этому утверждению (гл. 11).

Большинство несчастных случаев и других обычных причин смерти, очевидно, не удовлетворяют всем трем критериям, а значит, в результате вы не будете чувствовать себя бессмертным. В частности, если говорить о критерии № 2, то в обычных обстоятельствах процесс умирания не носит бинарного характера, когда вы либо живы, либо мертвы, а скорее представлен целым континуумом состояний постепенно убывающего самосознания. Чтобы имел место квантовый суицид, необходимо обеспечить резкий переход. Я подозреваю, что по мере старения клетки моего мозга будут отмирать (на самом деле этот процесс уже идет), так что мое самосознание сохраняется, но становится все слабее. Это делает финальную стадию смерти не слишком впечатляющей, вроде смерти амебы.

Критерий № 3 определяет, сколько времени должен осуществляться эксперимент по квантовому суициду на практике, прежде чем непредвиденные события спасут вашу жизнь. Например, каждые несколько лет, примерно раз в $10^8 \approx 2^{27}$ секунд, в моем районе случается отключение электроэнергии. Значит, если «квантовый пулемет» работает от электрической сети, а не от собственных батарей, то следует ожидать около 27 щелчков, а затем отключение электричества прервет эксперимент, поскольку с этого момента будет существовать больше параллельных вселенных с живым мной и неработающим пулеметом, чем с пулеметом действующим. Чем дольше пулемет проработает, тем больше невероятных событий может реализоваться: например, 36 секунд слыша щелчки, следует ожидать, что пулемет будет уничтожен метеоритом... В «Автостопом по Галактике» Дугласа Адамса описывается «бесконечно-невероятностный двигатель», который позволяет пережить крайне маловероятные события. Квантовый пулемет действует именно таким образом.

Особенно интересным я считаю критерий № 1. Допустим, ваше устройство для суицида основано не на квантовой случайности, а на чем-либо вроде подбрасывания монеты. То есть предсказать, выпадет орел или решка, можно в принципе, но не на практике, поскольку невозможно во всех деталях определить, как первоначально двигалась монета, и выполнить все вычисления. В этом случае, если у вас изначально имелась одна параллельная вселенная, то и после первой секунды она осталась бы, а вот вы оказались бы либо живы, либо мертвы, в зависимости от исходного положения и движения монеты, так что не смогли бы чувствовать себя субъективно бессмертным.

Но что если реален мультиверс I уровня (гл. 6)? Тогда вначале должно существовать бесконечно много параллельных вселенных, которые содержат вас в субъективно неразличимых состояниях сознания, но с неизмеримо малыми различиями в начальном положении и скорости монеты. Через секунду вы будете мертвы в половине этих вселенных, но независимо от того, сколько раз эксперимент повторяется, всегда найдутся такие вселенные, где вас никогда не застрелят. Иными словами, описанный жуткий эксперимент может раскрыть существование не только параллельных вселенных III (квантового) уровня, но и параллельных вселенных в более широком смысле.

Знаю, что это может показаться безумием. (В подобных случаях предупреждают: «Не пытайтесь проделать это самостоятельно».) Более того (гл. II), я теперь не вполне убежден и в действительности эксперимента с квантовым суицидом, и в реальности квантового бессмертия, поскольку и то, и другое критически зависит от существования в природе бесконечно делимого математического континуума, в чем я сильно сомневаюсь. Но кто знает? Когда наступит роковой день и вы будете уверены, что ваша жизнь подошла к концу, помните: не надо говорить себе, что от вас ничего не останется, поскольку это может оказаться не так. Возможно, вы лично убедитесь, что параллельные вселенные существуют.

Мультиверс объединенный

*Все животные равны, но некоторые животные равнее других.
Джордж Оруэлл, «Скотский хутор»⁵⁴*

Я никак не мог выкинуть из головы мысль: не представляют ли мультиверсы I и III уровней в некотором смысле одно и то же? Можно ли их каким-либо образом объединить, подобно тому, как Максвелл объединил электричество и магнетизм в электромагнетизм, а Эйнштейн объединил пространство и время в пространство-время? С одной стороны, кажется, что их природа различна. Параллельные вселенные I уровня (гл. 6) находятся где-то очень далеко в нашем старом добром трехмерном пространстве, а параллельные вселенные III уровня из этой главы могут располагаться прямо здесь, в смысле наших трех измерений, но они отделены от нас в гильбертовом пространстве (абстрактном пространстве с бесконечным числом измерений, в котором обитает волновая функция). С другой стороны, мультиверсы I и III уровней имеют много общего. Жауме Гаррига и Александр Виленкин показали, что параллельные вселенные I уровня, порожденные космологической инфляцией, содержат те же последовательности событий, что и эвереттовские квантовые параллельные вселенные. (Я пришел к тем же выводам.) Если квантовое событие вызывает два события, происходящих в квантовой суперпозиции (рис. 8.10), фактически расщепляя ваше будущее на две параллельные квантовые ветви, то параллельный квантовый исход, о котором вы сейчас ничего не знаете, происходит также и здесь, в вашей квантовой ветви, но очень далеко в пространстве.

И был еще один источник беспокойства: Энтони Агирре. Он один из моих лучших друзей, и наши жизни во многом параллельны: мы оба пытаемся найти баланс между карьерой и двумя маленькими сыновьями, оба захвачены глобальными проблемами, вместе основали Институт фундаментальных вопросов (*fqxi.org*), филантропически финансируемую организацию, которая вкладывается в высокорисковые, но обещающие большую отдачу физические исследования, непривлекательные для обычных фондов. Чем же Энтони меня беспокоил? «Что если одни параллельные вселенные *равнее* других?» – спрашивал он.

⁵⁴ Пер. М. Кригер и Г. Струве. – *Прим. пер.*

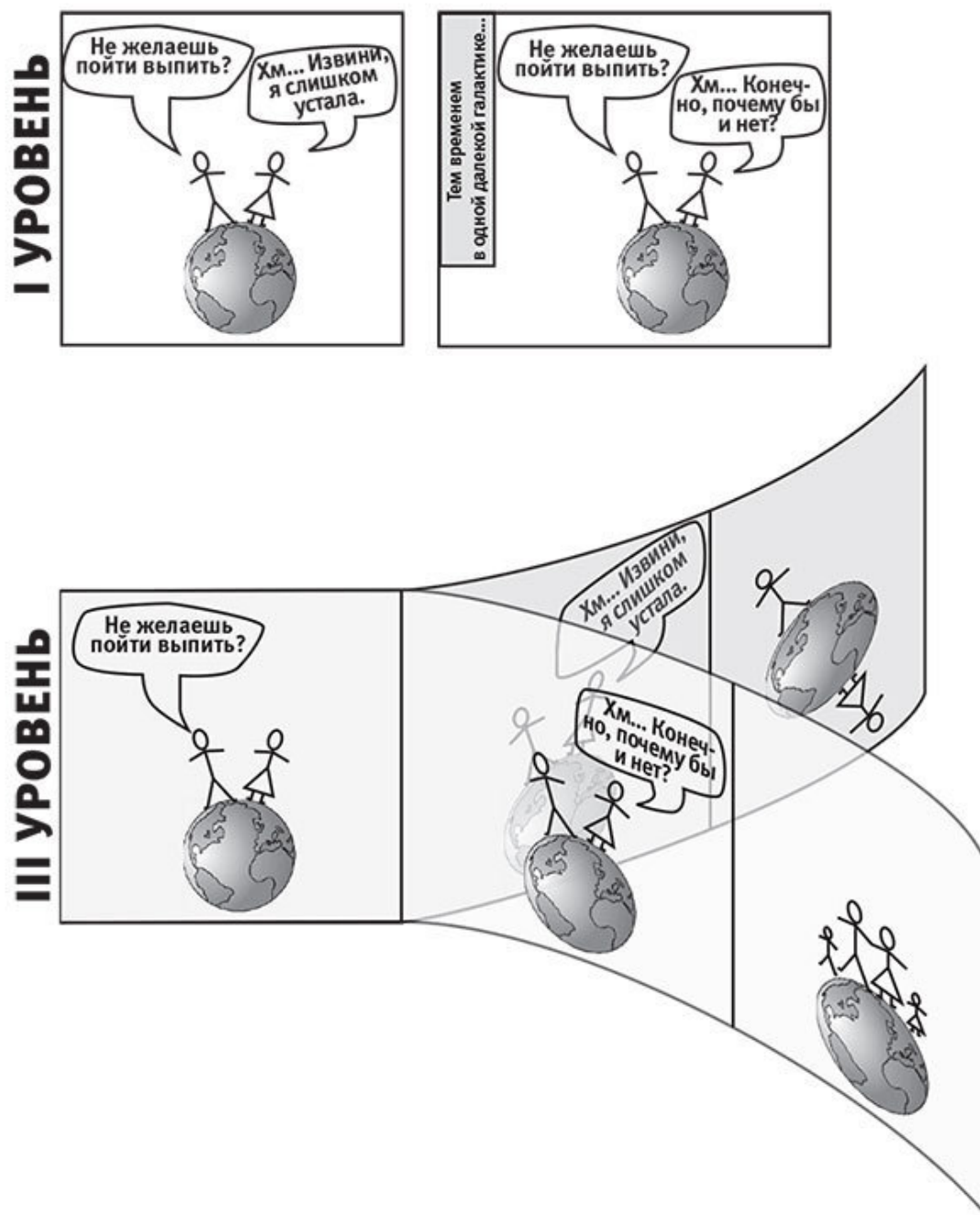


Рис. 8.10. Сравнение параллельных вселенных уровней I и III. В то время как параллельные вселенные I уровня находятся очень далеко в пространстве, вселенные, относящиеся к III уровню, располагаются прямо здесь, возникая за счет квантовых событий, которые расщепляют классическую реальность на расходящиеся истории. Тем не менее III уровень не добавляет новых историй к имеющимся на уровнях I или II.

Энтони обращал внимание на то, что объяснение квантовых вероятностей, которое я дал в этой главе, отлично подходит, если исходы имеют одинаковую вероятность (как в случае квантовых карт, которые падают лицом вверх или вниз с равными шансами в 50 %), но все усложняется, если вероятности неодинаковы. Предположим, например, что в начале эксперимента вы чуть наклонили карту, и вероятность (квадрат волновой функции) падения лицом вверх составляет теперь $\frac{2}{3}$, а лицом вниз – $\frac{1}{3}$. Тогда рис. 8.2 выглядел бы по-

прежнему – на нем осталось бы $2 \times 2 \times 2 \times 2 = 16$ исходов после четырех попыток, а наиболее вероятным исходом стало бы падение карты лицом вверх в 50 %, а не в $2/3$ случаев. Эверетт спасает положение и все же умудряется предсказать вероятность $2/3$, опираясь на то утверждение, что некоторые исходы имеют большую меру существования, нежели другие (причем ее можно вычислить как квадрат волновой функции). Это работает, и многие ученые пытались выстроить тщательно продуманную аргументацию, почему именно квадрат волновой функции должен играть эту роль. Однако Энтони убедил меня в том, что это страшный недостаток в остальном элегантных эвереттовских построений. Меня часто спрашивают, верю ли я в реальность параллельных вселенных Эверетта. Ответ «Да, но... хм... как бы сказать... Некоторые из них реальнее, чем другие» звучит крайне неубедительно.

В марте 2008 года Энтони рассказал мне о возможном подходе к решению этой проблемы (я вскоре его изложу), предложенном его гарвардским профессором Дэвидом Лэйзером. Мы провели два замечательных часа в кафе «Белмонт», исписывая салфетки математическими символами, – но все впустую. Мы не смогли заставить работать эту математику. Но я не мог и выкинуть эту идею из головы. Два года спустя я нашел статью, написанную в 1968 году теоретиком квантовой гравитации Джимом Хартлом, которая, как я чувствовал, содержала еще одну деталь пазла. Но, сидя поздним вечером 6 марта 2010 года в своей квартире в Уинчестере, я никак не мог сложить части головоломки. Я решил прогуляться. К моему удивлению, всего через пять минут на холоде у меня в голове наконец-то щелкнуло! Я вдруг понял, как разом решить обе проблемы: объединить два уровня мультиверсов и объяснить неравные вероятности. Это не давало мне уснуть до трех часов ночи и поглотило весь следующий день, который я провел в изумительном, подобном трансу состоянии, которое испытываешь, когда *совершенно* что-либо понимаешь. Я чувствовал, что это одна из самых замечательных догадок, посетивших меня с момента переоткрытия декогеренции девятью годами ранее, и я не мог остановиться, пока не написал четырехстраничный набросок статьи для Энтони.

Рис. 8.11 иллюстрирует ключевую идею. Допустим, вы собираетесь выполнить эксперимент с квантовыми картами, слегка наклонив карту, так что ожидаете увидеть ее упавшей лицом вверх и выиграть 100 долларов с вероятностью $2/3$. В традиционном виде (слева в каждом прямоугольнике на рис. 8.11) вначале имеется одна ваша копия, а затем, после эксперимента, – одна либо две копии, в зависимости от того, коллапсирует волновая функция или нет. Если верна копенгагенская интерпретация, то будет существовать один определенный исход, полученный случайным образом. Если же прав Эверетт, то будет две параллельных вселенных, и каждая содержит по одному вашему экземпляру: одна, в которой вы радуетесь выигрышу, другая – где вы опечалены проигрышем.

Пусть теперь существует мультиверс I уровня (гл. 6), как и предполагает современная космология. Это означает, что бесконечное число неотличимых от вас копий выполняет точно тот же эксперимент на других планетах очень-очень далеко (на рисунке это показано рядом нейтральных смайликов). В своих подсчетах я предположил, что уравнение Шредингера для волновой функции описывает всю совокупность частиц, составляющих все ваши копии и копии эксперимента.

Что в итоге? Если волновая функция коллапсирует, получится один случайный исход для всего бесконечного пространства (мультиверса I уровня), так что вы окажетесь довольным на $2/3$ планет и опечаленным на $1/3$ – здесь нет ничего удивительного. Если же Эверетт прав в том, что коллапса не происходит, то результатом станет целое бесконечное пространство в квантовой суперпозиции различных состояний, в каждом из которых вы радуетесь на одних планетах и печалитесь на других. А теперь – самое интересное. Все эти состояния пространства оказываются неотличимы друг от друга: вы счастливы ровно на $2/3$ бесконечного множества планет! Любая конечная последовательность планет со счастливыми и

несчастливыми исходами в одном из этих состояний обнаружится где-то в ином месте пространства в каждом из остальных состояний. Можно подумать, что должны существовать отличающиеся состояния пространства, скажем, такое, где вы счастливы на всех до единой планетах. Однако, опираясь на уравнение Шредингера и математические свойства гильбертова пространства, я смог доказать, что получаемая в итоге волновая функция равна простой суперпозиции бесконечного числа неотличимых состояний. Нас с Энтони по ряду причин это поразило.

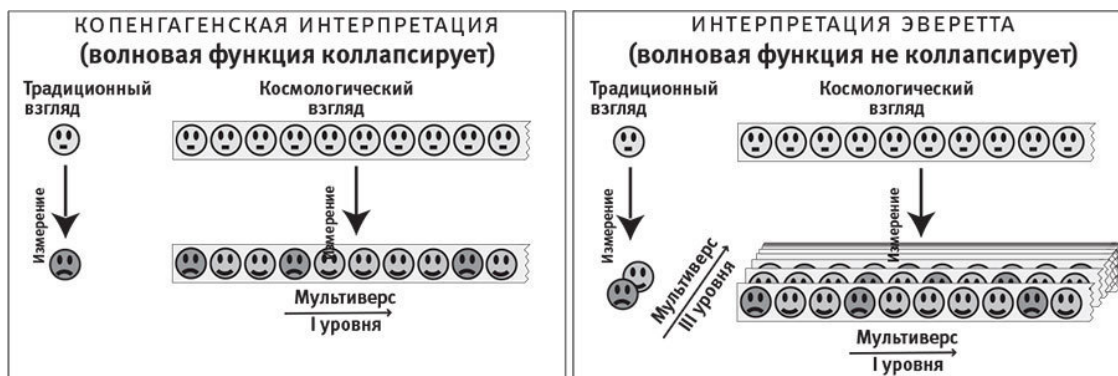


Рис. 8.11. Как объединяются мультиверсы I и III уровней? Каждый кружок – это планета, где вы ставите деньги на то, что квантовая карта упадет лицом вверх. Вначале вы в нейтральном настроении, а после измерения радуетесь выигрышу либо опечалены проигрышем. Карта чуть-чуть наклонена, так что вы ожидаете выиграть с вероятностью $2/3$. Эти планеты обычно очень удалены друг от друга, скажем, на гуголплекс метров в разных направлениях, однако я нарисовал их в ряд, чтобы проиллюстрировать идею.

Прежде всего, великая дискуссия о том, коллапсирует ли волновая функция, завершилась великим разочарованием: это попросту не имеет значения. На рис. 8.11 показано, что независимо от того, прав Эверетт или нет, вы будете счастливы на $2/3$ планет. На самом деле, обе стороны спора о коллапсе вышли из него изрядно помятыми. В копенгагенской интерпретации спорная концепция коллапса вводится, чтобы избавиться от досадных параллельных вселенных и добиться единственности исхода события, но, как видно из рисунка, это уже не помогает: даже при наличии коллапса получаются параллельные вселенные с обоими исходами. Для интерпретации Эверетта отличительным признаком служили параллельные вселенные III уровня (квантовые), но на рисунке видно, что их можно спокойно игнорировать, поскольку все они неразличимы. В этом смысле мультиверсы уровней I и III объединяются: если имеется бесконечное пространство с мультиверсом I уровня, то можно игнорировать связанные с ним параллельные вселенные III уровня, поскольку на практике все они представляют собой лишь идентичные копии. Не исключено, что III уровень можно объединить и со вторым, но пока мы не смогли это доказать.

Во-вторых, рис. 8.11 демонстрирует происхождение неравных вероятностей, перенося множественные миры Эверетта в наше старое доброе трехмерное пространство. Различные исходы случаются не только где-то в труднопредставимом математическом гильбертовом пространстве, но и где-то очень далеко в нашем собственном пространстве, которое мы исследуем с помощью телескопов. Суть в том, что после того, как карта упала, но до того момента, когда вы открыли глаза, у вас нет способа узнать, какой из множества копий самого себя вы являетесь, поскольку до этого последнего момента все они чувствуют себя субъективно неразличимыми. Поскольку вы знаете, что $2/3$ ваших копий, открывая глаза, видят карту лежащей лицом вверх, вам кажется, что вы случайным образом обнаружите ее в этом положении с вероятностью $2/3$. Это аналогично тому способу, каким представители фран-

цузской знати первоначально ввели понятие вероятности для оптимизации своей стратегии в азартных играх. Если в игре вам известно лишь то, что вы окажетесь в одной из множества равновероятных ситуаций (соответствующих, скажем, тому, как перетасована сдаваемая колода), то вы можете считать, что вероятность вашего выигрыша – это просто доля тех ситуаций, в которых вы выигрываете, среди всех возможных.

В-третьих, это позволяет нам предложить *космологическую интерпретацию квантовой механики*. В ней мы интерпретируем волновую функцию объекта не как описание некоего странного воображаемого ансамбля возможностей для данного объекта, а как реальную пространственную совокупность идентичных копий объекта, существующих в бесконечном пространстве. Более того, испытываемая вами квантовая неопределенность просто отражает вашу неспособность определить свое положение в мультиверсе I уровня, то есть узнать, какая из бесконечного числа ваших копий, разбросанных по космосу, обеспечивает ваше субъективное восприятие.

В некоторых областях соавторы статей по традиции перечисляют свои имена в алфавитном порядке. В космологии, однако, мы обычно делаем так, чтобы порядок авторов отражал величину их вклада в статью. В большинстве случаев очевидно, кто проделал наибольшую работу, но в данном случае определить это было трудно. К тому моменту, когда мы были готовы представить статью для публикации, и Энтони, и я очень серьезно потрудились и внесли практически равнозначный вклад. У нас состоялся забавный телефонный разговор на эту тему, в котором мы превозносили вклад друг друга и настаивали на том, чтобы поставить имя другого первым. В конце концов я предложил решение, которое понравилось нам обоим: пусть порядок авторов выберет квантовый генератор случайных чисел. В данной вселенной Энтони стал первым автором (<http://arxiv.org/pdf/1008.1066.pdf>), но если наша статья верна, то я первый автор не только в половине параллельных вселенных III уровня, где применялась данная процедура, но и в половине параллельных вселенных I уровня.

В 2010 году Александр Виленкин пригласил меня сделать доклад по этой статье в Университете им. Тафтса. В аудитории, как и 13 лет назад, сидел Алан Гут. Я вспомнил ключющего носом Алана и приготовился к неизбежному, поскольку не помнил ни одного выступления, на котором он не уснул бы. Однако случилось чудо, и Алан бодрствовал на протяжении всего доклада. Я вижу в этом наивысшее одобрение, которое наша статья могла получить, и кульминацию моей научной карьеры.

Много миров – или слов?

Так что же делать с квантовыми соображениями? Следует верить в коллапс волновой функции или в квантовые параллельные вселенные? Хотя квантовая механика безоговорочно является самой успешной физической теорией из всех, когда-либо построенных, полемика о том, как целостно вписать ее в картину физической реальности, длится уже век. За это время образовался настоящий зоопарк интерпретаций: ансамблевая, копенгагенская, инструментальная, гидродинамическая, сознательная, Бома, квантовая логика, многомировая интерпретация, стохастическая механика, многоразумная, интерпретация совместимых историй, объективный коллапс, транзакционная интерпретация, модальная, экзистенциальная, реляционная, Монтевидео и космологическая⁵⁵. Более того, сторонники различных интерпретаций часто расходятся относительно деталей. Нет даже консенсуса относительно того, что именно считать интерпретацией...

Можно подумать, что если эксперты продолжают спорить об этом на протяжении столетия после открытия квантовой механики, то они, вероятно, проспорят и следующее столе-

⁵⁵ Ссылки на все эти интерпретации можно найти в статье: <http://arxiv.org/abs/1008.1066>.

тие. Однако за это время контекст дискуссии существенно изменился. Перемены коснулись теории, космологии и технологии и вызвали социологические изменения, которые я нахожу весьма интересными.

Во-первых, из теоретических открытий Эверетта, Це и других стало понятно, что даже если отбросить спорный постулат о коллапсе волновой функции, сохранив лишь голый скелет квантовой механики (в которой всегда выполняется уравнение Шредингера), мы по-прежнему будем субъективно *ощущать*, будто волновая функция, подчиняясь всем законам вероятности, коллапсирует, когда мы производим наблюдения, и оставляет нас в счастливом неведении относительно любых квантовых параллельных вселенных.

Во-вторых, космологические открытия (гл. 5, 6) предполагают, что мы все равно оказываемся в параллельных вселенных, даже если Эверетт ошибался. Более того, эти параллельные вселенные I уровня сливаются с квантовыми.

В-третьих, поддержка той идеи, что квантовая гравитация неким образом приводит к коллапсу волновой функции, сама коллапсировала из-за прорыва в теории струн, известного как *AdS/CFT*-дуальность. Не так уж важно сейчас, что скрывается за этой аббревиатурой: найдено математическое преобразование, показывающее, что определенные квантовые теории поля с гравитацией могут быть реинтерпретированы как другие квантовые теории поля без гравитации. Очевидно, что гравитация не вызывает коллапса волновой функции, раз само ее присутствие – в значительной мере вопрос интерпретации.

В-четвертых, все более точные эксперименты исключили множество попыток поверхностного объяснения квантовых странностей. Например, нельзя ли заменить кажущуюся квантовую случайность некими неизвестными величинами, содержащимися внутри частиц (скрытыми переменными)? Ирландский физик Джон Белл показал, что в этом случае значения, которые можно измерить в определенных сложных экспериментах, непременно будут отличаться от стандартных квантовых предсказаний. Спустя много лет технологии наконец достигли уровня, позволившего осуществить эти эксперименты, и в результате возможность существования скрытых переменных была исключена.

Не может ли быть так, что существуют не открытые пока небольшие поправки к уравнению Шредингера, которые приводят к распаду квантовых суперпозиций для достаточно крупных объектов? В эпоху зарождения квантовой механики многие физики считали, что она действует лишь на атомных масштабах. Но теперь все изменилось. Простой эксперимент с двухщелевой интерференцией (рис. 7.7), который Фейнман назвал прародителем всех квантовых эффектов, был успешно повторен с объектами, превосходящими по размерам отдельные элементарные частицы: атомами, небольшими молекулами и даже с похожими на футбольный мяч молекулами фуллерена из 60 атомов углерода. Еще будучи студентом, я спрашивал одноклассника Кита Шваба, считает ли он возможным экспериментально продемонстрировать, как макроскопический объект находится в двух местах сразу. Забавно, что два десятилетия спустя он открыл собственную лабораторию в Калтехе, работающую именно над этим вопросом в применении к металлическим стержням, содержащим миллиарды атомов. На самом деле его коллега из Санта-Барбары Эндрю Клиленд уже осуществил это с металлическими пластинками, достаточно большими, чтобы увидеть их невооруженным глазом. Группа Антона Цайлингера в Вене даже начала обсуждать вопрос о том, чтобы проделать это с вирусом. Если представить, что этот вирус обладает примитивной формой сознания, то многомировая интерпретация, по-видимому, становится неизбежной: экстраполяция суперпозиции на других разумных существ, например на человека, тогда будет лишь вопросом количественных, но не качественных различий. Группа Цайлингера также продемонстрировала, что контринтуитивные квантовые свойства фотонов сохраняются, когда они проходят в пространстве 89 км – более чем макроскопическую дистанцию. Так что, я пола-

гаю, экспериментальный вердикт уже вынесен: мир *является* странным, и нам предстоит научиться жить с этим.

В последнее время отношение многих людей к квантовым причудам улучшилось по причинам отнюдь не философским, а финансовым: эти самые причуды открывают возможности для новых полезных технологий. Согласно недавним оценкам, более четверти валового национального продукта США основывается сейчас на изобретениях, возникших благодаря квантовой механике – от лазеров до компьютерных чипов. А новейшие технологии, такие как квантовая криптография и квантовые вычисления, явным образом используют мультиверс III уровня и работают, только если волновая функция не коллапсирует.

Эти прорывы в теории, космологии и технологии вызвали значительные изменения во взглядах. Когда я делаю доклады, мне хочется, чтобы люди в аудитории задумались. Вот что мне ответили слушатели на вопрос, какая интерпретация квантовой механики им наиболее близка, в 1997 году на квантово-механической конференции в Мэрилендском университете и в 2010 году, когда я делал доклад на физическом факультете в Гарварде.

Интерпретации	Мэриленд, 1997 г.	Гарвард, 2010 г.
Копенгагенская	13	0
Эверетта	8	16
Бома	4	0
Совместимых историй	4	2
Модифицированная динамика	1	1
Ни одна из перечисленных (не определился)	18	16
Всего голосов:	48	35

Хотя эти опросы неформальные, ненаучные и, очевидно, не отражают мнение репрезентативной выборки физиков, они тем не менее указывают на поразительный сдвиг: после десятилетий доминирования копенгагенской интерпретации ее поддержка упала ниже 30 % (1997) и до 0 % (!) в 2010 году. Напротив, предложенная в 1957 году и в течение десяти лет остававшаяся практически незамеченной эвереттовская многомировая интерпретация пережила 25 лет жесткой критики и периодического осмеяния, чтобы в 2010 году возглавить рейтинг. Важно также отметить наличие большой фракции неопределившихся. Это говорит о том, что квантово-механические дебаты еще в разгаре.

Конрад Лоренц говорил, что важные научные открытия проходят три фазы: сначала их игнорируют, потом свирепо атакуют и, наконец, от них отмахиваются как от общеизвестных. Судя по данным опросов, пройдя в 60-х годах первую фазу, параллельные вселенные Эверетта находятся сейчас между второй и третьей фазами.

На мой взгляд, этот сдвиг означает, что пришло время обновить учебники квантовой механики, чтобы в них упоминалась декогеренция (во многих ее до сих пор нет) и четко говорилось, что копенгагенскую интерпретацию правильно воспринимать как *копенгагенскую аппроксимацию*. Несмотря на то, что волновая функция, вероятно, не коллапсирует, очень удобно в качестве аппроксимации при выполнении расчетов полагать, что при наблюдении происходит ее коллапс.

Все физические теории состоят из двух частей: математических уравнений и слов, объясняющих, что они означают. Хотя выше я выдал сплошным потоком названия более десятка интерпретаций квантовой механики, многие из них различаются лишь «словесной» частью. Мне же наиболее интересны вопросы по математической части, в особенности такой: доста-

точно ли самой простой математической составляющей (одного уравнения Шредингера без исключений)? Пока нет ни единого экспериментального свидетельства обратного, однако многие интерпретации добавляют длинные «словесные» части, чтобы увести разговор от параллельных вселенных. И когда вы станете выбирать интерпретацию, это, по сути, будет сводиться к тому, что больше вас беспокоит: множество миров или множество слов. Когда пришло время писать статью для конференции, проходившей в 1997 году в Мэриленде, я, стремясь подразнить коллег, озаглавил ее так: «Интерпретация квантовой механики: много миров или много слов?» Я ожидал бурной полемики и гневных писем, но следует отдать должное коллегам: несмотря на мое мнение, что они ошибаются в отношении квантовой механики, у них оказалось хорошее чувство юмора...

В гл. 7 я рассказал о том, что все состоит из частиц и что частицы в некотором смысле являются чисто математическими объектами. В этой главе мы видели, что в квантовой механике есть нечто, возможно, даже более фундаментальное: волновая функция и бесконечномерная область, называемая гильбертовым пространством, в которой обитает волновая функция. Частицы могут возникать, исчезать и находиться в нескольких местах сразу. Напротив, есть, была и всегда будет лишь одна волновая функция – объект, который движется по гильбертову пространству так, как ему предписывает уравнение Шредингера. Но если фундаментальной физической реальности соответствует волновая функция, то что это? Из чего она состоит? Из чего состоит гильбертово пространство? Насколько нам известно, ни из чего: по-видимому, это чисто математические объекты! Так что когда мы ищем то, что лежит в основе физической реальности, мы вновь и вновь обнаруживаем признаки того, что ее фундамент чисто математический. Мы рассмотрим эту идею подробнее в гл. 10.

Резюме

- В математически простейшей квантовой теории существует нечто более фундаментальное, чем наше трехмерное пространство с частицами в нем, – волновая функция и бесконечномерное вместилище (гильбертово пространство), в котором она обитает.
- Согласно этой теории, частицы могут создаваться и уничтожаться, а также находиться в нескольких местах сразу, но есть, была и всегда будет лишь одна волновая функция, движущаяся по гильбертову пространству так, как предписывает ей уравнение Шредингера.
- Эта математически простейшая квантовая теория (в которой уравнение Шредингера всегда выполняется) предсказывает существование параллельных вселенных, в которых вы проживаете бесчисленные вариации своей жизни.
- Из нее также вытекает, что квантовая случайность – это иллюзия, вызванная квантовым клонированием вас самих.
- Нет ничего квантового в кажущейся случайности, которая возникает, даже если вы клонированы классическим образом.
- Эта математически простейшая теория также предсказывает эффект цензуры, называемый декогеренцией. Она скрывает от нас большинство таких причуд, порождая впечатление коллапса волновой функции.
- Декогеренция в нашем мозге происходит постоянно, что разрушает популярные предположения о «квантовом сознании».
- Квантовый мультиверс объединяется с пространственным мультиверсом из гл. 6, так что волновая функция системы описывает ее бесконечные копии, разбросанные по пространству, а квантовая неопределенность отражает наше незнание того, какую именно копию мы наблюдаем.
- Если мы живем в бесконечном однородном пространстве, как предполагается в стандартной космологической модели, то не имеет значения, коллапсирует ли в действительно-

сти волновая функция: все многочисленные эвереттовские миры неразличимы, и коллапс не препятствует тому, чтобы все квантовые исходы в действительности имели место.

- Этот квантовый мультиверс, возможно, делает вас субъективно бессмертным, а значит, в конце концов вы окажетесь самым старым существом на планете. Для этого может даже не потребоваться квантовая механика – достаточно мультиверса I уровня и бесконечного пространства. Однако я так не думаю, а почему, я объясню в гл. 11.

- Волновая функция и гильбертово пространство, которые составляют, по-видимому, самую фундаментальную физическую реальность, – чисто математические объекты.

Часть III. Шаг назад

Глава 9. Внутренняя, внешняя и консенсусная реальности

*По обычаю сладость, по обычаю горечь, по обычаю холод, цвет,
теплота, на самом же деле – атомы и пустота.
Демокрит, ок. 400 г. до н. э.⁵⁶*

Не-е-ет! Мой чемодан! Уже началась посадка на самолет из Бостона в Филадельфию, куда я летел помочь в съемках документального фильма Би-би-си о Хью Эверетте, и тут я обнаружил, что у меня пропал чемодан. Я побежал обратно к пункту досмотра.

– Нет ли у вас забытого черного чемодана на колесиках?

– Нет, – ответил охранник.

– Как же нет? Да вот же он, мой чемодан!

– Он не черный, – сказал охранник, – а сине-зеленый.

Прежде я не догадывался о степени своей цветовой слепоты, и было ужасно осознавать, как много допущений относительно реальности – например, о моем гардеробе – были ошибочны. Как вообще я могу доверять тому, что мои чувства сообщают о внешнем мире? И если я не могу доверять им, как можно надеяться получить хоть какие-нибудь надежные знания о внешней реальности? В конце концов, все, что я знаю о мире и своих ненадежных чувствах, я выяснил посредством этих самых чувств. Я оказываюсь на шатком эпистемологическом фундаменте, как заключенный, который всю жизнь провел в одиночной камере и все представления о внешнем мире почерпнул из рассказов своего стража. Или: как я могу доверять тому, что мое сознательное восприятие сообщает о мире, если я не понимаю, как устроено сознание?

До сих пор мы опирались на физический подход к исследованию внешней физической реальности, окидывая взглядом трансгалактический макрокосм и всматриваясь в субатомный микрокосм, где природа вещей раскрывается через их фундаментальные «строительные блоки», например элементарные частицы. Однако все, о чем у нас есть непосредственное знание, – это *квалиа*, фундаментальные «строительные блоки» нашего сознательного восприятия, такие как краснота розы, звук литавр, запах бифштекса, вкус мандарина, боль от укола. Так не следует ли нам изучить сознание, прежде чем мы сможем полностью понять физику?⁵⁷ Я долгое время отвечал «да», полагая, что мы ни за что не отыщем неуловимую «теорию всего» для внешней физической реальности, пока не поймем, как устроен искажающий ментальный «объектив», сквозь который мы ее воспринимаем. Но мое мнение изменилось, и в этой короткой главе-интерлюдии я хочу рассказать, почему.

Внешняя и внутренняя реальности

Возможно, вы подумали: «О’кей, Макс, но ведь я не дальтоник. И я прямо сейчас собственными глазами смотрю на внешнюю реальность, и это паранойя какая-то – думать, будто она не такая, какой кажется». Но сделайте следующее.

⁵⁶ Цит. по: *Новая философская энциклопедия*. В 4-х тт. Т. 1. М.: Мысль, 2010. С. 622. – Прим. пер.

⁵⁷ См. книги о сознании, перечисленные в разделе «Рекомендованная литература».

Эксперимент № 1. Покрутите головой влево и вправо.

Эксперимент № 2. Подвигайте глазами влево и вправо, не двигая при этом головой.

Заметили в первый раз ощущение, будто внешняя реальность поворачивается? А во второй – что она остается неподвижной, несмотря на то, что глазные яблоки в обоих случаях поворачивались? Ваш мысленный взгляд видит не внешнюю реальность, а модель реальности, содержащуюся в мозге! Глядя на изображение, записанное вращающейся видеокамерой, вы сразу понимаете, что она движется, как в эксперименте № 1. Но ваши глаза сродни видеокамерам, и эксперимент № 2 демонстрирует, что ваше сознание не воспринимает формируемые на сетчатке изображения непосредственно. Как хорошо знают нейрофизиологи, информация, полученная сетчаткой, подвергается чрезвычайно сложной обработке и служит для постоянного обновления детализированной модели внешнего мира, которая поддерживается в мозге. Оглянитесь еще раз, и вы заметите, что благодаря этой сложной системе обработки информации ваша модель реальности является трехмерной, хотя первичные изображения на сетчатке двумерные.

У меня нет выключателя возле кровати, так что часто я оглядываю спальню и препятствия по полу, а затем выключаю свет и в темноте иду к постели. Попробуйте сами: отложите книгу, встаньте, осмотритесь, а затем сделайте несколько шагов с закрытыми глазами. Вы ведь можете «видеть» или «ощущать», как предметы меняют свое положение относительно вас? Это обновляется ваша модель реальности, на этот раз с использованием информации о движении ваших ног. Мозг постоянно обновляет модель реальности, используя любую информацию, которую может получить, включая звук, тактильные ощущения, запах и вкус.

Назовем эту модель *внутренней реальностью*: это способ, которым вы субъективно воспринимаете внешнюю реальность. Эта реальность внутренняя также и по ощущению, что она существует лишь внутри вас. Сознание будто смотрит на окружающий мир, тогда как в действительности оно смотрит только на модель реальности в вашей голове, которая, в свою очередь, непрерывно следит за тем, что происходит вне мозга, посредством сложных процессов, которые протекают бессознательно.

Чрезвычайно важно не смешивать внутреннюю реальность и внешнюю реальность. Внутренняя реальность моего мозга подобна приборной панели в моей машине: это удобная сводка самой полезной информации. Точно так же, как приборная панель сообщает мне о скорости, уровне топлива, температуре двигателя и других важных вещах, которые должен учитывать водитель, приборная доска (модель реальности) моего мозга сообщает о скорости и положении тела, уровне голода, температуре воздуха, выделяет находящиеся вокруг предметы и другие важные обстоятельства, которые должен учитывать оператор человеческого тела.

Правда, вся правда и ничего, кроме правды

Однажды мне пришлось обратиться в автосервис по поводу того, что на приборной панели зажегся индикатор «Проверьте двигатель», хотя он был в порядке. Подобным образом, есть много причин, по которым модель реальности человека может испортиться и начать отличаться от истинной внешней реальности, вызывая иллюзии (неправильное восприятие вещей, которые существуют во внешней реальности), упущения (невосприятие вещей, которые во внешней реальности существуют), галлюцинации (восприятие вещей, которых во внешней реальности нет). Если мы клянемся под присягой говорить правду, всю правду и ничего, кроме правды, то надо иметь в виду, что наше восприятие может нарушать все три этих обязательства из-за иллюзий, упущений и галлюцинаций.

Так что, говоря метафорически, в ситуации с индикатором «Проверьте двигатель» мой автомобиль галлюцинировал или испытывал фантомную боль. Недавно я обнаружил, что мой автомобиль также страдает от иллюзий: судя по показаниям спидометра, он всегда считает, что едет на 3 км/ч быстрее, чем на самом деле. Это не так уж плохо в сравнении с огромным списком открытых исследователями-когнитивистами человеческих иллюзий, которые затрагивают все наши чувства и искажают внутреннюю реальность. На рис. 9.1 показано два примера оптических иллюзий, в которых наша зрительная система создает внутреннюю реальность, отличную от внешней. Если бы у вас была цветная, а не черно-белая версия этого рисунка, вы увидели бы, что нижнее пятно на левой картинке кажется оранжевым, а верхнее – коричневатым. Во внешней реальности свет от обоих обладает одинаковыми свойствами и имеет длину волны около 600 нм. Если пятно испускает такой свет, оно должно казаться оранжевым. Почему оно выглядит коричневым? Вы когда-нибудь видели, чтобы лазерная указка давала коричневый луч? Нет, никогда, поскольку коричневого света не бывает! Коричневого цвета во внешней реальности не существует – это лишь то, что мы воспринимаем, когда видим приглушенный оранжевый свет на более темном фоне.

Ради развлечения я иногда сравниваю, как одни и те же новости преподносятся на сайтах *MSNBC*, «Фокс ньюс», Би-би-си, «Аль-Джазира», «Правда» и других. Оказывается, что когда дело доходит до «правды, всей правды и ничего, кроме правды», чаще всего именно второе условие отвечает за большинство различий в отражении реальности – то, что они опускают. Я думаю, то же верно и в отношении наших собственных чувств. Хотя они могут порождать галлюцинации и иллюзии, но именно с тем, что они опускают, связана большая часть расхождений внутренней и внешней реальности. Моя зрительная система упускала разницу между черным и сине-зеленым чемоданом, но даже если вы не дальтоник, то все равно упускаете большую долю информации, которую несет свет. В начальной школе меня учили, что все цвета света можно получить, смешивая три основных цвета – красный, зеленый и синий, – я думал, что это число три говорит нам нечто важное о внешней реальности. Но я ошибался: оно говорит нам лишь об упущениях зрительной системы. А именно о том, что наша сетчатка имеет три типа клеток-колбочек, которые принимают тысячи чисел, характеризующих спектр света (рис. 2.5), но сохраняют лишь три числа, соответствующих средней интенсивности света в трех диапазонах спектра.

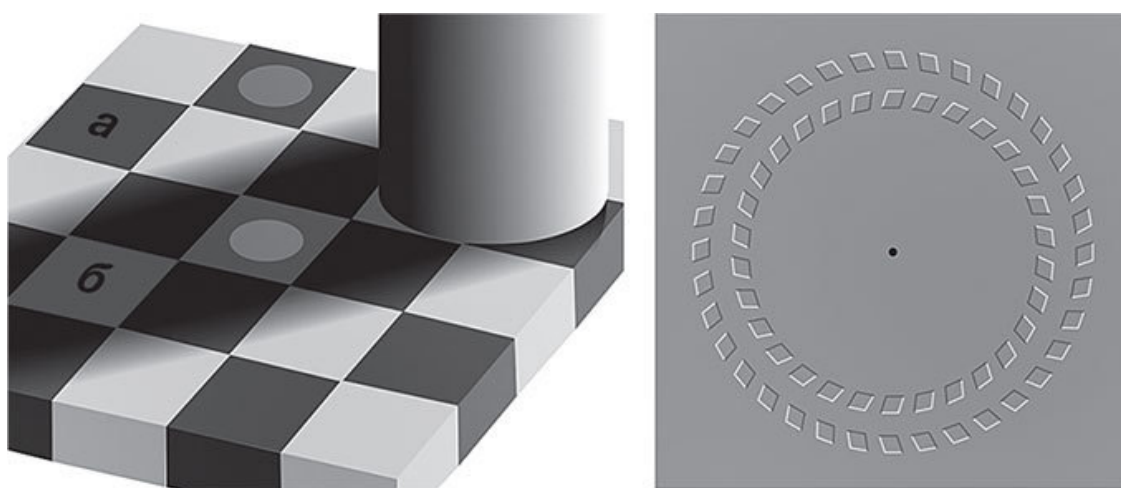


Рис. 9.1. Оптические иллюзии. В левой части квадраты *a* и *б* имеют одинаковый оттенок серого, а два круглых пятна – одинаковый цвет. В правой части сконцентрируйтесь на черной точке и подвигайте головой вперед-назад – вы увидите, что окружности поворачиваются.

Более того, свет с длиной волны за пределами узкого диапазона 400–700 нм вовсе не регистрируется нашей зрительной системой, и было настоящим шоком, когда искусственные детекторы обнаружили, что наша внешняя реальность гораздо богаче, чем мы себе представляли, и включает радиоволны, микроволны, рентгеновские и гамма-лучи. Зрение не единственное чувство, которое повинно в таких упущениях: мы не способны слышать ультразвуковой писк летучих мышей и дельфинов; мы нечувствительны к едва заметным запахам, которые доминируют во внутренней реальности собак, и т. д. Хотя животные некоторых видов воспринимают больше визуальной, слуховой, обонятельной, вкусовой и другой сенсорной информации, чем люди, они не знают о субатомном царстве, об усеянном галактиками космосе и о темной энергии с темной материей, из которых состоит 96 % внешней реальности (гл. 4).

Консенсусная реальность

В двух первых частях книги мы видели, что наш физический мир замечательно описывается математическими уравнениями, поддерживая в нас надежду, что однажды будут найдены уравнения «теории всего», идеально описывающей нашу внешнюю реальность во всех масштабах. Окончательным триумфом физики стала бы возможность начать с рассмотрения внешней реальности «сверху вниз» («с высоты птичьего полета»), то есть в форме математического изучения уравнений (которые в идеале достаточно просты, чтобы уместиться на футболке), и вывести из них внутреннюю реальность, способ субъективного восприятия «снизу вверх» («с лягушачьей точки зрения»), то есть с позиции внутри внешней реальности. Чтобы добиться этого, нам необходимо полное понимание того, что такое сознание (а также иллюзии, упущения, галлюцинации и другие осложнения).

Однако между внешней и внутренней реальностями есть третья, промежуточная, *консенсусная реальность* (рис. 9.2). Это версия реальности, относительно которой согласны все мы, живые существа на Земле. Она включает трехмерные положения и движения макроскопических объектов, другие обыденные свойства мира, для которых у нас есть *общее описание* в знакомых нам понятиях классической физики. В табл. 9.1 дана сводка всех описаний реальности и точек зрения, а также их взаимосвязей.



Рис. 9.2. Реальность можно рассматривать тремя взаимосвязанными способами: глядя «с высоты птичьего полета», то есть в форме математического изучения описывающих ее уравнений, глядя с субъективной («лягушачьей») точки зрения самосознающего наблюдателя, находящегося внутри нее, и глядя с промежуточной консенсусной позиции, с кото-

рой мы обычно описываем реальность друг другу (как классические объекты, движущиеся в трехмерном пространстве, например). Поиски исчерпывающего понимания реальности удобно разбить на две части, которыми можно заниматься по отдельности: физика выясняет, как внешняя реальность связана с консенсусной реальностью (включая такие осложнения, как клонирование наблюдателя, проявляющееся как случайность, и быстрое движение, проявляющиеся в замедлении времени), а когнитивистика выясняет, как консенсусная реальность связана с внутренней реальностью (включая квалиа и такие осложнения, как иллюзии, упущения и галлюцинации).

Каждый имеет персональную внутреннюю реальность, воспринимаемую в субъективной перспективе собственной точки зрения, ориентации и состояния сознания и искаженную личными когнитивными особенностями: в вашей внутренней реальности сны – это подлинные события, а мир переворачивается вверх ногами, когда вы встаете на голову. Напротив, консенсусная реальность – общая. Когда вы объясняете другу, как к вам идти, то прикладываете все силы к тому, чтобы превратить свое описание из такого, в каком используются понятия вашей внутренней реальности (например, «здесь» или «в направлении, куда я смотрю»), в общие для всех понятия консенсусной реальности (например, «дом 70 по улице Вассара» или «север»). Поскольку ученым надо быть точными и стремиться к количественному выражению, то, ссылаясь на нашу общую, консенсусную реальность, мы прикладываем исключительные усилия к тому, чтобы быть объективными: мы говорим, что свет имеет «длину волны 600 нм» вместо «оранжевого цвета» или что вещество содержит «молекулы $\text{CH}_3\text{COOC}_5\text{H}_{11}$ » вместо «банановый ароматизатор». Консенсусная реальность не свободна от некоторых общих иллюзий относительно внешней реальности, о чем мы подробно поговорим. Например, коты, летучие мыши и роботы также подвержены квантовой случайности и релятивистскому растяжению времени. Однако консенсусная реальность по определению избавлена от иллюзий, уникальных для биологического сознания, а значит, не зависит от особенностей функционирования человеческого сознания. Моя внутренняя реальность может испытывать недостаток восприятия сине-зеленого цвета. Она может быть черно-белой у тюленя и радужной у птицы, различающей четыре основных цвета, она может быть совсем иной у видящей поляризацию света пчелы, и у использующей сонар летучей мыши, и у слепого человека с более развитым осязанием и слухом, и у новейшего робота-пылесоса. Однако все мы придем к согласию по вопросу о том, открыта ли дверь.

Вот почему я изменил свою точку зрения: хотя чрезвычайно интересно уяснить природу человеческого сознания, этого не требуется для фундаментальной физической теории, которая нуждается *лишь* в том, чтобы вывести из уравнений консенсусную реальность. Иными словами, то, что Дуглас Адамс называл *главным вопросом жизни, Вселенной и всего такого*, распадается на две части, которые можно рассматривать отдельно. Задачей физики предстает выведение консенсусной реальности из внешней реальности, а задачей когнитивистики – выведение внутренней реальности из консенсусной реальности. Это два великих вызова для третьего тысячелетия. Оба они по-своему пугающие, и я рад, что мне не надо иметь с ними дело одновременно.

Табл. 9.1. Ключевые термины, которые будут использоваться в дальнейшем.

Шпаргалка по реальности	
Внешняя реальность	Физический мир, который, как я считаю, будет существовать, даже если людей не станет.
Консенсусная реальность	Общее описание физического мира, с которым согласны самосознающие наблюдатели.
Внутренняя реальность	То, как вы субъективно воспринимаете внешнюю реальность.
Модель реальности	Модель внешней реальности у вас в голове. Внутренняя реальность, которую вы воспринимаете.
“Птичья” точка зрения	Взгляд на внешнюю реальность, который вы принимаете, когда изучаете описывающие ее абстрактные математические уравнения.
“Лягушачья” точка зрения	Субъективный взгляд на физический мир (ваша внутренняя реальность).

Физика: связь внешней реальности с консенсусной

Консенсусная реальность сильно отличается от внутренней, и понимание связи между ними есть задача, соответствующая по сложности проникновению в природу сознания. Консенсусная реальность сильно отличается и от внешней реальности, и поэтому принципиально важно не путать их. На мой взгляд, история современной физики показывает, что в нескольких научных прорывах наибольшую сложность представляли не математические выкладки, а понимание того, как взаимосвязаны эти две реальности.

В 1905 году, когда Эйнштейн сформулировал специальную теорию относительности, многие из ее ключевых уравнений уже были получены Хендриком Лоренцем и другими учеными. Однако чтобы увидеть связь математики с измерениями, потребовался гений Эйнштейна. Он понял, что длины и интервалы времени, появляющиеся в математическом описании внешней реальности, отличаются от тех, которые измеряются в консенсусной реальности, и что эти различия зависят от движения. Так, если самолет пролетает над группой людей, то в их консенсусной реальности он будет короче, чем до взлета, а его бортовой хронометр будет идти медленнее⁵⁸.

Десять лет спустя, когда Эйнштейн выдвинул общую теорию относительности, Бернхард Риман и другие ученые уже разработали ключевые элементы соответствующего математического формализма. Однако увенчать работу главным результатом вновь оказалось столь трудно, что потребовалось эйнштейновское озарение – понимание того, что искривленному пространству в математическом описании внешней реальности в консенсусной реальности соответствует гравитация. Чтобы оценить, насколько это было трудно, представьте, что Исааку Ньютону на смертном одре явился джинн и предложил исполнить последнее желание. Ньютон решил:

– Пожалуйста, скажи мне, какими будут уравнения гравитации через триста лет.

Джинн записывает полную систему уравнений общей теории относительности и, будучи добрым джинном, объясняет, как выразить их в математических обозначениях того

⁵⁸ Эйнштейн понял, что пока наблюдатели характеризуются одинаковым положением и движением, у них будет общая консенсусная реальность, а две группы, движущиеся друг относительно друга, будут иметь разные консенсусные реальности. Иными словами, может быть много консенсусных реальностей, но их различия объясняются физическими эффектами, которые не имеют ничего общего с сознанием или внутренним строением наблюдателей.

времени. Будет ли очевидно Ньютону, как интерпретировать это обобщение его собственной теории?

Трудность связывания внешней реальности с консенсусной взяла новый рекорд высоты с открытием квантовой механики. Это выразилось в продолжающихся по сей день спорах между физиками о том, как интерпретировать эту теорию, хотя прошло уже почти 100 лет. Внешняя реальность описывается гильбертовым пространством (гл. 8), в котором волновая функция меняется со временем детерминистическим образом, тогда как в консенсусной реальности события кажутся случайными, с распределением вероятности, которое можно с высокой точностью вычислить по волновой функции. Прошло более 30 лет после рождения квантовой механики, прежде чем Эверетт показал, как эти две реальности могут быть согласованы, и еще 10 лет мир ждал открытия декогеренции, ключевого явления для примирения существования макросуперпозиций во внешней реальности с их отсутствием в консенсусной.

Сейчас главным вызовом для теоретической физики является объединение квантовой механики с гравитацией. Основываясь на приведенной последовательности исторических примеров, я предсказываю, что корректная математическая теория квантовой гравитации побьет все прежние рекорды по сложности ее интерпретации. Допустим, накануне следующей конференции по квантовой гравитации наш джинн залетит в лекционный зал и запишет на доске уравнения окончательной теории. Сможет ли кто-либо из участников понять то, что будет стерто следующим утром? Я сомневаюсь.

Итак, направление наших поисков понимания реальности разделяется на два, которыми можно заниматься по отдельности: великим вызовом для когнитивистики является понимание связи консенсусной реальности с нашей внутренней реальностью, а великим вызовом для физики является понимание связи нашей консенсусной реальности с внешней реальностью. Обе задачи обескураживают своей трудностью. В консенсусной реальности камень кажется непроницаемым, твердым и неподвижным объектом, однако за исключением квадриллионной части своего объема камень является пустым пространством между частицами, испытывающими постоянные вибрации. Наша консенсусная реальность кажется трехмерной сценой, на которой во времени разворачиваются события, но эйнштейновская работа (гл. 11) говорит о том, что изменение – это иллюзия, время – не более чем четвертое измерение неизменного пространства-времени (которое никогда не создавалось, никогда не уничтожается и содержит всю космическую историю, как дивиди содержит фильм). Квантовый мир кажется случайным, но работа Эверетта говорит о том, что случайность также является иллюзией, просто способом, каким наше сознание отмечает, когда оно клонируется в расходящихся параллельных вселенных. Мир квантовой гравитации ощущается... – ну, здесь физикам остается еще мно-о-ого работы.

Далее мы сконцентрируемся на поисках в области физики и доведем их до логического предела: на что, с учетом известного о консенсусной реальности, может быть похожа внешняя реальность? Какова ее истинная природа?

Резюме

- Хотя существует лишь одна истинная реальность, есть несколько дополнительных точек зрения на нее.
- Во внутренней реальности нашего сознания единственная информация, которую мы имеем о внешней реальности – это небольшая выборка, доставляемая органами чувств.
- Эта информация подвергается сильным искажениям и, судя по всему, говорит о работе органов чувств и мозга ничуть не меньше, чем о внешней реальности.

- Математическое описание внешней реальности, открытое теоретической физикой, сильно отличается от того, как мы воспринимаем внешнюю реальность.
- На пути между внутренней и внешней реальностями лежит «консенсусная реальность» – общее описание физического мира, с которым согласны все самосознающие наблюдатели.
- «Главный вопрос жизни, Вселенной и всего такого» распадается на две части, исследуемые по отдельности. Задачей физических наук является вывод консенсусной реальности из внешней, а задачей когнитивистики – вывод внутренней реальности из консенсусной.
- Оставшаяся часть книги посвящена первой из этих двух задач.

Глава 10. Физическая и математическая реальности

Философия написана в той величественной Книге (я имею в виду Вселенную), которая всегда открыта нашему взору, но читать ее может лишь тот, кто сначала освоит язык и научится понимать знаки, которыми она начертана. Написана же она на языке математики, и знаки ее – треугольники, окружности и другие геометрические фигуры, без которых нельзя понять ни единого из стоящих в ней слов и остается лишь блуждать в темном лабиринте.

Галилео Галилей

«Пробирных дел мастер» (1623)⁵⁹

Невероятная эффективность математики в естественных науках есть нечто граничащее с мистикой, ибо никакого рационального объяснения этому факту нет.

Юджин Вигнер

(1960)⁶⁰

Заканчивая пятничным утром в Принстоне разбирать электронные сообщения по поводу сочинения книги, ремонта микроволновки и полемики вокруг квантового суицида, я неожиданно нашел в почтовом ящике настоящую жемчужину – письмо от одного из именитых профессоров, своего знакомого.

Дата: 4 декабря 1998, 07:17:42 EST

Тема: Письмо, которое было непросто написать

Уважаемый Макс!

...Ваши безумные статьи не идут вам на пользу. Прежде всего, подавая их в хорошие журналы и имея несчастье добиться их публикации, вы губите их «забавную» сторону... Я редактор ведущего журнала... и ваша статья никогда бы у меня не прошла. Это, пожалуй, не так уж важно, за исключением того, что коллеги считают эти ваши личные особенности дурным знаком в плане перспектив... Вы должны понять, что если полностью не отделите эту деятельность от своих серьезных исследований, возможно, вовсе ее прекратив, и не перенесете ее в паб или другое подобное место, то можете поставить под угрозу свое будущее.

Меня словно окатили ледяной водой, но это был один из тех замечательных моментов, когда я понял, что поставил новый личный рекорд, и у меня появилась новая высота, которую надо попробовать взять. Когда я переслал письмо отцу, он ответил цитатой из Данте: *segui il tuo corso et lascia dir le genti*, то есть: «Следуй своей дорогой, и пусть люди говорят, что угодно».

Меня всегда забавляет, насколько сильно у физиков стадное чувство, притом что все мы на словах привержены нешаблонному мышлению и готовы отвергать авторитеты. Я заметил это еще студентом: например, революционная эйнштейновская теория относительности не заслужила Нобелевской премии⁶¹, сам Эйнштейн отвергал фридмановское открытие расши-

⁵⁹ Пер. Ю. А. Данилова. – Прим. пер.

⁶⁰ Пер. В. А. Белокоя и В. А. Угарова. – Прим. пер.

⁶¹ На сайте nobelprize.org можно прочитать, что Нобелевская премия по физике в 1922 году была присуждена Альберту Эйнштейну «за его работы в области теоретической физики, в особенности за открытие закона фотоэлектрического

рения Вселенной, а Хью Эверетт не смог получить постоянную работу в области физики. Иначе говоря, отвергались куда более важные открытия, чем те, которые я, реалистично глядя на вещи, могу надеяться совершить. Так что еще в студенчестве я столкнулся с дилеммой: я полюбил физику именно за то, что был очарован ее величайшими вопросами, но, похоже, что если я буду просто следовать зову сердца, то следующим местом моей работы станет «Макдоналдс».

Я не хотел выбирать между любовью и карьерой, так что разработал секретную стратегию, которая действует на удивление хорошо, позволяя мне заодно зарабатывать на пропитание. Я называю ее «стратегией доктора Джекила и мистера Хайда». Джордано Бруно в 1600 году заживо сожгли за нетрадиционные взгляды (в числе которых убежденность в бесконечности космоса), а Галилея приговорили к пожизненному домашнему аресту за то, что он доказывал обращение Земли вокруг Солнца. Современные санкции стали мягче. Если вы интересуетесь масштабными, философского характера вопросами, большинство физиков будет относиться к вам так же, как если бы вы увлекались компьютерными играми: чем заниматься после работы – ваше личное дело и ваше хобби не будут ставить вам в упрек, если оно не отвлекает от дел и если вы не говорите о нем слишком много на работе. Так что, когда авторитетные фигуры спрашивают, чем я занимаюсь, я превращаюсь в респектабельного доктора Джекила и говорю, что работаю над мейнстримными вопросами космологии (вроде разобранных в гл. 4), включая многочисленные измерения, цифры и т. д. Но когда никто не смотрит, я превращаюсь в злого мистера Хайда и делаю то, что действительно хочу делать: ищу истинную природу реальности (гл. 6, 8 и большинство оставшихся глав этой книги). Чтобы не вызывать беспокойства, я написал у себя на сайте, что у меня есть «побочные интересы», и пошутил, что на каждые десять мейнстримных статей позволяю себе написать одну вздорную. Это было очень удобно, поскольку подсчетами никто, кроме меня, не занимался. Ко времени своей защиты в Беркли я напечатал восемь статей, но половину их написал мистер Хайд, так что в диссертации я их не упоминал. Мне очень нравился мой научный руководитель в Беркли Джо Силк, но я следил, чтобы он оказывался подальше от принтера, когда я печатал статьи мистера Хайда. Я показал их ему лишь после того, как он подписал мою диссертацию...⁶² Я продолжаю придерживаться этой стратегии: всякий раз, когда я ищу работу или обращаюсь за исследовательским грантом, я упоминаю лишь о работе доктора Джекила, а параллельно продолжаю исследовать «большие вопросы», которые поддерживают во мне огонь – в хорошем, а не в бруновском смысле.

Эта стратегия превзошла самые смелые мои ожидания, и я весьма благодарен судьбе за возможность работать в университете с замечательными коллегами и студентами, не переставая думать о том, что меня сильнее всего интересует. Но теперь я считаю, что я в долгу перед научным сообществом и пришло время платить по обязательствам. Если представить, что все исследовательские темы выстроены перед вами в шеренгу в метафорическом пространстве, то есть некая граница, отделяющая то, что является мейнстримной физикой, от того, что в нее не входит. У этой границы удивительное свойство: она постоянно смещается

эффекта». Однако мой шведский коллега из Нобелевского комитета однажды показал мне не столь широко известную полную версию текста. Я выделил курсивом оговорку, вероятно, каких-то старых ворчунов: «Шведская королевская академия наук на заседании 9 ноября 1922 года, действуя согласно воле Альфреда Нобеля, выраженной 27 ноября 1895 года, решила *независимо от значения, которое после возможного подтверждения будет приписано теории относительности и гравитации*, присудить премию за 1921 год человеку, который сделал наиболее значительное открытие или изобретение в области физики, а именно Альберту Эйнштейну, за его вклад в теоретическую физику, в особенности за открытие фотоэлектрического эффекта».

⁶² Я также стратегически распределяю во времени статьи мистера Хайда. Подобно тому, как политики любят сообщать непопулярные новости во второй половине пятницы, чтобы дать людям время позабыть о них до следующего недельного цикла, я писал эти опасные статьи в течение лета 1996 года, сразу после того, как стал постдоком в Принстоне, чтобы у людей было как можно больше времени забыть о них к моменту, когда я снова буду искать работу.

(рис. 10.1)! На некоторых участках она сжимается, оставляя теории от алхимии до астрологии за пределами мейнстрима. В других – расширяется, и идеи вроде теории относительности или микробной природы заболеваний переходят из области спекуляций меньшинства в общепризнанную науку. Я давно уверен, что есть области, в которых физики могут сделать ценный вклад, несмотря на то, что эти темы сначала кажутся чересчур философскими. Мой нынешний контракт достаточно продолжителен, чтобы у меня не было оснований от них отстраняться: я считаю, что сейчас мой моральный долг перед более молодыми учеными вывести мистера Хайда из академического чулана и внести свой вклад в изменение этих границ. Вот почему мы с Энтони Агирре основали Институт фундаментальных вопросов, о котором я упоминал в гл. 8 (<http://fqxi.org>). И поэтому я пишу эту книгу.



Рис. 10.1. Граница того, что считается мейнстримом, постоянно меняется.

Так какая же из моих статей вызвала столь острую реакцию: остановитесь – или сломаете карьеру? Чему столь далекому от нынешней границы мейнстрима (рис. 10.1) была она посвящена, что этот профессор почувствовал необходимость вернуть меня в лоно науки? Она была о том, что наш физический мир – это гигантский математический объект. И в этой главе мы начнем его изучать.

Математика, везде математика

Каков же ответ на главный вопрос жизни, Вселенной и всего такого? В книге «Авто-стопом по Галактике» Дугласа Адамса выясняется, что ответ на этот вопрос – 42, однако самой сложной частью задачи оказалось отыскание самого вопроса. В действительности, хотя наши любознательные предки задавались глобальными вопросами, их поиски «теории всего» менялись вместе с ростом знаний. По мере того как древние греки заменяли мифо-

логические объяснения механическими моделями Солнечной системы, их акценты в этих вопросах смещались с *почему* на *как*.

С тех пор сфера наших вопросов сократилась в одних областях и разрослась в других (рис. 10.1). Некоторые вопросы отброшены как наивные или ошибочные, вроде объяснения размеров планетных орбит исходя из первичных принципов (это было популярно в эпоху Возрождения). То же самое может случиться с модными нынче попытками предсказания количества темной энергии в космосе, если окажется, что ее плотность в наших окрестностях является исторической случайностью (гл. 6). Тем не менее наша способность отвечать на другие вопросы превзошла самые смелые ожидания прежних поколений. Ньютон был бы поражен, узнав, что мы сумели определить возраст Вселенной с точностью до 1 % и узнали устройство микромира в достаточной мере, чтобы сконструировать «Айфон».

Я считаю шутку Дугласа Адамса про 42 очень удачной, поскольку математика играет исключительную роль во всех этих успехах⁶³. Та идея, что Вселенная в некотором смысле является математической, восходит по меньшей мере к пифагорейцам и породила многовековую дискуссию физиков и философов. Галилей утверждал, что Вселенная – это «величественная книга», написанная на языке математики. Лауреат Нобелевской премии по физике Юджин Вигнер в 60-х годах XX века настаивал, что «невероятная эффективность математики в естественных науках» нуждается в объяснении.

Фигуры, паттерны и уравнения

Мы переходим к рассмотрению по-настоящему радикального объяснения. Однако прежде необходимо уточнить, что именно мы пытаемся объяснить. Пожалуйста, оторвитесь на несколько секунд от чтения и оглядитесь. Где вся эта математика, которой мы собираемся заниматься? Разве математика – это не наука о числах? Вероятно, вам на глаза попадет несколько чисел, например пагинация в этой книге, но это лишь символы, изобретенные и изображенные людьми, так что вряд ли они отражают математическую сущность Вселенной в каком-либо глубоком смысле.

Из-за нашей системы образования многие приравнивают математику к арифметике. Но математика, как и физика, пришла к постановке более глубоких вопросов. Например, в приведенной выше цитате Галилей говорит о геометрических фигурах вроде окружностей и треугольников как о математических. Видите ли вы вокруг себя геометрические узоры или фигуры? (Дизайн вроде прямоугольной формы книги не в счет.) Но попробуйте бросить камешек и посмотрите, какую красивую форму придает природа его траектории! Галилей сделал замечательное открытие (рис. 10.2): траектория любых предметов имеет *одинаковую* форму, называемую перевернутой *параболой*. Более того, форму этой параболы можно описать простым уравнением: $x = y^2$, где x – горизонтальное положение, y – вертикальное положение (высота). В зависимости от начальной скорости и направления эта форма может растягиваться и по вертикали, и по горизонтали, однако она всегда остается параболой.

Когда мы наблюдаем, как объекты движутся по орбитам в космосе, мы открываем другую повторяющуюся форму, показанную на рис. 10.3 – *эллипс*. Уравнение $x^2 + y^2 = 1$ описывает точки, лежащие на окружности, а эллипс – это просто растянутая окружность. В зависимости от начальной скорости, направления движущегося по орбите объекта и массы, вокруг которой он движется, форма этой орбиты может оказываться растянутой или наклоненной,

⁶³ Я переключился с коллекционирования марок на собирание хороших вопросов, ответом на которые служит число 42. Вот мои любимые на сегодня: 1. На какой широте была написана эта книга? 2. Каков радиус радуги в градусах? 3. Какой наибольший процент окружающего газа может проглотить черная дыра? «Кормление» черной дыры оказывается очень похожим на кормление младенца: большая часть вещества улетает прочь с огромной скоростью. Черные дыры способны проглотить не более $1 - \sqrt{3}^{-1} \approx 42\%$ окружающего их газа.

однако всегда остается эллипсом. Более того, оконечность сильно вытянутого эллипса почти точно совпадает с параболой, так что все эти траектории – просто части эллипсов⁶⁴.

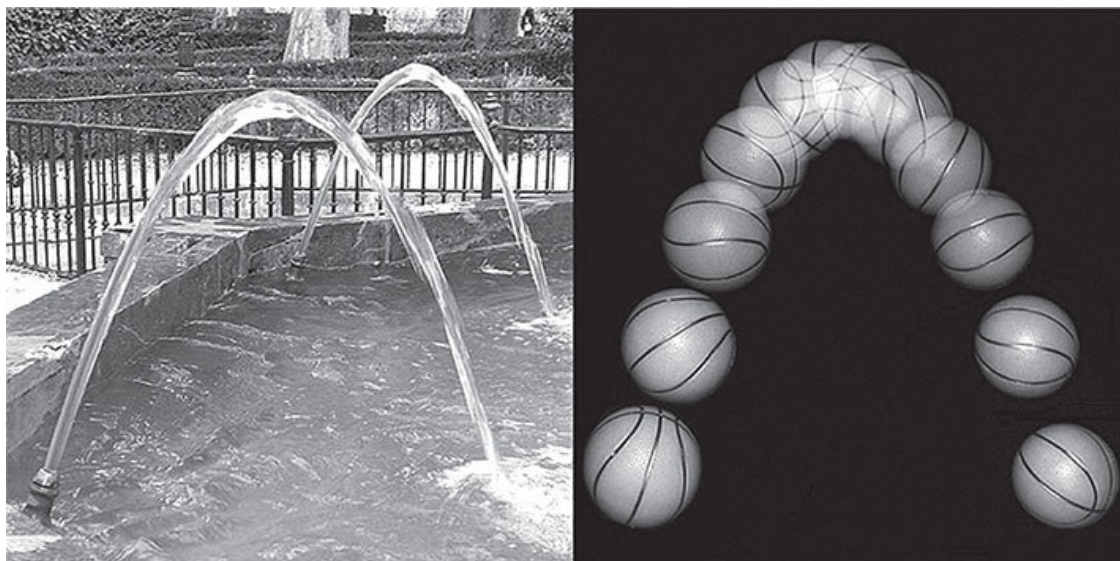


Рис. 10.2. Когда вы что-нибудь подбрасываете, траектория полета предмета всегда имеет форму перевернутой параболы, если только он с чем-нибудь не столкнется в полете и если можно пренебречь сопротивлением воздуха.

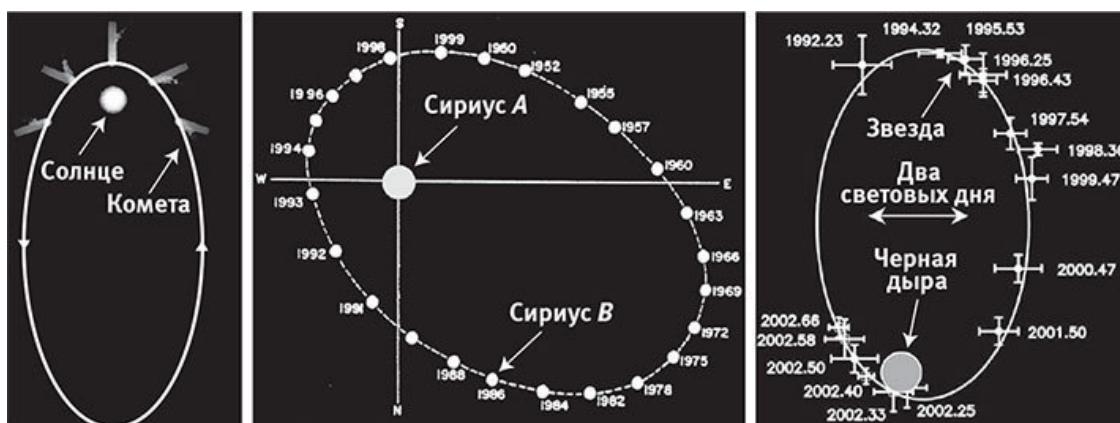


Рис. 10.3. Когда один объект обращается по орбите вокруг другого под действием гравитации, его орбита всегда имеет одну форму, эллипс, который представляет собой просто окружность, растянутую в одном направлении (так будет, если нет источников трения и если мы игнорируем эйнштейновские поправки к ньютоновской теории гравитации, которые обычно ничтожны, если мы не рядом с черной дырой). Орбита остается эллипсом для самых разных объектов: и для кометы, обращающейся вокруг Солнца (*слева*), и для белого карлика – мертвой звезды, обращающейся вокруг Сириуса А, ярчайшей звезды нашего неба, и для звезды, обращающийся вокруг гигантской черной дыры в центре Галактики (*справа*), которая в миллион раз массивнее Солнца. (Рисунок справа воспроизводится с разрешения Рейнхарда Гензеля и Райнера Шеделя.)

⁶⁴ В действительности, если вы предотвратите столкновение баскетбольного мяча на рис. 10.2 с землей, сжав всю нашу планету в черную дыру, расположенную в ее центре, то параболическая часть траектории мяча останется неизменной и продолжится, образовав полный эллипс вокруг черной дыры.

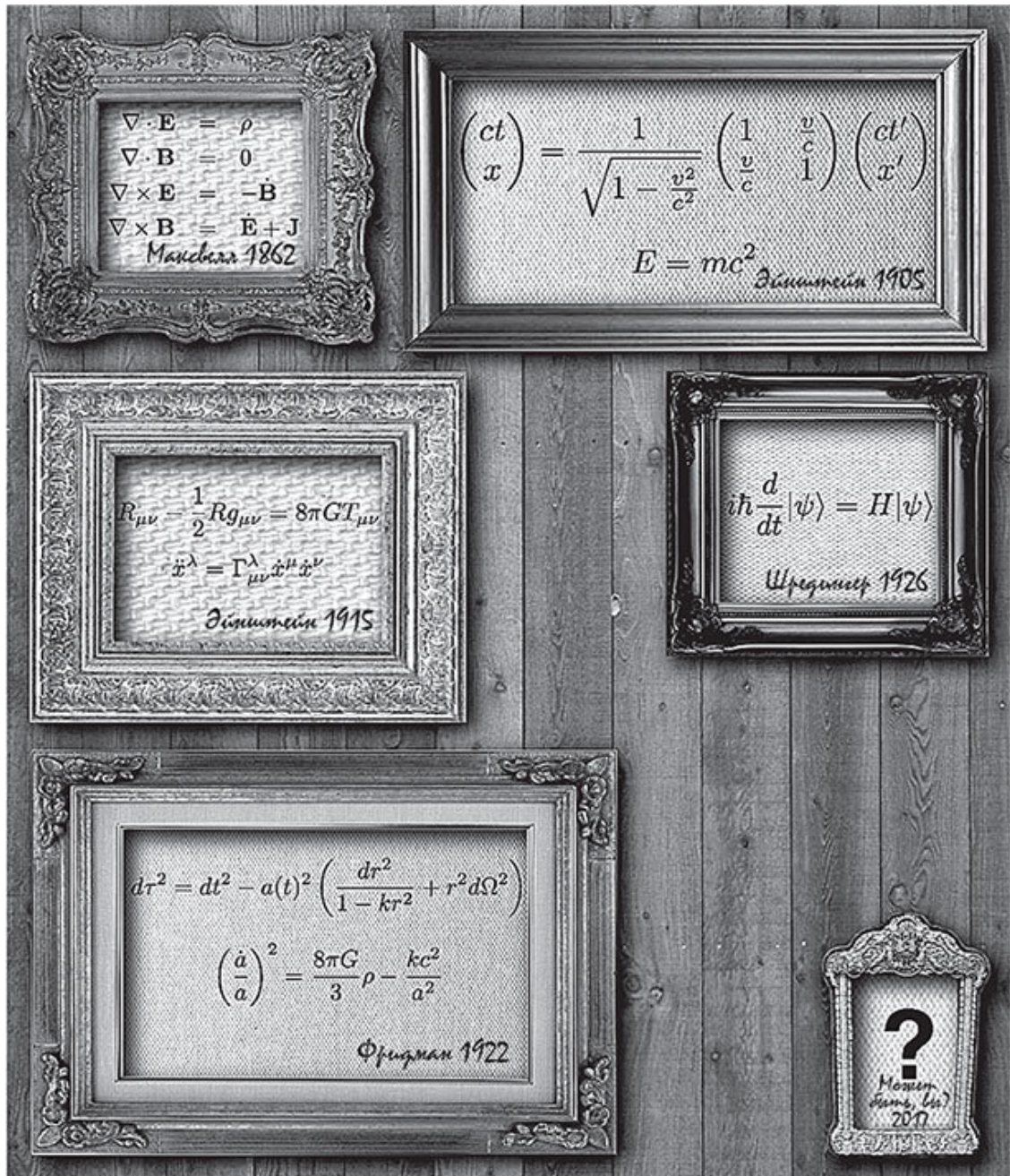


Рис. 10.4. Подобно тому, как изобразительное искусство и поэзия могут выразить многое с помощью немногих символов, так и физика способна сделать это с помощью уравнений. Слева направо и сверху вниз на этих шедеврах описаны: электромагнетизм, около-световое движение, гравитация, квантовая механика и расширение Вселенной. Мы еще не нашли уравнений единой «теории всего».

Постепенно люди открыли в природе множество других повторяющихся форм и паттернов, охватывающих не только движение и гравитацию, но и такие разные области, как электричество, магнетизм, свет, теплота, химия, радиоактивность и субатомные частицы. Эти паттерны складываются в *законы физики*. Как и форму эллипса, эти законы можно описать, применяя математические уравнения (рис. 10.4). Почему?

Числа

Уравнения – не единственный скрытый в природе намек на математику: есть также *числа*. Я говорю не о творениях рук человеческих, вроде пагинации в этой книге, а о числах, которые выражают фундаментальные свойства нашей физической реальности. Сколько карандашей вы сможете расположить так, чтобы все они были перпендикулярны (под углом 90°) друг другу? Три: их можно разместить, например, вдоль трех стыков стен и пола в углу вашей комнаты. Откуда взялось число 3? Мы называем его размерностью пространства, но почему существует именно 3 измерения, а не 2, 4 или 42? Почему в нашей Вселенной существует (насколько мы можем судить) ровно шесть типов кварков? Есть много других «встроенных» в природу целых чисел (гл. 7), которые описывают, какого типа элементарные частицы существуют.

И, вдобавок к математическим гостинцам, существуют закодированные в природе величины, которые не являются целыми числами и требуют для записи дробных значений. Согласно моим подсчетам, природа закодировала 32 таких фундаментальных числа. Относится ли к ним число, которое появляется на индикаторе весов, когда вы встаете на них после ванны? Нет, оно не в счет, поскольку является мерой чего-либо (вашей массы), что день ото дня изменяется, а значит, не является фундаментальным свойством нашей Вселенной. Что можно сказать о массе протона ($1,672622 \times 10^{-27}$ кг) или о массе электрона ($9,109382 \times 10^{-31}$ кг), которые кажутся неизменными во времени? Они также не в счет, поскольку измеряются в килограммах, а это произвольная единица массы, придуманная людьми. Но если вы разделите одно из этих двух чисел на другое, получится нечто поистине фундаментальное: протон примерно в 1836,15267 раз массивнее электрона⁶⁵. Значение 1836,15267 – *безразмерное число*, подобное π или $\sqrt{2}$, в том смысле, что его значение не зависит ни от каких человеческих единиц измерения, вроде граммов, метров, секунд или вольт. Почему это значение так близко к 1836? Почему не 2013? Или не 42? Простой ответ состоит в том, что мы этого не знаем. Но, думаю, в принципе мы можем вывести и это число, и все остальные когда-либо измеренные фундаментальные постоянные природы, всего из 32 чисел, перечисленных в табл. 10.1.

Табл. 10.1. Каждое фундаментальное свойство природы, когда-либо подвергнутое измерению, можно вычислить на основе 32 чисел – по крайней мере в принципе. Некоторые из них измерены с очень высокой точностью, тогда как другие экспериментально еще не определены. Точный смысл этих чисел не имеет значения для нашего изложения, но если вы заинтересовались, то найдете объяснения в моей статье (<http://arxiv.org/abs/astro-ph/0511774>). Вот только чем определяются значения этих чисел?

⁶⁵ Как данное отношение удалось измерить точнее, чем две массы по отдельности? Ошибки этих двух измерений очень тесно взаимосвязаны (коррелированы).

Параметр	Смысл	Измеренное значение
g	Константа слабого взаимодействия при m_Z	$0,6520 \pm 0,0001$
θ_W	Угол Вайнберга	$0,48290 \pm 0,00005$
g_s	Константа сильного взаимодействия при m_Z	$1,220 \pm 0,004$
μ^2	Квадратичный коэффициент Хиггса	$\approx -2 \times 10^{-34}$
λ	Четвертичный коэффициент Хиггса	$\approx 0,5$
G_e	Константа взаимодействия Юкавы для электрона	$0,000002931 \pm 10^{-9}$
G_μ	Константа взаимодействия Юкавы для мюона	$0,0006060 \pm 0,0000002$
G_τ	Константа взаимодействия Юкавы для таона	$0,01022$
G_u	Константа взаимодействия Юкавы для верхнего кварка	$0,000014 \pm 0,000003$
G_d	Константа взаимодействия Юкавы для нижнего кварка	$0,000029 \pm 0,000003$
G_c	Константа взаимодействия Юкавы для очарованного кварка	$0,0073 \pm 0,0001$
G_s	Константа взаимодействия Юкавы для странного кварка	$0,00054 \pm 0,00003$
G_t	Константа взаимодействия Юкавы для истинного кварка	$0,995 \pm 0,008$
G_b	Константа взаимодействия Юкавы для прелестного кварка	$0,0230 \pm 0,0002$
$\sin \theta_{12}$	Угол смешивания кварков в ККМ-матрице	$0,2243 \pm 0,0016$
$\sin \theta_{13}$	Угол смешивания кварков в ККМ-матрице	$0,0413 \pm 0,0015$
$\sin \theta_{23}$	Угол смешивания кварков в ККМ-матрице	$0,0037 \pm 0,0005$
δ_{13}	Фаза смешивания кварков в ККМ-матрице	$1,05 \pm 0,24$
θ_{qcd}	Нарушающая CP -симметрию вакуумная фаза КХД	$< 10^{-9}$
$G_{\nu e}$	Константа взаимодействия Юкавы для электронного нейтрино	$< 1,3 \times 10^{-11}$
$G_{\nu \mu}$	Константа взаимодействия Юкавы для мюонного нейтрино	$< 9,8 \times 10^{-7}$
$G_{\nu \tau}$	Константа взаимодействия Юкавы для тау-нейтрино	$< 0,00009$

Параметр	Смысл	Измеренное значение
$\sin^2 2\theta'_{12}$	Угол смешивания нейтрино в ПМНС-матрице	$0,857 \pm 0,024$
$\sin^2 2\theta'_{23}$	Угол смешивания нейтрино в ПМНС-матрице	$\geq 0,95$
$\sin^2 2\theta'_{13}$	Угол смешивания нейтрино в ПМНС-матрице	$\leq 0,098 \pm 0,013$
δ'_{13}	Фаза смешивания нейтрино в ПМНС-матрице	?
$\rho\Lambda$	Плотность темной энергии	$(1,16 \pm 0,07) \times 10^{-123}$
ξ_b	Барионная масса в расчете на фотон ρ_b/n_γ	$(4,66 \pm 0,06) \times 10^{-29}$
ξ_c	Масса темной материи в расчете на фотон ρ_c/n_γ	$(24,9 \pm 0,7) \times 10^{-29}$
ξ_ν	Масса нейтрино в расчете на фотон $\rho_\nu/n_\gamma = (3/11)\sum m_{\nu_i}$	$< 0,5 \times 10^{-29}$
Q	Скалярная амплитуда флуктуаций δ_H на горизонте	$(2,0 \pm 0,2) \times 10^{-5}$
n	Скалярный спектральный индекс	$0,960 \pm 0,007$

Не пугайтесь названий в таблице: они не имеют отношения к тому, чем мы здесь занимаемся. Суть в том, что в нашей Вселенной есть нечто сугубо математическое, и чем пристальнее мы всматриваемся, тем, похоже, больше математики видим. Что касается природных констант, то имеются сотни тысяч безразмерных чисел, измеренных в разных областях физики: от отношения масс элементарных частиц до отношений характерных длин волн света, испускаемого различными молекулами. С помощью компьютеров, достаточно мощных, чтобы решать уравнения, описывающие законы природы, все до одного эти числа, по видимому, могут быть определены на основе приведенных в табл. 10.1. Некоторые вычисления и измерения крайне сложны, и их до сих пор не удалось выполнить, а когда удастся, то, возможно, числа в теории и эксперименте не совпадут. Такого рода расхождения не раз случались в прошлом и, как правило, разрешались одним из трех способов:

1. Кто-нибудь находил ошибку в эксперименте.
2. Кто-нибудь находил ошибку в вычислениях.
3. Кто-нибудь находил ошибку в наших законах физики.

В последнем случае обычно удавалось найти более фундаментальные законы физики – как тогда, когда замена ньютоновских уравнений для гравитации эйнштейновскими позволила объяснить, почему Меркурий обращается вокруг Солнца не по идеальному эллипсу. Во всех случаях ощущение, что в природе есть нечто математическое, лишь усиливалось.

Если вы откроете еще более точные законы физики, то это может либо сделать число параметров менее 32 (табл. 10.1), позволив вычислить некоторые из этих величин по другим, содержащимся в таблице, – либо увеличить их число за счет добавления новых величин (относящихся, скажем, к массам новых типов частиц, которые, возможно, будут открыты на Большом адронном коллайдере).

Дополнительные улики

Что делать со всеми этими намеками на присутствие математики в нашем физическом мире? Большинство физиков привыкло, что природа по некоей причине описывается математикой, по крайней мере приближенно, и признают это как факт. В книге «Является ли Бог математиком?» астрофизик Марио Ливио заключает, что «ученые выбрали, над какими проблемами им работать, с учетом того, чтобы эти проблемы можно было решать математическими методами». Но я убежден, что причина глубже.

Во-первых, *почему* математика так успешно описывает природу? Я согласен с Вигнером: это требует объяснения. Во-вторых, на страницах этой книги мы постоянно сталкиваемся с уликами, указывающими на то, что математика не просто *описывает* природу. В некоторых отношениях природа *является* математической:

1. В гл. 2–4 мы видели, что сама ткань нашего физического мира, его пространство, является чисто математическим объектом в том смысле, что все неотъемлемые свойства пространства – число измерений, кривизна и топология – являются математическими.

2. В гл. 7 мы видели, что «начинка» нашего физического мира состоит из элементарных частиц, которые, в свою очередь, являются чисто математическими объектами в том смысле, что все их неотъемлемые свойства (приведенные в табл. 7.1 числа, например заряд, спин, лептонное число) являются математическими.

3. В гл. 8 мы видели, что существует нечто, возможно, даже более фундаментальное, чем наше трехмерное пространство с частицами в нем – это волновая функция и бесконечномерное гильбертово пространство, в котором она обитает. Частицы могут создаваться и уничтожаться, а также находиться в нескольких местах одновременно, однако была и всегда будет лишь одна волновая функция, движущаяся по гильбертову пространству в соответствии с уравнением Шредингера. И волновая функция, и гильбертово пространство являются чисто математическими объектами.

Что все это означает? Позвольте поделиться своим пониманием, и посмотрим, будет ли оно иметь для вас больше смысла, чем для профессора, сказавшего, что это похоронит мою карьеру.

Гипотеза математической Вселенной

К моменту получения университетского диплома я был захвачен всеми этими математическими уликами. Однажды вечером в 1990 году в Беркли я со своим другом Биллом Пуарье рассуждал о фундаментальной природе реальности. Внезапно мне пришло в голову, что наша реальность не просто *описывается* математикой, но и *является* математикой в очень специфическом смысле. Не какие-то ее аспекты, а вся целиком, включая нас самих⁶⁶. Эта идея кажется безумной, так что, изложив ее Биллу, я много лет размышлял, прежде чем написать первую статью о ней.

Прежде чем погружаться в детали, вот логическая структура, к которой я прибегаю, размышляя об этом. Во-первых, есть две гипотезы. Первая, *гипотеза внешней реальности* (ГВР), кажется безобидной:

Существует внешняя физическая реальность, совершенно независимая от людей.

Вторая, *гипотеза математической Вселенной* (ГМВ), выглядит куда радикальнее:

Наша внешняя физическая реальность является математической структурой.

Во-вторых, у меня есть доказательство того, что при достаточно широком определении математической структуры из первой гипотезы вытекает вторая.

⁶⁶ Похожими ощущениями делится Роджер Пенроуз в книге «Путь к реальности».

Первое мое допущение, гипотеза внешней реальности, не вызывает серьезных споров: я уверен, что большинство физиков согласно с этой старой идеей. Метафизические солипсисты открыто ее отвергают, а сторонники копенгагенской интерпретации квантовой механики могут отвергать ее на том основании, что не существует реальности без наблюдения. В предположении, что внешняя реальность существует, цель физических теорий состоит в описании того, как она устроена. Наши наиболее успешные теории, например общая теория относительности и квантовая механика, описывают лишь часть этой реальности: гравитацию или, скажем, поведение субатомных частиц. Но Святой Грааль теоретической физики – это «теория всего», исчерпывающее описание реальности.

Уменьшение нормы разрешенного багажа

Мой персональный поиск этой теории начинается с радикального рассуждения о том, на что она имеет право быть похожей. *Если мы признаем, что реальность существует независимо от людей, то чтобы ее описание было полным, оно должно также быть корректно определенным для нечеловеческих существ – скажем, инопланетян или суперкомпьютеров, – которые не знакомы с человеческими понятиями. Иначе говоря, такое описание должно выражаться в форме, лишенной всякого человеческого «багажа» вроде понятий «частица», «наблюдение» и других слов естественного языка.*

При этом все физические теории, которым меня учили, содержат две компоненты: математические уравнения и «багаж» – слова, объясняющие, как эти уравнения связаны с тем, что мы наблюдаем и интуитивно понимаем. Выводя из теории следствия, мы придумываем для них новые понятия и слова, например *протоны, атомы, молекулы, клетки, звезды*, поскольку ими удобно пользоваться. Важно помнить, однако, что эти понятия придуманы людьми. В принципе, все может быть вычислено без «багажа». Гипотетический идеальный суперкомпьютер способен вычислить, как состояние Вселенной изменяется во времени, без «человеческой» интерпретации, просто рассчитывая, как будут двигаться все частицы или как будет изменяться волновая функция.

Предположим, что траектория баскетбольного мяча на рис. 10.2 – это один из тех блестящих бросков, которые приносят победу в самый момент звучания финальной сирены, и после игры вы хотите описать другу, как это было. Поскольку мяч состоит из элементарных частиц (кварков и электронов), вы можете описать его движения без всяких упоминаний о баскетбольном мяче:

- Частица № 1 движется по параболе.
- Частица № 2 движется по параболе.
- ...
- Частица № 138 314 159 265 358 979 323 846 264 движется по параболе.

Это, однако, неудобно, поскольку время, которое понадобится для произнесения всего этого, превосходит возраст самой Вселенной. Это может быть и избыточно, поскольку все частицы получают толчок вместе и движутся как единое целое. Вот почему люди изобрели слово «мяч»: чтобы сослаться на эту сущность и экономить время, описывая ее движение как целого. Мяч изготовили люди, но дело обстоит подобным же образом и в случае составных объектов естественного происхождения – молекул, камней, звезд и т. д.: придумывать для них слова удобно и ради экономии времени, и в качестве так называемых сокращающих абстракций, делающих понимание мира проще. Но при всей их полезности такие слова являются необязательным «багажом»: например, я неоднократно использовал в этой книге слово «звезда», однако вы можете в принципе заменить его определением звезды через ее составляющие, скажем таким: «гравитационно связанный сгусток около 10^{57} атомов, часть кото-

рых вступает в термоядерные реакции». Иными словами, в природе есть множество сущностей, которым так и тянет дать название. Наверняка почти каждое человеческое сообщество имеет в языке слово для обозначения звезды, часто придуманное независимо и отражающее местные культурные и лингвистические традиции. Предполагаю, что и большинство внеземных цивилизаций в далеких планетных системах также изобрело название или символ для звезды, даже если они не пользуются для коммуникации звуками.

Другой замечательный факт: нередко можно математически предсказать существование таких заслуживающих имени сущностей, опираясь на уравнения, управляющие их частями. На этом пути можно предсказать всю «легоподобную» иерархию структур (гл. 7), от элементарных частиц до атомов с молекулами, а также все объекты на каждом уровне, которым люди дали запоминающиеся имена. Например, если вы решаете уравнение Шредингера для пяти или менее кварков, то оказывается, что есть лишь два способа, которыми они могут быть достаточно стабильно организованы: либо как сгустки из двух верхних кварков и одного нижнего, либо как сгустки из двух нижних кварков и одного верхнего. Люди ради удобства добавили в свой «багаж» названия для сгустков этих двух типов: *протоны* и *нейтроны*. Аналогично, если применить уравнение Шредингера к таким сгусткам, оказывается, что существует лишь 257 способов, которыми они могут быть устойчиво объединены друг с другом. Мы добавили в «багаж» название для этих протон-нейтронных ансамблей – *атомные ядра*, и придумали названия для каждого их типа: *водород*, *гелий* и т. д. Уравнение Шредингера также позволяет вычислить все способы соединения атомов в более крупные объекты, но на этот раз стабильных объектов оказывается настолько много, что всем им давать имена неудобно. Поэтому мы именуем только важные классы таких объектов (молекулы, кристаллы и т. д.) и наиболее распространенные или интересные объекты в каждом классе (вода, графит, алмаз).

Я рассматриваю такие составные объекты как *эмерджентные* в том смысле, что они возникают как решения уравнений, описывающих более фундаментальные объекты. Их эмерджентность – трудноуловимое свойство, поскольку исторически научный прогресс по большей части шел в противоположном направлении. Так, люди узнали о звездах прежде, чем поняли, что они состоят из атомов; узнали об атомах прежде, чем поняли, что они состоят из электронов, протонов и нейтронов; узнали о нейтронах прежде, чем открыли кварки. Для каждого эмерджентного объекта, который для нас важен, люди собрали «багаж» в форме новых понятий.

Того же характера эмерджентность и накопление человеческого «багажа» видны на рис. 10.5. Я привожу грубую схему организации научных теорий в генеалогическое древо, в котором каждая теория может быть выведена (по крайней мере в принципе) из более фундаментальных. Все эти теории имеют две составляющие: математические уравнения, а также слова, которые объясняют, как уравнения связаны с тем, что мы наблюдаем. Например, квантовая механика, как ее обычно излагают в учебниках, содержит обе компоненты (гл. 8): математическую, такую как уравнение Шредингера, и записанные на естественном языке фундаментальные постулаты вроде утверждения о коллапсе волновой функции. На каждом уровне иерархии теорий вводятся новые понятия (протоны, атомы, клетки, организмы, культуры и т. д.), потому что они удобны и охватывают суть того, что происходит, без обращения к вышестоящей, более фундаментальной теории. Все эти понятия вводят люди: в принципе, все может быть выведено из фундаментальной теории на вершине древа, хотя такой крайний редукционизм на практике обычно бесполезен. Грубо говоря, по мере движения вниз по древу количество слов увеличивается, а уравнений – уменьшается, едва не достигая нуля в таких предельно прикладных сферах, как медицина или социология. Напротив, теории, близкие к вершине, сильно математизированы, и физики с трудом описывают понятия в доступном обывателю виде, если это вообще возможно.

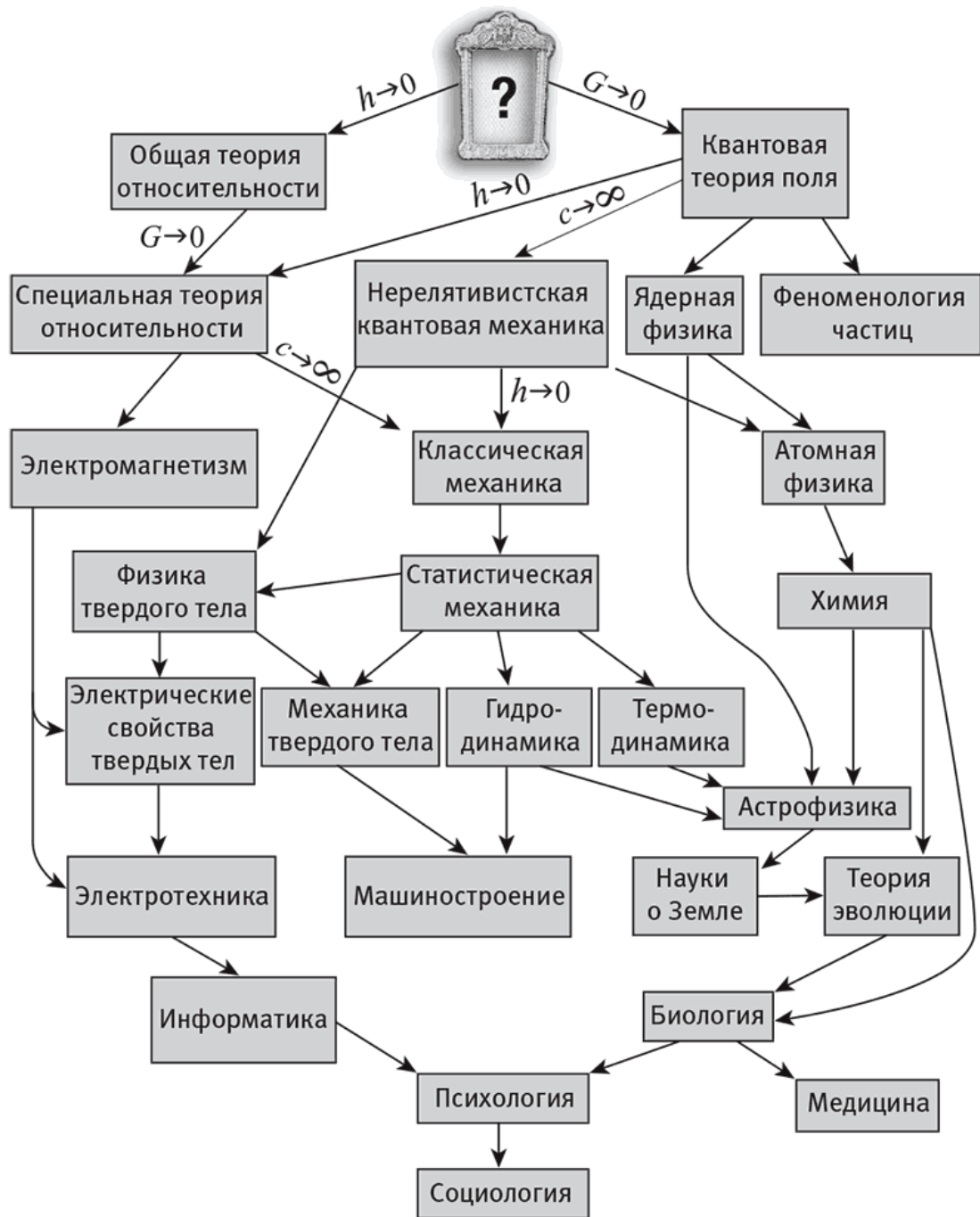


Рис. 10.5. Теории можно выстроить в “фамильное древо”, где каждая из них может быть выведена, по крайней мере в принципе, из более фундаментальных. Например, специальную теорию относительности можно получить из общей теории относительности в приближении, при котором ньютоновская гравитационная постоянная G равна нулю. Классическая механика выводится из специальной теории относительности в приближении бесконечности скорости света c . Гидродинамика со всеми ее понятиями, например плотностью и давлением, вытекает из классической физики столкновений частиц. Однако случаев, когда переходы по стрелкам хорошо понятны, меньшинство. Вывод биологии из химии или психологии из биологии на практике кажется недостижимым. Лишь отдельные, приближенные аспекты таких дисциплин математизированы, и, вероятно, все математические модели, име-

ющиеся сейчас в физике, также являются аппроксимациями отдельных аспектов реальности.

Высшая цель физики – найти то, что в шутку называют *теорией всего* (ТВ), из которой может быть выведено все остальное. Ей предстоит занять место большого вопросительного знака наверху древа теорий. Здесь чего-то недостает (гл. 7): у нас нет целостной теории, объединяющей гравитацию и квантовую механику. ТВ стала бы полным описанием внешней физической реальности, существование которой предполагается в гипотезе внешней реальности. Выше я показал, что полное описание должно быть свободно от любого «багажа», то есть не должно содержать никаких понятий. Иными словами, оно должно быть чисто математической теорией без объяснений или «постулатов», как в учебниках по квантовой механике (математики прекрасно справляются – и часто этим гордятся – с изучением абстрактных математических структур, которые не имеют никакого внутреннего смысла или связи с физическими понятиями). Так что бесконечно разумный математик должен быть способен вывести все древо теорий на рис. 10.5 лишь из этих уравнений, извлекая из них свойства физической реальности, которую они описывают, свойства ее обитателей, их восприятие мира и даже слова, которые они придумывают. Эта чисто математическая «теория всего» потенциально может оказаться достаточно простой для описания с помощью уравнений, которые уместятся на футболке.

Все это неуклонно ведет нас к вопросу: действительно ли можно найти такое описание внешней реальности, в котором не было бы никакого «багажа»? Если да, то описание объектов нашей внешней реальности и взаимосвязей между ними было бы совершенно абстрактным, а любые слова или символы стали бы не более чем метками без какого-либо априорно подразумеваемого смысла. Свойства же всех таких сущностей исчерпывались бы их связями между собой.

Математические структуры

Для ответа на этот вопрос необходимо присмотреться к математике. Для современного логика математическая структура – это в точности следующее: набор абстрактных сущностей с отношениями между ними. Возьмем, например, целые числа или геометрические объекты, вроде любимого пифагорейцами додекаэдра. Это совершенно не похоже на первоначальное восприятие математики большинством из нас – как садистской формы наказания или набора трюков для манипулирования числами. Математика, развиваясь, стала, подобно физике, задаваться более широкими вопросами.

Современная математика – это формальное исследование структур, которые можно определить чисто абстрактным способом, без человеческого «багажа». Считайте математические символы просто метками без внутреннего содержания. Неважно, пишете ли вы «два плюс два равно четыре», $2 + 2 = 4$ или *dos más dos es igual a cuatro*. Обозначения, используемые для указания сущностей и их взаимосвязей, не имеют значения; целые числа обладают лишь теми свойствами, которые связывают их между собой. То есть мы не изобретаем математические структуры: мы открываем их, а изобретаем лишь обозначения для их описания. Если другая цивилизация заинтересуется трехмерными фигурами, состоящими лишь из одинаковых плоских граней, она может открыть пять форм, представленных на рис. 7.2, которые мы, земляне, называем платоновыми телами. Инопланетяне могут придумать для них собственные названия, но не смогут изобрести шестую фигуру – ее просто не существует.

Итак, два основных вывода:

1. Из гипотезы внешней реальности вытекает, что «теория всего» (полное описание нашей внешней физической реальности) не содержит «багажа».
2. Нечто, имеющее описание, совершенно свободное от «багажа», – это не что иное, как математическая структура.

Из этих тезисов, взятых вместе, вытекает гипотеза математической Вселенной, то есть утверждение о том, что внешняя физическая реальность, описываемая посредством «теории всего», является математической структурой⁶⁷. Итак, если вы верите во внешнюю реальность, независимую от людей, то вы должны поверить и в то, что наша физическая реальность является математической структурой. Ничто больше не имеет свободного от «багажа» описания. Иными словами, мы живем в гигантском математическом объекте – гораздо более сложном, чем додекаэдр, и, вероятно, даже гораздо более сложном, чем объекты с пугающими названиями вроде многообразий Калаби – Яу, тензорных расслоений или гильбертовых пространств, которые появляются в передовых современных физических теориях. Все в нашем мире чисто математическое – включая нас самих.

Что такое математическая структура?

«Подожди-ка!» – обычно восклицает мой друг Джастин Бендих, когда физическое утверждение наводит на важный вопрос, на который нет ответа. А гипотеза математической Вселенной поднимает сразу три таких вопроса:

1. Что в точности является математической структурой?
2. Как именно наш физический мир может быть математической структурой?
3. Дает ли это утверждение какие-либо проверяемые предсказания?

Мы займемся вторым из этих вопросов в гл. 11, а третьим – в гл. 12. Начнем мы с первого и вернемся к нему в гл. 12.

«Багаж» и эквивалентные описания

Итак, люди пополняют свои описания «багажом». Теперь взглянем с другой стороны: как математическая абстракция может избавлять от «багажа», «обнажая» вещи до самой их сути. Рассмотрим конкретную последовательность шахматных ходов, известную как Бесмертная партия. В ней белые впечатляюще жертвуют обеими ладьями, слоном и ферзем, чтобы поставить мат тремя оставшимися легкими фигурами (*рис. 10.6*). Здесь, на Земле, эта партия впервые была сыграна в 1851 году Адольфом Андерсеном и Лионелем Кизерицким. Ее ежегодно воспроизводят в итальянском городке Маростика живые игроки, одетые шахматными фигурами, и она регулярно повторяется множеством любителей шахмат по всему миру. Некоторые игроки (включая моего брата Пера, его сына Симона и моего сына Александра; *рис. 10.6*) пользуются деревянными фигурами, другие – фигурами из мрамора или пластмассы. Некоторые доски выкрашены в коричневый и бежевый цвета, другие в черный и белый, а некоторые являются виртуальными, нарисованными с помощью трехмерной или двумерной компьютерной графики (*рис. 10.6*). И все же в некотором смысле ни одна из этих

⁶⁷ Философ Джон Уорролл предложил термин «структурный реализм» в качестве компромисса между научным реализмом и антиреализмом. Грубо говоря, фундаментальная природа реальности корректно описывается только математическим или структурным содержанием научных теорий. Данный термин различными способами интерпретировался и уточнялся многими философами науки, а согласно Гордону Маккейбу, для моей гипотезы о том, что физическая Вселенная изоморфна математической структуре, следует использовать термин «универсальный структурный реализм».

деталей не важна: когда любители шахмат называют Бессмертную партию красивой, они имеют в виду не привлекательность игроков, доски или фигур, а более умозрительную сущность, которую можно назвать абстракцией партии или последовательностью ходов.

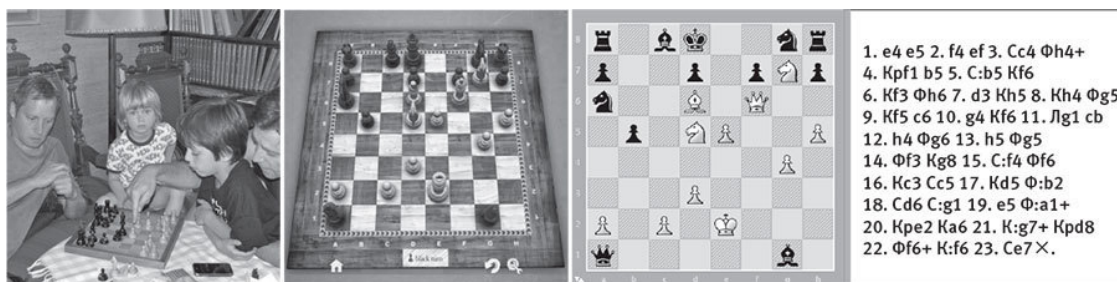


Рис. 10.6. Абстрактная партия в шахматы не зависит от цвета или формы фигур, от того, описываются ли ходы движениями фигур на физически существующей доске, на стилизованном компьютерном изображении или с применением алгебраической шахматной нотации – это все равно та же партия. Аналогично математическая структура не зависит от символов, которые используются для ее описания.

Рассмотрим подробнее, как мы описываем абстрактные сущности. Прежде всего описание должно быть конкретным, так что нужно изобрести объекты, слова, символы, соответствующие абстрактной идее. Так, в Соединенных Штатах шахматную фигуру, которая ходит по диагонали, мы называем *bishop* («епископ»). Во-вторых, очевидно, что это название произвольно и другие были бы ничуть его не хуже. В самом деле, эта фигура называется *fou* («дурак») по-французски, *strelec* («стрелок») по-словацки, *löpare* («бегун») по-шведски, *fil* («слон») по-персидски. Можно, однако, согласовать уникальность Бессмертной партии с множественностью ее возможных описаний, используя сильную идею *эквивалентности*:

1. Мы определим, что имеется в виду под эквивалентностью двух описаний.
2. Мы будем говорить, что если два описания эквивалентны, то они описывают одну и ту же вещь.

Любые слова, понятия или символы, которые появляются в некоторых, но не во всех эквивалентных описаниях, очевидно, являются необязательными, а значит, относятся к «багажу». Но если мы хотим определить сущность Бессмертной партии, сколько «багажа» мы можем выбросить? Очевидно, много: компьютеры способны играть в шахматы, не имея никакого представления о человеческом языке или понятиях вроде цвета, текстуры, размеров и названий фигур. Чтобы до конца понять, как далеко мы можем зайти, необходимо дать более строгое определение *эквивалентности*:

Два описания эквивалентны, если между ними существует соответствие, которое сохраняет все отношения.

В шахматах используются абстрактные сущности (фигуры и поля на доске) и отношения между ними. Одно из отношений, которое фигура может иметь с полем, заключается в том, что первая стоит на втором. Другое отношение, которое фигура может иметь к полю, состоит в том, что ей позволено на него переместиться. Две центральные иллюстрации на рис. 10.6, согласно нашему определению, эквивалентны: между трехмерными и двумерными фигурами и досками существует соответствие, так что любой трехмерной фигуре, стоящей на определенном поле, соответствует двумерная фигура на соответствующем поле. Аналогично, описание шахматной позиции, выраженное лишь в словах английского языка, эквивалентно описанию, выраженному лишь в словах испанского языка, если имеется словарь,

описывающий соответствие между английскими и испанскими словами, и если его применение при переводе описания на испанском дает описание на английском.

Когда газеты или веб-сайты публикуют шахматные партии, они обычно используют еще одну эквивалентную форму описания – так называемую алгебраическую шахматную нотацию (*рис. 10.6, справа*). Здесь фигуры обозначены не предметами или словами, а буквами (слон, например, эквивалентен «С»), а поля представляются буквой, задающей вертикаль, и цифрой, указывающей горизонталь. Поскольку абстрактное описание партии на *рис. 10.6 (справа)* эквивалентно ее описанию в форме видеозаписи игры на физической доске, все, что есть в последней форме описания, но не имеет соответствия в первой, является «багажом» – от физического существования доски до формы, цвета и названий фигур. Даже особенности алгебраической шахматной нотации выступают «багажом»: когда в шахматы играют компьютеры, они обычно пользуются иными абстрактными описаниями позиций, представляющими собой схемы из нулей и единиц в памяти. Так что остается после того, как мы избавляемся от «багажа»? Что именно описывается эквивалентными описаниями? Бессмертная партия, на 100 % очищенная.

«Багаж» и математические структуры

Разобранный случай с абстрактными шахматными фигурами, полями на доске и отношениями между ними – это пример гораздо более общего понятия – математической структуры. Это стандартное понятие в современной математической логике. В гл. 12 я приведу более строгое описание, а пока вполне достаточно неформального определения:

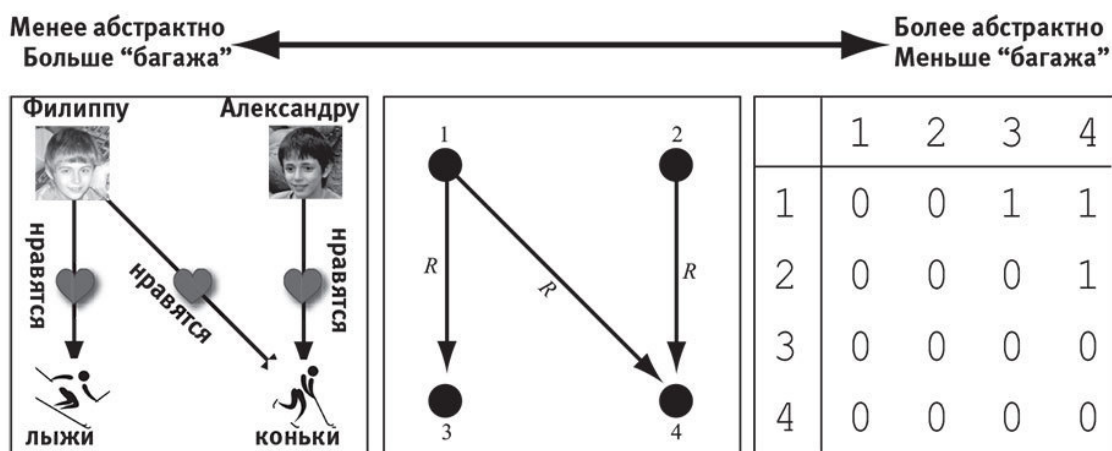


Рис. 10.7. Три эквивалентных описания одной и той же математической структуры, которую математики назвали бы ориентированным графом с четырьмя элементами. Каждое описание содержит некий произвольный «багаж», но структура, которую все они описывают, на 100 % свободна от «багажа»: ее четыре сущности не имеют свойств, кроме отношений между ними, а эти отношения не имеют свойств, кроме информации о том, какие элементы они связывают.

Математическая структура – это набор абстрактных сущностей с отношениями между ними.

Рассмотрим несколько примеров. На *рис. 10.7 (слева)* описываются математические структуры с четырьмя сущностями, связанными между собой отношением *нравится*. Сущность *Филипп* представлена изображением с множеством внутренних свойств, таких, напри-

мер, как цвет волос. Напротив, сущности математических структур совершенно абстрактны, что предполагает отсутствие у них каких бы то ни было внутренних свойств. Это значит, что какие бы символы мы ни использовали для их представления, это будут лишь метки, свойства которых не имеют отношения к делу: во избежание ошибочного приписывания свойств этих символов абстрактным сущностям, обозначением которых они являются, рассмотрим более аскетичное описание, представленное на среднем рисунке. Оно эквивалентно первому, поскольку, если установить соответствие согласно следующему словарю: *Филипп* = 1, *Александр* = 2, *лыжи* = 3, *скейтборд* = 4, *нравится* = *R*, все отношения сохраняются. Так, «Александру нравится скейтборд» превратится в «2 R 4», а такое отношение на среднем рисунке действительно есть.

Математические структуры можно описывать точно так же, как шахматные партии, лишь при помощи символов. Так, в правой части рис. 10.7 представлено третье эквивалентное описание нашей математической структуры с помощью числовой таблицы четыре на четыре. В таблице значение 1 указывает, что отношение (*нравится*) имеет место между элементом, соответствующим данной строке, и элементом, соответствующим данному столбцу. Скажем, тот факт, что в третьей колонке первой строки стоит 1, означает, что «Филиппу нравятся лыжи». Очевидно, что существует гораздо больше эквивалентных способов описания математической структуры. Но есть лишь одна уникальная математическая структура, которая описывается всеми этими способами. Итак, любое конкретное описание математической структуры несет «багаж», но сама структура его не содержит. Важно не путать описание с тем, что именно описывается: даже кажущееся наиболее абстрактным описание математической структуры не является самой этой структурой. Правильнее сказать, что структуре соответствует класс всех эквивалентных ее описаний. В табл. 10.2 дана сводка отношений между этими и иными ключевыми понятиями, связанными с идеей математической Вселенной.

Симметрия и другие математические свойства

Некоторые математики любят поспорить о том, что такое математика, и по этому вопросу, конечно, нет единого мнения. Однако, согласно популярному определению, математика – это «формальное изучение математических структур». Следуя этим путем, математики выявили большое число интересных математических структур – от хорошо всем знакомых, вроде куба, икосаэдра (рис. 7.2) и целых чисел, до экзотических, вроде банаховых пространств, орбиобразий и псевдоримановых многообразий.

Одна из наиболее важных задач математиков при изучении математических структур – это доказательство теорем об их свойствах. Но что за свойства может иметь математическая структура, если ее сущностям и отношениям не позволено иметь никаких внутренних свойств?

Рассмотрим математическую структуру, описанную в левой части рис. 10.8. Между входящими в нее сущностями нет никаких отношений, так что нет ничего, что позволило бы отличить одну из этих сущностей от любой другой. Значит, данная математическая структура не имеет никаких свойств, кроме *мощности* – числа сущностей в ней. Математики называют эту математическую структуру «множеством из восьми элементов», и единственное ее свойство – наличие восьми элементов. Весьма скучная структура!

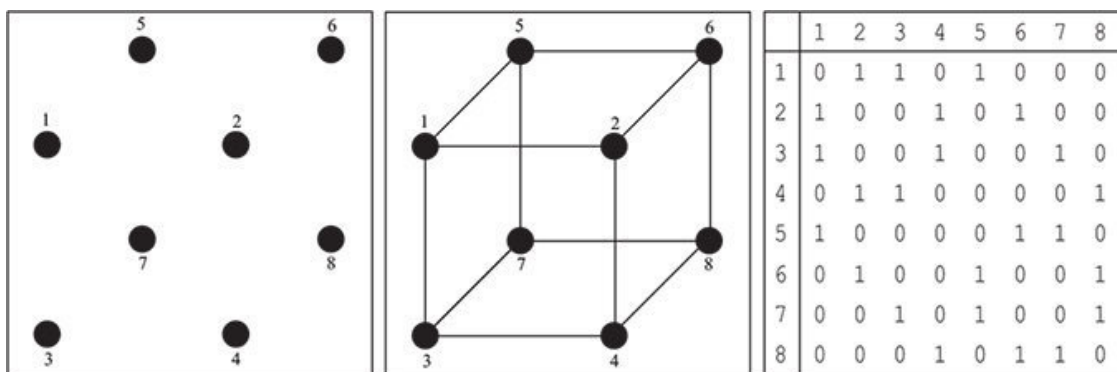


Рис. 10.8. Средний рисунок описывает математическую структуру с восемью элементами (символически изображенными в виде точек) и связями между ними (символически изображенными в виде линий). Вы можете интерпретировать эти элементы как вершины куба, а отношения как указание, какие вершины соединяются ребрами. Но эта интерпретация – совершенно необязательный “багаж”: в правой части представлено эквивалентное описание той же математической структуры без использования какой-либо графики или геометрии. Например, тот факт, что на пересечении пятого столбца и шестой строки стоит 1, означает наличие отношения между элементами 5 и 6. Данная математическая структура имеет много интересных свойств, например зеркальную симметрию и некоторые вращательные симметрии. А математическая структура, описываемая левым рисунком, не содержит отношений и интересных свойств, кроме своей мощности, равной 8, числу элементов, которое в нее входит.

Среднее изображение на рис. 10.8 описывает другую, более интересную математическую структуру с восемью элементами, которая включает их отношения. Одно из описаний этой структуры состоит в том, что ее элементы – это вершины куба, а отношения задают, какие вершины соединены между собой ребрами. Помните, однако, что не следует путать описание с тем, что описывается: математическая структура не имеет собственных свойств (например размера, цвета, текстуры или состава) – она содержит только восемь связанных отношениями сущностей, которые вы можете по желанию интерпретировать как вершины куба. На самом деле в правой части рис. 10.8 представлено эквивалентное определение этой математической структуры без ссылок на геометрические понятия вроде «куб», «вершина» или «ребро».

Но если сущности внутри этой структуры не имеют собственных свойств, то могут ли иметься такие свойства у самой структуры (помимо того, что в ней восемь элементов)? На самом деле, да, они есть – это *симметрии*. В физике нечто называют обладающим симметрией, если оно остается неизменным, когда вы определенным образом преобразуете его. Например, мы говорим, что ваше лицо обладает зеркальной симметрией, если оно кажется неизменным, будучи отраженным слева направо. В некотором смысле математическая структура на рис. 10.8 (в середине) обладает зеркальной симметрией: если вы поменяете местами элементы 1 и 2, 3 и 4, 5 и 6, 7 и 8, то схема отношений будет выглядеть точно так же, как прежде. Она также обладает некоторыми вращательными симметриями, соответствующими повороту нарисованного куба либо на 90° вокруг оси, проходящей через центры противоположных граней, либо на 120° вокруг оси, проходящей через противоположные вершины, либо на 180° вокруг оси, проходящей через середины противоположных ребер. Хотя интуитивно мы считаем, что симметрии связаны с геометрией, те же симметрии можно обнаружить, взяв с таблицей в правой части рис. 10.8: если определенным образом перенумеровать восемь элементов, а затем пересортировать таблицу в порядке возрастания номеров строк и столбцов, получится точно такая же таблица, какая была в начале.

Знаменитый больной вопрос философии – *проблема бесконечного регресса*. Например, если мы говорим, что свойства алмаза объясняются свойствами и расположением в нем атомов углерода, свойства атомов углерода – свойствами и расположением в них протонов, нейтронов и электронов, а свойства протонов – свойствами и расположением в них кварков, кажется, что мы обречены вечно пытаться объяснять свойства этих составных частей. Гипотеза математической Вселенной предлагает радикальное решение этой проблемы: на нижнем уровне реальность – это математическая структура, так что ее части вообще не имеют внутренних свойств! Иными словами, из гипотезы математической Вселенной вытекает, что мы живем в *реляционной реальности*, то есть свойства окружающего мира обусловлены не свойствами первичных «строительных блоков», из которых он сложен, а отношениями между «блоками»⁶⁸. Внешняя физическая реальность является, таким образом, чем-то большим, нежели суммой ее частей. Она может иметь много интересных свойств, хотя ее части вообще не имеют собственных свойств.

Табл. 10.2. Ключевые понятия, связанные с идеей математической Вселенной.

Шпаргалка по математической Вселенной	
“Багаж”	Понятия и слова, придуманные людьми для удобства, которые не являются необходимыми для описания внешней физической реальности.
Математическая структура	Набор абстрактных сущностей с отношениями между ними. Может быть описана независимым от “багажа” способом.
Эквивалентность	Два описания математической структуры эквивалентны, если между ними существует соответствие, которое сохраняет все отношения. Если две математические структуры имеют эквивалентные описания, то это одна и та же структура.
Симметрия	Свойство, остающееся неизменным при преобразовании. Например, идеальная сфера не изменяется при повороте.
Гипотеза внешней реальности	Существует внешняя физическая реальность, полностью независимая от людей.
Гипотеза математической Вселенной	Внешняя физическая реальность является математической структурой. Я доказываю, что это вытекает из гипотезы внешней реальности.
Гипотеза вычислимой Вселенной	Наша физическая реальность — это математическая структура, определяемая вычислимой функцией (гл. 12).
Гипотеза финитной Вселенной	Наша физическая реальность — это финитная (конечная) математическая структура (гл. 12).

⁶⁸ Наш мозг дает другой пример того, как свойства появляются преимущественно из отношений. Согласно гипотезе понятийных клеток (*concept cells*) в нейронауке, конкретные схемы разрядов различных групп нейронов соответствуют различным понятиям. Основное различие между понятийными клетками для «красного», «летать» и «Анжелины Джоли», очевидно, лежит не в типе задействованных нейронов, а в их отношениях (соединениях) с другими нейронами.

Математические структуры на рис. 10.7 и 10.8 относятся к семейству математических структур, называемых *графами*: это абстрактные элементы, часть которых попарно связана. Можно применить другие графы для описания математических структур, соответствующих додекаэдру и прочим платоновым телам на рис. 7.2. Еще один пример графа – сеть «френдов» в «Фейсбуке». Здесь элементы соответствуют всем пользователям «Фейсбука», и два пользователя связаны, если между ними установлено отношение дружбы. Графы представляют собой лишь одно из множества семейств математических структур. Мы подробнее обсудим математические структуры в гл. 12, а пока разберем еще несколько примеров.

Есть много математических структур, соответствующих различным типам чисел. Так, *натуральные числа* (1, 2, 3, ...) образуют математическую структуру. Здесь элементами служат числа, и существует много типов отношений. Некоторые отношения (скажем, *равно*, *больше чем*, *делится на*) могут связывать пары чисел («15 делится на 5»), другие устанавливаются между тремя числами («17 является суммой 12 и 5») и т. д. Постепенно математики открывали более широкие классы чисел, которые образуют собственные математические структуры: *целые числа* (включающие отрицательные числа), *рациональные числа* (включающие дроби), *вещественные числа* (включающие квадратный корень из 2), *комплексные числа* (включающие квадратный корень из -1) и *трансфинитные числа* (включающие бесконечные числа). Когда, закрыв глаза, я думаю о числе 5, оно кажется мне желтым. Однако во всех этих математических структурах числа сами по себе не имеют свойств, и все их свойства сводятся к их отношениям с иными числами: 5 имеет свойство быть суммой 4 и 1, например, но оно не желтое и ни из чего не сделано.

Еще один обширный класс математических структур соответствует различным пространствам. Например, трехмерное евклидово пространство, которое мы изучаем в школе, – это математическая структура. Здесь элементами выступают точки трехмерного пространства и вещественные числа, которые интерпретируются как расстояния и углы. Существует множество других типов отношений. Например, три точки могут удовлетворять тому отношению, что они лежат на одной прямой. Существуют различные математические структуры, соответствующие евклидову пространству с четырьмя и любым другим числом измерений. Математики также открыли множество других типов пространств более общего вида, которые образуют собственные математические структуры, вроде пространства Минковского, римановых, гильбертовых, банаховых и хаусдорфовых пространств. Многие думают, что наше трехмерное физическое пространство является евклидовым. Однако в гл. 2 мы узнали, Эйнштейн положил этому конец. Сначала его специальная теория относительности показала, что мы живем в пространстве Минковского (включающем время в качестве четвертого измерения), а затем общая теория относительности заменила пространство Минковского римановым пространством, то есть способным искривляться. Затем появилась квантовая механика (гл. 7), утверждающая, что на самом деле мы обитаем в гильбертовом пространстве. И вновь точки этих пространств ни из чего не сделаны и не имеют цвета, текстуры или каких-либо иных собственных свойств.

Хотя наша коллекция известных математических структур обширна и необычна и еще больше их пока не открыто, каждую математическую структуру можно проанализировать на предмет симметричности, и у многих обнаруживаются интересные симметрии. Крайне любопытно, что одним из самых важных открытий в физике стало наличие встроенных симметрий и у нашей физической реальности. Так, законы физики обладают вращательной симметрией, то есть во Вселенной нет выделенного направления, которое можно было бы назвать «верхом». Они также, по-видимому, имеют трансляционную симметрию (относительно сдвига), то есть нет особого места, которое можно было бы назвать центром пространства. Многие из упомянутых выше пространств обладают красивыми симметриями, порой совпадающими с наблюдаемыми симметриями физического мира. Например,

евклидово пространство обладает как вращательной (нельзя обнаружить различия, если пространство поворачивается), так и трансляционной симметрией (нельзя обнаружить отличия, если пространство сдвигается). У четырехмерного пространства Минковского еще больше симметрий, и нельзя обнаружить различий, если выполнен обобщенный поворот между пространственным и временным измерениями (Эйнштейн показал, что именно поэтому кажется, что время замедляется, когда вы движетесь с околосветовой скоростью). В XX веке было открыто множество более тонких симметрий природы. Они лежат в основе эйнштейновских теорий относительности, квантовой механики и Стандартной модели элементарных частиц.

Обратите внимание: свойства симметрии, столь важные для физики, появляются именно благодаря отсутствию собственных свойств у «строительных блоков» реальности, то есть из самой сути того, что значит для нее быть математической структурой. Если выкрасить часть бесцветной сферы в желтый, ее вращательная симметрия будет нарушена. Подобным образом, если бы точки трехмерного пространства обладали свойствами, которые делали бы одни точки внутренне отличными от других, пространство утратило бы свою вращательную и трансляционную симметрию. «Меньше – это больше» в том смысле, что чем меньше свойств имеют точки, тем больше симметрий у пространства.

Если гипотеза математической Вселенной верна, то наша Вселенная является математической структурой, и из ее описания бесконечно разумный математик должен иметь возможность вывести все физические теории. Как именно он это сделает? Мы не знаем. Но я уверен, что первым его шагом стало бы определение симметрий этой математической структуры.

В начале этой главы вы узнали мрачное предсказание: мои публикации относительно связи между математикой и физикой безумны и похоронят мою карьеру. Пока я изложил лишь часть обоснований того, что внешняя физическая реальность является математической структурой. Это действительно звучит безумно, однако мы лишь разминаемся. Когда мы займемся следствиями и проверяемыми предсказаниями, вытекающими из гипотезы математической Вселенной, все станет еще безумнее! Кроме прочего, мы придем к неизбежному выводу о новом мультиверсе, столь огромном, что в сравнении с ним поблекнет даже мультиверс III уровня в квантовой механике. Но прежде предстоит ответить на острый вопрос. Наш физический мир меняется во времени, тогда как математические структуры неизменны – они просто существуют. Так как же наш мир может быть математической структурой?

Резюме

- С древних времен людей мучила загадка: почему наш физический мир можно успешно описать с помощью математики.
- Физики продолжают открывать в природе формы, схемы и закономерности, которые удается описывать математическими уравнениями.
- Ткань нашей физической реальности содержит десятки безразмерных чисел, исходя из которых, в принципе, можно вычислить все измеримые постоянные.
- Некоторые физические сущности, например пустое пространство, элементарные частицы и волновая функция, кажутся чисто математическими в том смысле, что все присущие им свойства являются математическими.
- Гипотеза внешней реальности (ГВР), состоящая в том, что существует внешняя физическая реальность, совершенно независимая от людей, признается большинством физиков.
- При достаточно широком определении математики из ГВР вытекает гипотеза математической Вселенной (ГМВ), утверждающая, что наш физический мир является математической структурой.

- Это означает, что наш физический мир не только описывается математикой, но и является математической структурой, что делает нас самосознающими частями гигантского математического объекта.

- Математическая структура – это абстрактное множество сущностей с отношениями между ними. Эти сущности не имеют «багажа»: кроме этих отношений они не обладают никакими свойствами.

- Математическая структура может обладать интересными свойствами, например симметриями, несмотря на то, что ни входящие в нее сущности, ни отношения между ними не обладают собственными свойствами.

- ГМВ разрешает пользующуюся дурной славой проблему бесконечного регресса. Она заключается в том, что свойства природы можно объяснять лишь свойствами ее частей, которые требуют дальнейшего объяснения, и так до бесконечности: свойства природы возникают не из свойств ее самых фундаментальных «строительных блоков» (которые не обладают никакими свойствами), а из отношений между «блоками».

Глава 11. Иллюзорно ли время?

Различие между прошлым, настоящим и будущим – не более чем иллюзия.

Альберт Эйнштейн

Из письма к Микеланджело Бессо (1955)

Время – это иллюзия, а обеденное время – тем более.

Дуглас Адамс

«Автостопом по Галактике»⁶⁹

Если вы похожи на меня, вас также беспокоят вопросы без ответа. В предыдущей главе я поднял много таких, и правильно, если вы поставите сказанное мной под сомнение. Например, я убеждал вас, что наша внешняя физическая реальность – это математическая структура, но что именно означает эта фраза? Физическая реальность изменчива: ветер уносит листья, планеты обращаются вокруг Солнца. А математические структуры статичны: абстрактный додекаэдр имел, имеет и будет иметь 12 пятиугольных граней. Как нечто изменяющееся может быть неизменным? Другой острый вопрос: как *вы* вписываетесь в эту предполагаемую математическую структуру – то есть как ваше самосознание, мысли и чувства оказываются частью математической структуры?

Может ли физическая реальность быть математической?

Реальность, лишенная времени

Ответить на эти вопросы нам поможет Эйнштейн. Он учил, что существует два эквивалентных способа думать о физической реальности: как о трехмерном вместилище *пространстве*, где все изменяется во времени, и как о четырехмерном вместилище, называемом *пространство-время*, которое просто существует – неизменное, никогда не создаваемое и никогда не уничтожаемое⁷⁰. Эти два взгляда соответствуют «лягушачьей» и «птичьей» точкам зрения на реальность (гл. 9). Вторая соответствует взгляду физика, изучающего математическую структуру реальности, подобно тому, как птица рассматривает землю с большой высоты. А первая – это внутренний взгляд наблюдателя, живущего внутри этой структуры, подобно лягушке, живущей на участке, который охватывает взглядом птица.

Математически пространство-время – это пространство с четырьмя измерениями: первые три являются знакомыми нам измерениями пространства, а четвертое измерение представляет собой время. На рис. 11.1 временное измерение я отложил по вертикали, а пространственные измерения по горизонтальным направлениям. Во избежание недоразумений я нарисовал только два из трех пространственных измерений, x и y , поскольку при попытке визуализировать четырехмерные объекты у меня из ушей начинает идти дым... На рисунке показана Луна, движущаяся вокруг Земли по круговой орбите, – ради удобства я изобразил орбиту гораздо меньше, чем она должна быть при соблюдении масштаба, и сделал еще некоторые упрощения⁷¹. В правой части рисунка показана «лягушачья» точка зрения: пять

⁶⁹ Пер. Ю. Ариновича. – Прим. пер.

⁷⁰ Идея времени как четвертого измерения неизменной реальности занимала многих писателей, например Герберта Уэллса, автора романа «Машина времени» (1895). Джулиан Барбур дает интересный обзор истории этой идеи в книге «Конец времени».

⁷¹ Для простоты на рис. 11.1 игнорируется тот факт, что Земля и Луна вращаются, что орбита Луны слегка вытянута (она является эллипсом, а не идеальной окружностью) и что притяжение Луны заставляет и саму Землю совершать круговое движение, радиус которого составляет около 74 % радиуса Земли.

снимков пространства с Луной в разных положениях и неизменным положением Земли. В левой части рисунка показана «птичья» точка зрения: то, что лягушке кажется движением, заменено неизменной *формой* в пространстве-времени. Поскольку Земля не движется, она все время остается на одном месте в пространстве, а потому в пространстве-времени представлена вертикальным цилиндром. Луна выглядит гораздо интереснее и представляется в пространстве-времени спиралью, задающей, где находится небесное тело в разные моменты времени. Рассмотрите обе части рисунка, чтобы уяснить, как они связаны: это важно для нашего разговора. Чтобы получить мгновенный снимок пространства (справа) по пространству-времени (слева), вы делаете горизонтальный срез пространства-времени в тот момент, который вас интересует.

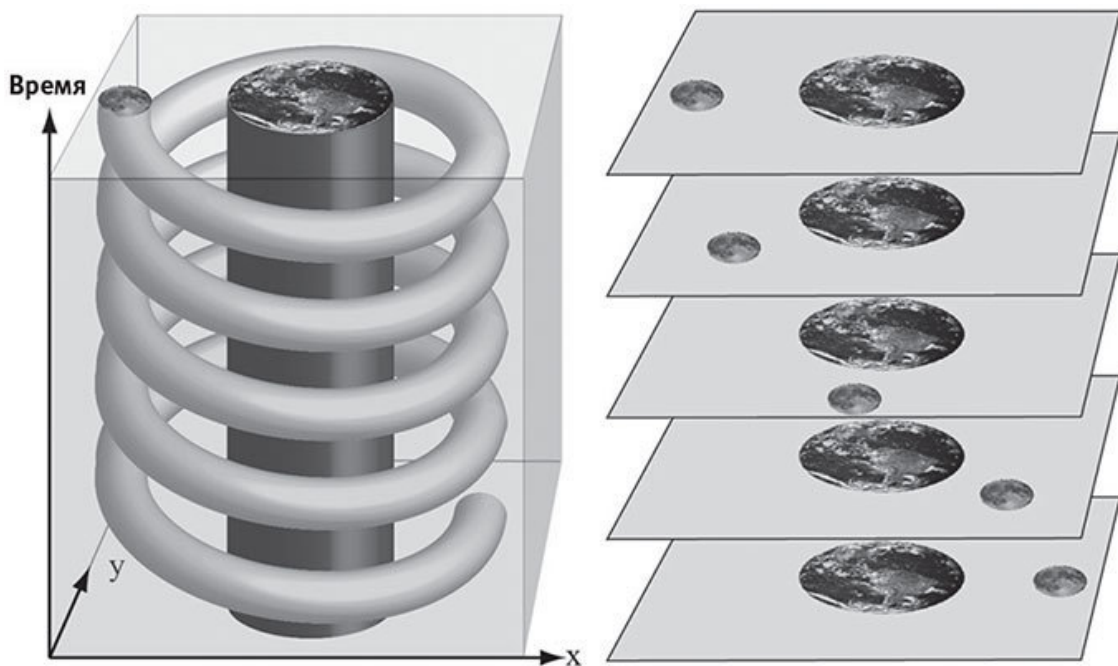


Рис. 11.1. Движение Луны вокруг Земли. Мы в равной мере можем думать о нем как о положении в пространстве, которое изменяется во времени (*справа*), и как о неизменной спиральной форме в пространстве-времени (*слева*), соответствующей математической структуре. Снимок пространства (*справа*) – просто горизонтальные сечения пространства-времени (*слева*).

Обратите внимание: не пространство-время существует внутри пространства и времени, а, напротив, пространство и время существуют внутри пространства-времени. Я утверждаю, что наша внешняя физическая реальность является математической структурой, то есть по определению абстрактной, неизменной сущностью вне пространства и времени. Как мы увидим, эта математическая структура соответствует «птичьей», а не «лягушачьей» точке зрения на нашу реальность, так что она должна содержать пространство-время, а не только пространство. Эта математическая структура содержит также дополнительные элементы, соответствующие материи в нашем пространстве-времени. Однако это не меняет ее вневременного характера: если бы история Вселенной была шахматной партией, математическая структура соответствовала бы не одной позиции, а всей игре (*рис. 10.6*). Если бы история Вселенной была кинофильмом, она соответствовала бы не отдельному кадру, а целому дивиду. Так что с «птичьей» точки зрения траектории объектов, движущихся в четырехмерном пространстве-времени, напоминают клубок спагетти. Там, где лягушка видит нечто, движущееся с постоянной скоростью, птица наблюдает прямую, еще не сва-

ренную макаронину. Там, где лягушка видит Луну, обращающуюся вокруг Земли, птица видит спиральку-ротини (рис. 11.1). Там, где лягушка видит сотни миллиардов звезд, движущихся вокруг Галактики, птица видит сотни миллиардов переплетающихся макаронин. Для лягушки реальность описывается ньютоновскими законами движения и гравитации. Для птицы реальность – это геометрия макарон.

Прошлое, настоящее и будущее

«Извините, сколько сейчас времени?» – думаю, вы тоже задаете этот вопрос, как если бы на фундаментальном уровне существовала такая вещь, как *сейчас*. При этом вы, наверное, никогда не обращались к прохожему с вопросом: «Извините, сколько сейчас места?» Если вы действительно безнадежно заблудились, то, вероятно, спросите что-нибудь вроде: «Извините, а где я?» – подтверждая тем самым, что вы интересуетесь не свойством пространства, а, скорее, своим собственным свойством: положением в пространстве в момент, когда задан вопрос. А когда вы спрашиваете о времени, то в действительности интересуетесь не свойством времени, а, скорее, собственным положением во времени. Пространство-время содержит все места и все времена, поэтому нет никакого *сейчас*, как нет и *здесь*. Так что в научном (но не в бытовом) отношении корректнее спросить: «Когда я?» Пространство-время подобно карте космической истории без отметки «Вы находитесь здесь». Если вам для ориентировки нужна такая отметка, я рекомендую пользоваться телефоном с часами и GPS-приемником.

Когда Эйнштейн писал, что различие между прошлым, настоящим и будущим – не более чем иллюзия, хотя и весьма навязчивая, он имел в виду, что эти понятия не имеют объективного смысла в пространстве-времени. На рис. 11.2 показано, что когда мы упоминаем о *настоящем*, то подразумеваем временное сечение пространства-времени, соответствующее моменту, когда мы об этом подумали. Мы называем *будущим* и *прошлым* части пространства-времени, расположенные выше и ниже этого сечения. Это аналогично тому, как вы пользуетесь словами «здесь», «передо мной» и «позади меня», чтобы указывать на разные части пространства относительно своего текущего положения. Часть, находящаяся перед вами, очевидно, не менее реальна, чем часть позади вас: в самом деле, если вы идете вперед, часть того, что сейчас находится перед вами, в будущем окажется позади вас, а сейчас оно находится позади многих других людей. Аналогично в пространстве-времени будущее столь же реально, как и прошлое – части пространства-времени, которые сейчас находятся в вашем будущем, окажутся в вашем прошлом. Поскольку пространство-время статично и неизменно, никакая его часть не может изменить статус своей реалистичности, так что все его части должны быть одинаково реальными⁷².

⁷² В книге «Скрытая реальность» Брайан Грин объясняет это еще доходчивее, отмечая, что, согласно эйнштейновской теории относительности, горизонтальный срез, отделяющий прошлое от будущего на рис. 11.2, наклоняется, если вы начинаете двигаться. Отсюда следует, что не может быть фундаментального различия между прошлым и будущим, поскольку взрыв далекой сверхновой можно превратить из уже случившегося в еще не произошедший, просто прибавив ходу на прогулке.

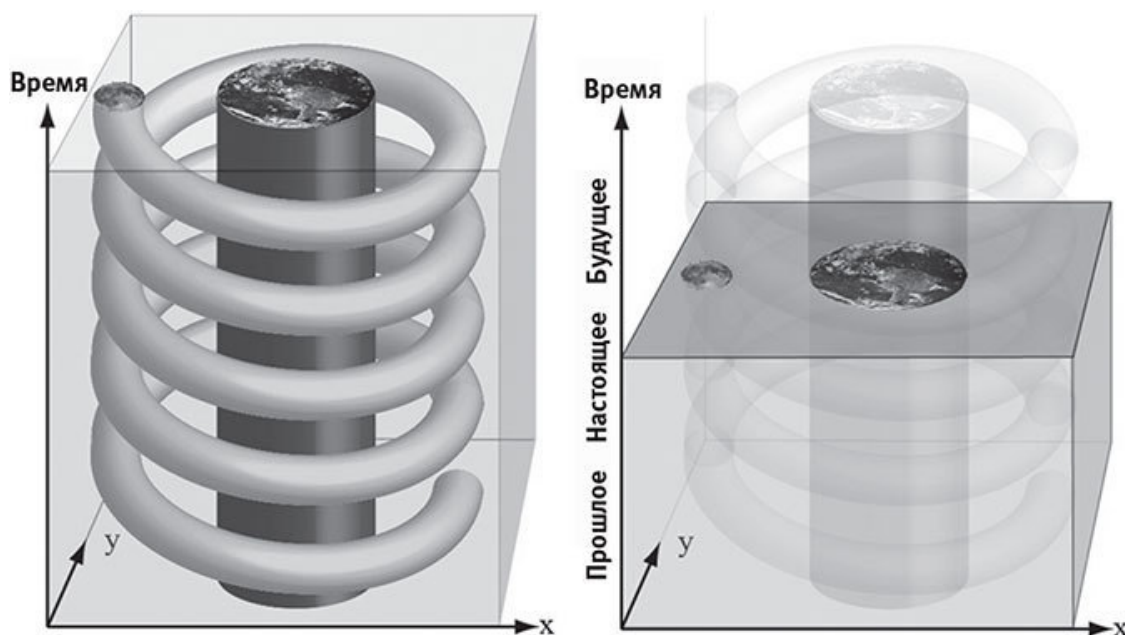


Рис. 11.2. Различие между прошлым, настоящим и будущим существует только с «лягушачьей» точки зрения (*справа*), но не с «птичьей», с которой воспринимается математическая структура (*слева*) – в последнем случае вы не можете спрашивать, который час, а только – в каком вы времени.

Итак, время – не иллюзия, однако течение времени иллюзорно. То же самое касается изменений. В пространстве-времени существует будущее, да и прошлое не исчезает. Когда мы объединяем эйнштейновское классическое пространство-время с квантовой механикой, мы получаем квантовые параллельные вселенные (гл. 8). Это означает, что существует много прошлых и будущих, и все они реальны, что не отменяет неизменную математическую природу полной физической реальности.

Так мне все это видится. Однако, хотя данное представление о неизменной реальности проверено временем и восходит к самому Эйнштейну, оно остается спорным и порождает оживленную научную дискуссию. Например, Брайан Грин в книге «Скрытая реальность» выражает тревогу из-за утраты фундаментального статуса таких понятий, как изменение и созидание: «Я предпочитаю думать, что существуют процессы, пусть даже гипотетические... которые, как нам представляется, приводят к возникновению этой мультивселенной»⁷³. Ли Смолин в книге «Возвращение времени» идет еще дальше и показывает, что не только изменения реальны, но время вообще может быть единственной реальной вещью. На противоположном краю спектра стоит Джулиан Барбур, обосновывающий в книге «Конец времени» не только иллюзорность изменений, но и возможность описывать реальность вообще без введения понятия времени.

Могут ли быть математическими пространство-время и «материя»?

Итак, пространство-время может рассматриваться как математическая структура. Но что можно сказать о материи, находящейся в пространстве-времени, скажем о книге, которую вы сейчас читаете? Как все это может быть частью математической структуры?

В последние годы мы видели, что разнообразные вещи, которые казались совершенно не связанными с математикой, например тексты, звуки, изображения, фильмы, представляются математически с помощью компьютеров и передаются по интернету в виде наборов чисел.

⁷³ Пер. под ред. В. Малышенко. – Прим. пер.

Присмотримся поближе к тому, как компьютеры это делают: природа делает нечто очень похожее, чтобы представить все окружающее нас вещество.

Я только что набрал на клавиатуре английское слово *word*, и лэптоп представил его в памяти последовательностью из четырех чисел: 119 111 114 100. Каждую строчную букву он передает числом, равным 96 плюс порядковый номер буквы в алфавите ($a = 97$, $w = 119$ и т. д.). Одновременно мой компьютер играл композицию *De Profundis* Арво Пярта, которая тоже представляется последовательностью чисел. Эти числа интерпретируются не как буквы, а как положения, которые должны занимать мембраны аудиоколонок в каждое из 44 100 различных мгновений каждой секунды, что, в свою очередь, вызывает колебания воздуха, которые мои уши и мозг интерпретируют как звук. Когда я нажал клавишу *w*, лэптоп воспроизвел на дисплее изображение *w*, также представленное числами. Хотя изображения на дисплее кажутся гладкими и непрерывными, в действительности он состоит из 1920×1200 пикселей, расположенных в виде прямоугольной сетки (рис. 11.3), и цвет каждого пикселя представляется тремя числами в диапазоне от 0 до 255 каждое, задающими интенсивность идущего от пикселя красного, зеленого и голубого света. Подходящее сочетание этих трех цветов позволяет воспроизвести все интенсивности всех цветов радуги. Прошлым вечером, когда мы с сыновьями смотрели видео с *Youtube*, лэптоп делил на пиксели не только два пространственных измерения дисплея, но и временное измерение, разбивая его на 30 кадров в секунду.

Физики часто моделируют в трехмерии некоторые явления вроде урагана, вспышки сверхновой или образования планетной системы. Для этого мы делим трехмерное пространство на трехмерные пиксели (*воксели*). Мы также делим четырехмерное пространство-время на четырехмерные воксели. Каждый четырехмерный воксел представляет, что происходит в соответствующем месте и времени с помощью группы чисел, кодирующих все, что имеет отношение к делу, скажем, температуру, давление, плотности и скорости различных веществ в вокселе. Например, при моделировании Солнечной системы воксел, соответствующий центру Солнца, будет содержать чрезвычайно большое число, выражающее температуру, а воксел за пределами Солнца, содержащий почти пустое пространство, будет иметь близкое к нулю число, выражающее давление. Числа в соседних вокселях удовлетворяют некоторым соотношениям, которые описываются математическими уравнениями, а когда компьютер выполняет моделирование, он, подобно игроку в sudoku, пользуется этими соотношениями, чтобы определять отсутствующие числа. Если компьютер готовит прогноз погоды, то пространственно-временные воксели, соответствующие настоящему моменту, заполняются измеренными значениями давления воздуха, температуры воздуха и т. д. Компьютер затем применяет соответствующие уравнения для вычисления значений, которые записываются в пространственно-временные воксели, соответствующие завтрашнему дню и остальным дням недели.

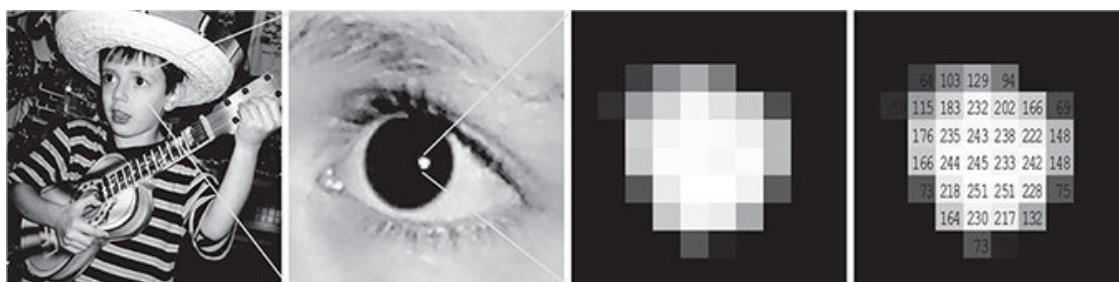


Рис. 11.3. Компьютеры обычно представляют полутоновые изображения, храня число для каждой точки (пикселя) фотографии (самая правая картинка). Чем больше число, тем выше интенсивность света от данного пикселя: 0 представляет черный цвет (нет ника-

кого света), а 255 – белый цвет. Подобным же образом так называемые поля в классической физике представляются в каждой точке пространства-времени числом, которое, грубо говоря, задает количество «материи», присутствующей в каждой точке.

Подобные симуляции, математически отображающие некоторые аспекты внешней физической реальности, делают это приближенно. Пространство-время, конечно, не состоит из грубых вокселей, которые применяются для моделирования погоды, и это одна из причин, по которой метеорологические прогнозы часто неточны. И все же мысль, что с каждой точкой пространства-времени связана группа чисел, весьма глубока, и, я думаю, она кое-что говорит нам не только о нашем описании реальности, но и о самой реальности. Одно из фундаментальных понятий современной физики, *поле*, устроено именно так: это нечто, представимое числами в каждой точке пространства-времени. Например, существует *поле температур*, соответствующее воздуху вокруг нас: в каждой точке имеется строго определенная температура, не зависящая от любых изобретенных человеком вокселей, и ее значение можно измерить с помощью термометра (или пальца, если не требуется высокой точности). Существует также *поле давления*: в каждой точке есть число, выражающее давление – его можно измерить барометром или своими ушами, которые начинают болеть, если это число сильно отклоняется от нормы, а также воспринимают звук, если давление колеблется во времени.

Сейчас известно, что ни то, ни другое поле не является истинно фундаментальным: они, по сути, показывают, как быстро в среднем движутся молекулы воздуха, и их числа перестают быть четко определенными, если попытаться измерить их в субатомных масштабах. Однако существуют другие поля, которые кажутся фундаментальными, образующими часть ткани нашей внешней физической реальности. *Магнитное поле* определяется не одним (как температура), а тремя числами в каждой точке пространства-времени, задающими его величину и направление. Вы, вероятно, измеряли магнитное поле с помощью компаса, наблюдая, как его стрелка устанавливается вдоль магнитного поля Земли, направленного к северу. Стрелка выравнивается быстрее, если магнитное поле сильнее – например вблизи магнитно-резонансного томографа. Другой пример – *электрическое поле*, которое также представляется тремя числами, задающими его величину и направление. Простой способ измерить его – по силе, с которой оно действует на заряженный объект, например, когда ваши волосы электрически притягиваются к пластмассовой расческе. Электрическое и магнитное поля можно элегантно объединить в *электромагнитное поле* (представляется шестью числами в каждой точке пространства-времени). Свет – это волны, бегущие по электромагнитному полю (гл. 7), и если наш физический мир – это математическая структура, то весь свет во Вселенной (который кажется нам физическим) связан с шестью числами в каждой точке пространства-времени (чисто математической сущностью). Эти числа подчиняются математическим соотношениям – уравнениям Максвелла (рис. 10.4).

Следует сделать оговорку: то, что я сейчас описал, соответствует пониманию электричества, магнетизма и света в классической физике. Квантовая механика усложняет картину (но не делает ее менее математической), заменяя классический электромагнетизм *квантовой теорией поля* – основанием всей современной физики элементарных частиц. В квантовой теории поля волновая функция задает степень, в которой является реальной любая возможная конфигурация электрического и магнитного полей. Волновая функция сама по себе математический объект, абстрактная точка в гильбертовом пространстве.

Квантовая теория поля утверждает (гл. 7), что свет состоит из частиц, называемых фотонами. Грубо говоря, числа, составляющие электрическое и магнитное поля, могут рассматриваться как информирующие о числе фотонов в каждый момент в каждом месте. Так же, как есть электромагнитное поле, напряженность которого соответствует числу фотонов

в каждый момент в каждом месте, существуют и другие поля, соответствующие прочим известным элементарным частицам. Например, напряженность электронного поля и напряженность кваркового поля связаны с числом электронов и кварков в каждый момент времени в каждом месте. В классической физике все движения всех частиц в пространстве-времени соответствуют набору чисел в каждой точке четырехмерного математического пространства – математической структуре. В квантовой теории поля волновая функция задает степень, в которой является реальной любая возможная конфигурация каждого из этих полей.

Физики еще не нашли математическую структуру, которая описывала бы все аспекты реальности, включая гравитацию (гл. 7). Но пока нет признаков того, чтобы теория струн или другой кандидат на роль такого описания был бы менее математическим, чем квантовая теория поля.

Описание или эквивалентность?

Прежде чем идти дальше, необходимо разобраться с важным семантическим моментом. Большинство моих коллег-физиков скажет, что внешняя физическая реальность (по крайней мере приближенно) *описывается* математикой. Я же утверждаю, что внешняя физическая реальность *является* математикой, точнее, математической структурой.

Все, о чем до сих пор шла речь в этой главе, предполагает, что нашу внешнюю физическую реальность можно описать математической структурой. Если в учебнике физики появится долгожданная «теория всего» (ТВ), ее уравнения будут полностью описывать математическую структуру, которая является внешней физической реальностью. Я использую здесь слово «является», а не «соответствует», поскольку, если две структуры эквивалентны, то (как подчеркивал израильский профессор Мариус Коэн⁷⁴) не существует осмысленного контекста, в котором они не являются одним и тем же. Вспомните мощное математическое понятие эквивалентности из гл. 10, которое охватывает самую суть математических структур: если два полных описания эквивалентны, то они описывают одну и ту же вещь⁷⁵. Это означает, что если некие математические уравнения описывают и нашу внешнюю физическую реальность, и математическую структуру, то наша внешняя физическая реальность и эта математическая структура есть одно и то же. И тогда верна гипотеза математической Вселенной: наша физическая реальность является математической структурой.

Вспомните, что две математические структуры эквивалентны, если можно попарно связать их сущности так, чтобы сохранялись все отношения. Если вы можете таким образом спарить каждую сущность нашей внешней физической реальности с соответствующей сущностью в математической структуре (например, «данное значение напряженности электрического поля в данной точке физического пространства соответствует данному числу в математический структуре»), то наша внешняя физическая реальность соответствует определению того, что значит быть математической структурой. Фактически она и есть эта математическая структура.

В гл. 10 мы видели, что если хочется избежать принятия гипотезы математической Вселенной, то можно отбросить гипотезу внешней реальности, утверждающую, что существует внешняя физическая реальность, полностью независимая от людей. Можно затем утверждать, что Вселенная почему-либо оказалась состоящей из материи, идеально описы-

⁷⁴ Cohen, Marius *On the Possibility of Reducing Actuality to a Pure Mathematical Structure*. Master's thesis, Ben Gurion University of the Negev, Israel, 2003.

⁷⁵ Если у вас есть математическая подготовка и вы знакомы с понятием изоморфизма, можете переформулировать это рассуждение следующим образом. Из определения математической структуры следует, что если существует изоморфизм между одной математической структурой и другой структурой (то есть взаимно однозначное соответствие между этими двумя структурами, сохраняющее отношения), то они представляют собой одно и то же. Если наша внешняя физическая реальность изоморфна математической структуре, то она, таким образом, подходит под определение математической структуры.

ваемой математической структурой, но она имеет и другие свойства, которые этой структурой не описываются и вообще не могут быть описаны абстрактным, свободным от «багажа», независимым от человека способом. Однако, думаю, эта точка зрения заставила бы перевернуться в гробу Карла Поппера (гл. 6), который подчеркивал: научные теории должны иметь наблюдаемые проявления. В то же время, поскольку математическое описание по нашему допущению является идеальным, отвечающим за все, что может наблюдаться, все дополнительные украшения, которые могли бы сделать нашу Вселенную нематематической, по определению не имели бы наблюдательных проявлений и поэтому были бы совершенно ненаучны.

Кто вы?

Итак, мы видим, что пространство-время и находящаяся в нем материя могут рассматриваться как часть математической структуры. Но что можно сказать о нас? Наши мысли, эмоции, самосознание и это глубокое экзистенциальное чувство *я существую* – ни одно из этих ощущений не является для меня ни в малейшей степени математическим. И все же мы сложены из элементарных частиц тех же типов, что и все остальное в нашем физическом мире, который является чисто математическим. Как все это увязать?

Я думаю, мы еще не вполне понимаем, что представляем собой. Более того, нам не требуется полностью раскрывать загадку сознания (гл. 9) для того, чтобы понять внешнюю физическую реальность. Тем не менее в современной физике есть соблазнительные возможности изучения самих себя.

«Коса» жизни

Георгий Гамов озаглавил автобиографию «Моя мировая линия». Этим выражением пользовался и Эйнштейн для обозначения пути по пространству-времени. Однако ваша собственная мировая линия, строго говоря, не является линией: она не прямая и имеет ненулевую толщину.

Рассмотрим сначала около 10^{29} элементарных частиц (кварков и электронов), из которых состоит ваше тело. Вместе они образуют в пространстве-времени трубкообразную фигуру, наподобие спиральной траектории Луны (рис. 11.1), но более сложную (ваши передвижения от рождения до смерти гораздо сложнее, чем у Луны). Так, если вы плаваете по дорожке в бассейне, часть вашей пространственно-временной трубки будет иметь зигзагообразную форму. А если вы носитесь по детской площадке, часть вашей пространственно-временной трубки будет напоминать серпантин.

Однако самое интересное свойство вашей пространственно-временной трубки – не многочисленные изгибы, а ее удивительно сложная внутренняя структура. В то время как частицы, составляющие Луну, скреплены более или менее жестко, многие из ваших частиц находятся в постоянном движении друг относительно друга.

Рассмотрим, например, частицы, которые составляют красные кровяные тельца (эритроциты). Каждый эритроцит прокладывает собственную уникальную трубку в пространстве-времени, соответствующую сложному маршруту по артериям, капиллярам и венам с регулярным возвращением к сердцу и легким. Пространственно-временные трубки эритроцитов переплетаются и образуют нечто, напоминающее косу, только гораздо более сложную, чем все виденное вами в парикмахерской. Обычная человеческая коса состоит из трех чередующихся прядей примерно по 30 тыс. волос каждая. А пространственно-временная «коса» сложена из триллионов «прядей» (по одной на эритроцит), переплетенных в никогда не повторяющемся орнаменте, и каждая «прядь» состоит из триллионов волосоподоб-

ных траекторий элементарных частиц. Иными словами, если представить, что вы потратите целый год, делая подруге по-настоящему сумасшедшую прическу и переплетая отдельные волосы, а не пряди, то паттерн все равно окажется гораздо проще.

И все же эта сложность блекнет в сравнении с паттернами обработки информации в мозге. Как говорится в гл. 8 и показано на рис. 8.7, у вас около 100 млрд нейронов, постоянно генерирующих электрические сигналы, которые приводят в движение миллиарды триллионов атомов (в основном ионов натрия, калия и кальция). Траектории этих атомов образуют в пространстве-времени чрезвычайно сложное переплетение, соответствующее запоминанию и обработке информации так, что возникает знакомое нам чувство самосознания. В научном сообществе есть широкое согласие относительно того, что мы еще не понимаем, как это работает. Поэтому следует признать, что мы не вполне понимаем, что собой представляем. В общих чертах можно сказать: *вы – паттерн в пространстве-времени*. Математический паттерн. Пространственно-временная «коса», одна из сложнейших.

Для некоторых людей эмоционально неприемлемо думать о себе как о коллекции частиц. Действительно, лет в двадцать я здорово поржал, когда мой друг Эмиль, пытаясь задеть моего друга Мэтса, обозвал его *atomhög*, по-шведски «атомная куча». Однако если кто-то скажет: «Не могу поверить, что я просто куча атомов!» – я обращаю его внимание на использование слова «просто»: сложнейшая пространственно-временная «коса», которая соответствует сознанию, бесспорно, является самым красивым из сложных паттернов в нашей Вселенной. Пространственно-временной паттерн самого быстрого из компьютеров, или Большого Каньона, или даже Солнца, гораздо проще.

В то время как многие частицы внутри вас находятся в постоянном сложном движении, отвечающем за жизнедеятельность, движения других гораздо проще, в их числе, например, те, которые составляют кожу, не позволяющую остальным частицам разлететься. Это значит, что ваша пространственно-временная трубка чем-то похожа на электрические кабели, внутри которых жилы переплетены, а снаружи укрыты изоляцией в виде полых трубки. Более того, многие из ваших частиц регулярно заменяются. Например, около 3/4 веса вашего тела приходится на молекулы воды, которые заменяются примерно каждый месяц, а клетки кожи и эритроциты заменяются каждые несколько месяцев. В пространстве-времени траектории частиц, присоединяясь, а затем покидая ваше тело, создают паттерн, напоминающий волосатый початок кукурузы. На двух концах вашей пространственно-временной «косы», соответствующих рождению и смерти, нити постепенно разделяются, что соответствует частицам, которые сначала к вам присоединяются, взаимодействуют и в конце концов уходят своим собственным путем (рис. 11.4, справа). Это делает пространственно-временную структуру жизни похожей на дерево. В нижней части, соотносимой с ранним периодом, находится сложная система корней, отвечающая пространственно-временным траекториям множества частиц. Те постепенно объединяются в толстые сплетения и в конце концов образуют единую трубообразную магистраль, соответствующую вашему нынешнему телу (внутри которого описанная выше «коса»). На вершине, соотносимой с поздним периодом, магистраль разделяется на все более тонкие ветви, соответствующие вашим частицам, уходящим своими путями, когда ваша жизнь заканчивается. Иными словами, паттерн жизни имеет лишь конечную протяженность во временном измерении, и «коса» на обоих концах расплетается на «локоны».

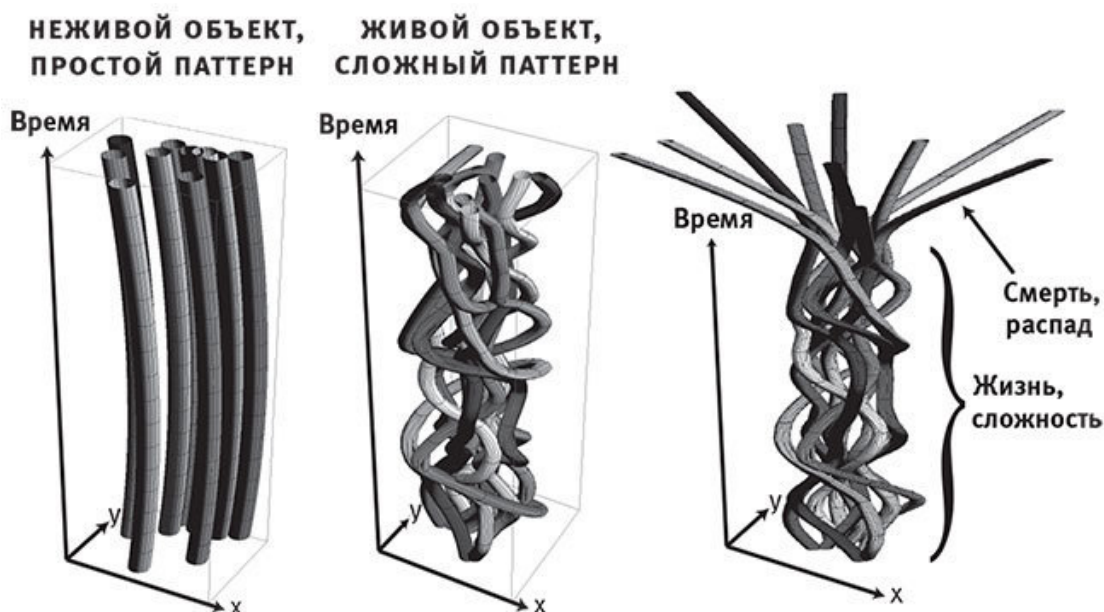


Рис. 11.4. Сложность – отличительный признак жизни. Движению объекта соответствует паттерн в пространстве-времени. Неживой комок из десяти частиц, ускоряемый влево, порождает простой паттерн (*слева*), тогда как частицы, составляющие живой организм, образуют сложный паттерн (*посередине*), соответствующий сложному движению, реализующему обработку информации и другие жизненные процессы. Когда живой организм умирает, он в конце концов разлагается, и его частицы отделяются друг от друга (*справа*). На этих иллюстрациях показано всего 10 частиц. Наш собственный пространственно-временной паттерн включает около 1029 частиц, и он умопомрачительно сложен.

Все обсуждавшиеся здесь паттерны существуют, конечно, в четырех измерениях, а не в трех, и метафоры с косами, кабелями и деревьями не должны восприниматься слишком буквально. Основная мысль проста: вы можете быть неизменным паттерном в пространстве-времени – детали не так важны для идей, которые мы обсуждаем. Этот паттерн является частью математической структуры, представляющей собой нашу Вселенную, а отношения между частями этого паттерна задаются математическими уравнениями. Эвереттовская квантовая механика наделяет (*гл. 8*) вас более интересной (но не в меньшей степени математической) структурой, поскольку вы как единое существо (ствол дерева) можете разделяться на множество ветвей, и каждая ощущает себя единым и неповторимым существом.

Проживая мгновение

Итак, пространство и материя в нем могут быть частью математической структуры. Даже мы сами можем быть ее частью. Но всему есть цена: мы пожертвовали привычным чувством течения времени, признав его иллюзией, и вместо этого считаем время четвертым измерением в неизменной математической структуре. Но как примирить это с нашим субъективным опытом, свидетельствующим о том, что вещи от мгновения к мгновению изменяются?

Ваше субъективное восприятие существует в пространстве-времени, как все сцены кинофильма собраны на дивиди. В частности, пространство-время содержит большое число косицеобразных паттернов, отвечающих субъективным восприятиям как в разных местах (соответствующих разным людям), так и в разное время. Будем называть каждое такое восприятие *наблюдательным мгновением*. В статье о математической Вселенной (1996) я предложил другое название, однако «наблюдательное мгновение» нравится мне больше, а Ник

Бострем и другие философы в последние годы популяризовали его. Из собственного опыта вам известно, что некоторые наблюдательные мгновения ощущаются как связанные, образующие непрерывную последовательность, соответствующую тому, что вы называете своей жизнью. Однако это ощущение приводит к непростым вопросам. *Как устроена эта связь?* Существуют ли правила, определяющие, какие наблюдательные мгновения кажутся связанными, и почему связанные последовательности наблюдательных мгновений субъективно ощущаются как течение времени?

Очевидная догадка – эта связь имеет отношение к непрерывности: два наблюдательных мгновения ощущаются как связанные, если они соседствуют в пространстве и времени, а также являются частью одного паттерна. Однако рис. 11.5 демонстрирует, что этот вопрос сложнее, чем кажется. Во-первых, наблюдательное мгновение v , соответствующее моменту, когда я проснулся, ощущается связанным с наблюдательным мгновением b , которое соответствует моему засыпанию. А именно, мне кажется, что v является продолжением b , несмотря на то, что эти два наблюдательных мгновения вовсе не соседствуют в пространстве и времени. Во-вторых, имеется множество других наблюдательных мгновений (соответствующих восприятиям других людей, находящихся со мной на борту), которые гораздо ближе к v как в пространстве, так и во времени. Так почему бы v не ощущаться связанным с одним из их наблюдательных мгновений? В-третьих, представьте себе моего идеального клона, созданного, пока я спал. У него все частицы находятся в тех же конфигурациях, за исключением того, что он находится на борту другого такого же самолета. Тогда субъективное восприятие клона после пробуждения будет субъективно идентичным тому, что было у меня в точке v , то есть по определению оно будет ощущаться связанным с b , несмотря на отсутствие связи паттернов в пространстве и времени⁷⁶.

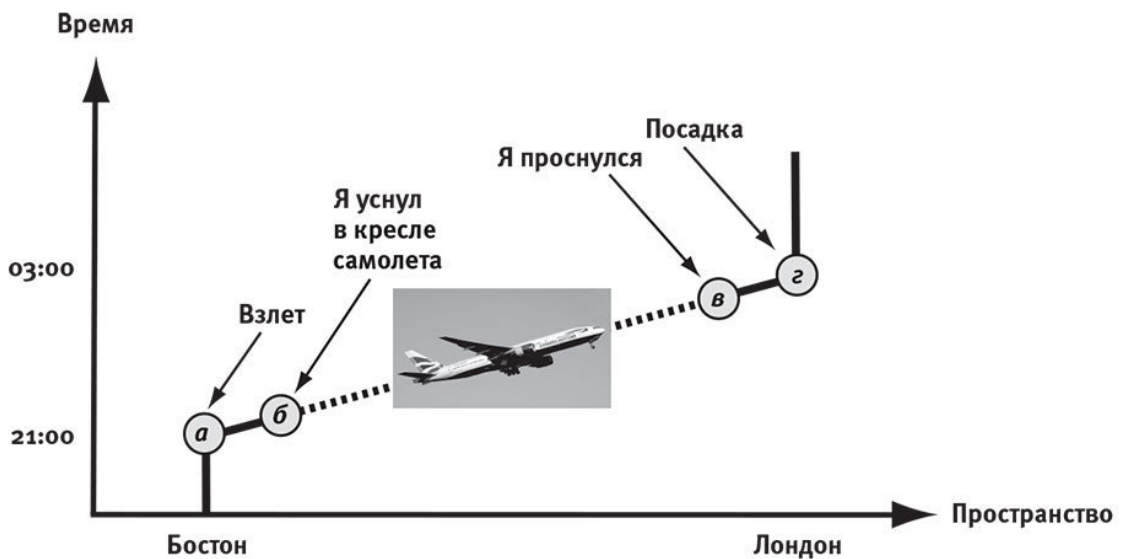


Рис. 11.5. Моя мировая линия при полете в Лондон. Вскоре после взлета (a) я уснул (b) и проснулся (v) незадолго до посадки (z). Несмотря на то, что мое сознательное восприятие в точке v отстоит от того, что было в точке b как в пространстве, так и во времени, все равно кажется, что оно непрерывно связано с моим последним сознательным восприятием в точке

⁷⁶ Если бы инструкция по сборке моего клона передавалась по беспроводной связи от сканера тела, который анализировал мой оригинал, то пространственно-временные «косы» – моя и клона – оказались бы по-прежнему связанными очень сложной структурой в электромагнитном поле. Но моя идентичная копия, пробуждающаяся в мультиверсе I уровня из гл. 6, тоже будет чувствовать связь с точкой v , хотя никакой информации между этими двумя копиями не передавалось.

\bar{b} , а не с множеством других сознательных восприятий (принадлежащих моим попутчикам), которые гораздо ближе к b , чем к \bar{b} , как в пространстве, так во времени.

Это наводит на мысль, что соображения непрерывности – ложный след и что попросту не существует никакого еще не открытого физического процесса, который вызывал бы ощущение связанности некоторых наблюдательных мгновений, объясняя тем самым знакомое нам ощущение течения времени. К счастью, существует более простое объяснение, не требующее никакой новой физики. Гипотеза математической Вселенной в сочетании с нашим субъективным опытом подразумевает, что в пространстве-времени существуют очень сложные косицеобразные структуры, обладающие самосознанием и субъективно воспринимающие наблюдательные мгновения. Мы знаем, что эти структуры могут быть хорошо локализованы как в пространстве, так и во времени: мозг занимает объем всего около литра, а время, требующееся ему для отдельной мысли или ощущения, составляет обычно около десятой доли секунды плюс-минус порядок величины. Это означает, что субъективное восприятие наблюдательного момента зависит только от того, что находится прямо здесь, в небольшой области пространства-времени, а не от чего-либо отдаленного в пространстве (такого, как внешняя реальность, которую вы видите вокруг) или во времени (вроде пережитого вами несколько секунд назад). Вместе с тем важнейшим элементом сознательного восприятия является следующее: прямо сейчас вы воспринимаете и тот факт, что перед вами эта книга, и фразу, которую прочли пять секунд назад, несмотря на то, что ни книга, ни фраза не принадлежат малой области пространства-времени, составляющей ваше настоящее наблюдательное мгновение. Иными словами, вам кажется, будто способ, каким вы ощущаете свои наблюдательные мгновения, задействует нечто, находящееся в отдалении и в пространстве, и во времени – хотя влияние ни того, ни другого не допускается. Как это возможно?

Обсудив пространственную часть этого парадокса (гл. 9), мы пришли вот к чему: сознание наблюдает не внешний мир, а, скорее, детализированную модель реальности в мозге. Эта модель непрерывно обновляется за счет данных, поступающих от органов чувств, следящих за внешним миром⁷⁷. Так что пространственно-временной паттерн, отвечающий вашему текущему наблюдательному мгновению, включает мгновенное состояние вашей модели реальности. Как показано на рис. 11.6, аналогично дело обстоит и с временной частью: ваша модель мира включает не только информацию о текущем состоянии окружения, но и память о том, каким оно было. Каждый из восьми фрагментов фильма представляет собой наблюдательное мгновение. Для каждого есть четкий образ того, что происходит сейчас, и все более туманные воспоминания о том, что происходило в прошлом. Таким образом, всю последовательность событий во времени вы осознаете прямо сейчас. Модель пространственной реальности дает субъективное ощущение видения трехмерного пространства, хотя сознание имеет дело с моделью реальности в мозге. Модель временной реальности с последовательностью воспоминаний дает субъективное ощущение протекания последовательности событий во времени, несмотря на то, что сознание имеет дело лишь с моделью реальности в мозге в одно-единственное наблюдательное мгновение.

⁷⁷ Подробное обсуждение восприятия времени и богатую философскую литературу по этой теме за два тысячелетия можно найти по ссылке: <http://plato.stanford.edu/entries/time-experience>. В частности, та идея, что ключевые аспекты восприятия времени, вроде длительности, могут быть объяснены лишь как восприятия нашей памяти, рассматривалась около 1600 лет назад Августином. Гипотеза математической Вселенной вновь актуализирует подобные вопросы.

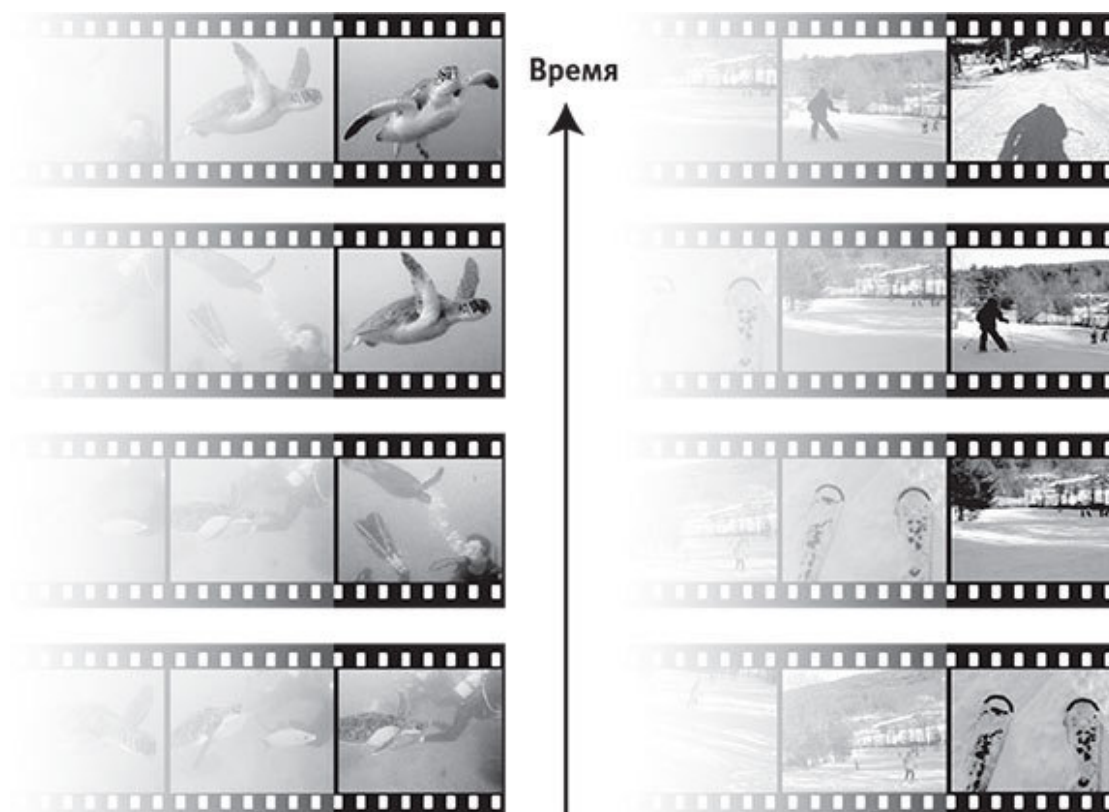


Рис. 11.6. Субъективное восприятие пространства-времени (наблюдательные мгновения) дайвера и лыжника в четыре отдельных момента времени. Каждый отрезок фильма соответствует одному наблюдательному мгновению и включает ясное изображение того, что происходит в данный момент, а также все более туманные воспоминания о том, что происходило в прошлом. Если я перемешаю случайным образом эти восемь отрезков, вы легко сможете восстановить последовательность, опираясь на связи между ними: текущее зрительное впечатление (правый кадр) в некоторые наблюдательные мгновения совпадает с воспоминаниями в другие мгновения.

Иными словами, субъективное ощущение того, что время течет, возникает из отношений между воспоминаниями, которые есть у вас прямо сейчас. Представьте мысленный эксперимент, в котором мой идеальный клон создан спящим вместе со всеми моими воспоминаниями, а затем разбужен ровно настолько, чтобы воспринять одно-единственное наблюдательное мгновение. Он все равно почувствовал бы, что время течет из сложного и интересного прошлого, хотя сам он мог воспринять лишь одно мгновение. И это означает, что субъективные восприятия длительности и изменений являются квалиа — базовыми непосредственными восприятиями вроде красноты, голубизны или сладости.

Указанное следствие из гипотезы математической Вселенной весьма радикально. Пожалуйста, сделайте паузу, чтобы хорошенько его обдумать. То, что вы осознаете в этот момент, ощущается не как фотография, а как видеоклип. Кино не является реальностью — оно существует только у вас в голове, это часть вашей модели реальности. В нем много информации об актуальной внешней физической реальности (если только вы не спите и не галлюцинируете), но все равно это лишь отредактированная версия реальности, вроде вечерних теленовостей, в основном состоящая из определенных деталей в пространственно-временных окрестностях, которые ваш мозг считает полезным осознавать.

При просмотре теленовостей вы не наблюдаете непосредственно отдаленные области пространства, а смотрите отредактированное кино *об* этих областях. Подобным образом

вы наблюдаете не прошлое, а отредактированное кино *об* этом прошлом. Но, в отличие от просмотра новостей в течение нескольких минут, вы видите свою внутреннюю кинохронику *всю сразу*, одновременно осознавая настоящие и прошлые события. Секунду спустя вы вновь видите свою внутреннюю кинохронику *всю сразу*, и по большей части она остается неизменной, как повторный выпуск теленовостей, но с некоторыми монтажными изменениями: добавлена секунда свежего материала в конце и немного сокращено остальное. То есть, несмотря на то, что наблюдательное мгновение объективно занимает менее 1 литра и 1 секунды, субъективно оно ощущается так, как если бы занимало все пространство, которое вы осознаете, и все время, которое вы помните. Вы ощущаете, будто здесь и сейчас наблюдаете это пространство и время, но они являются лишь составляющими модели реальности, которую вы воспринимаете. Вот почему вы субъективно чувствуете, что время течет, хотя этого не происходит.

Самосознание

Вы также присутствуете в этом кино: ваша модель реальности включает и модель себя. Вот почему вы не только сознаете, но также самосознаете. Когда вы чувствуете, что смотрите в книгу, в действительности происходит следующее: модель реальности в мозге содержит модель вас, смотрящего в модель этой книги (*рис. 11.7*). Это приводит к фундаментальному для проблемы сознания вопросу: кто смотрит на модель реальности вашего мозга, чтобы породить субъективное осознание? Мое предположение – *никто!* Если бы существовала другая часть вашего мозга, которая действительно смотрела бы на модель реальности в целом и осознавала бы всю эту информацию, то такая область мозга должна была бы физически перемещать эту информацию в собственную локальную копию. С эволюционной точки зрения это было бы пустой тратой ресурсов, и нейрофизиологические исследования не обнаруживают никаких признаков такого масштабного дублирования. Более того, это все равно не дало бы ответа на вопрос: если наблюдатель действительно необходим, то дублированная модель реальности, в свою очередь, нуждалась бы в наблюдателе, чтобы быть субъективно воспринимаемой, а это вело бы к еще одной проблеме бесконечного регресса.

Напротив, я считаю, что мой ответ красив своей простотой: никакого наблюдателя не требуется, поскольку ваше сознание, по сути, и *есть* ваша модель реальности. Я думаю, что *сознание – это способ, каким информация ощущает то, что она подвергается обработке определенными сложными методами*. Поскольку различные отделы мозга взаимодействуют друг с другом, различные части вашей модели реальности тоже могут взаимодействовать, так что ваша модель себя может взаимодействовать с моделью внешнего мира, порождая субъективное ощущение, что первое воспринимает второе. Когда вы смотрите на клубнику, ваша модель красного цвета ощущается субъективно совершенно реальной, и то же самое происходит с вашей моделью вашего мысленного взора с определенной наблюдательной позиции. Мозг удивительно изобретателен в интерпретации базовых типов электрических сигналов в пучках нейронов в качестве квалиа, которые субъективно ощущаются как различные. Мы воспринимаем их как цвета, звуки, запахи, вкусы или прикосновения в зависимости от того, приходит пучок нейронов от глаз, ушей, носа, рта или кожи. Ключевое различие не в нейронах, передающих информацию, а в схемах их соединения. Хотя ваше восприятие себя и восприятие вами клубники различны, правдоподобно предположение, что на фундаментальном уровне и то, и другое однотипные вещи – сложные паттерны в пространстве-времени. Иначе говоря, я утверждаю, что ваше восприятие себя, то есть наблюдательной площадки, которую вы называете «я», – это квалиа, как и субъективное восприятие «красного» или «зеленого».



Рис. 11.7. Я думаю, что сознание – это способ, каким информация ощущает то, что она подвергается обработке определенными сложными методами и что конкретный тип сознания, который субъективно воспринимаем мы, возникает, когда модель себя в вашем мозге взаимодействует с моделью мира в том же мозге. Стрелки вверх показывают информационные потоки. Например, информация, непрерывно поступающая от органов чувств, помогает вашей модели мира следить за внешней реальностью. А информация, выводящаяся через моторную кору больших полушарий головного мозга, управляет мышцами, чтобы влиять на внешнюю реальность, например, переворачивая страницы этой книги.

Предсказание будущего

Одна из ключевых целей науки и, на самом деле, одна из ключевых функций мозга состоит в предсказании будущего. Но если время не течет, то что мы подразумеваем под предсказанием нашего будущего?

На рис. 11.6 показано, как можно переформулировать этот чувствительный вопрос без упоминания об изменениях или потоке времени. Восемь представленных наблюдательных мгновений принадлежат двум людям. Первый занимается дайвингом, а второй горными лыжами, и каждому человеку соответствует длинный косицеобразный паттерн в пространстве-времени. При сравнении этих восьми наблюдательных мгновений между ними обнаруживаются интересные отношения: текущее визуальное впечатление (правый кадр в каждом фрагменте) определенного наблюдательного мгновения совпадает со свежей памятью (средним кадром) других, а эти свежие воспоминания отчасти совпадают с более старой памятью (левый кадр) других наблюдательных мгновений. Так уникальным образом определяются две временные последовательности, соответствующие левому и правому столбцам. Фрагменты, соответствующие более поздним моментам времени, на рисунке расположены выше.

Рассмотрим все наблюдательные мгновения во всем пространстве-времени. *Вашими будущими восприятиями* естественно называть те, которые, стыкуясь друг с другом, подобно пазлу, соединяются с вашим настоящим наблюдательным мгновением. В частности, все они должны содержать ваши текущие воспоминания в правильном порядке (с разумными поправками на забывчивость и ошибки памяти), дополненные соответствующими воспоминаниями. Допустим, вы дайвер, только что заметивший гигантскую черепаху, плыву-

щую вправо (рис. 11.6, левая колонка, второе наблюдательное мгновение сверху), и хотите предсказать свое будущее. В порядке мысленного эксперимента допустим также, что вы бесконечно умны, знаете, какова математическая структура Вселенной, рассчитали все ее наблюдательные мгновения и как они субъективно воспринимаются. Вы понимаете, что единственное из них, которое совпадает с вашим текущим наблюдательным мгновением и содержит дополнительную секунду восприятия в конце – это наблюдательное мгновение на рисунке вверху слева. Таким образом, вы предсказываете, что именно это вы и будете воспринимать через секунду: вы должны увидеть секунду спустя, как гигантская черепаха повернет к вам. Тут-то вы и вспоминаете о привычном научном понятии причинности: именно так, исходя из настоящего, будущее и предсказывается.

Где вы? И что вы воспринимаете?

Теперь мы видим, как физическая реальность, включающая пространство, время, материю и вас самих, может быть математической структурой. Мы также видим, как вы, по крайней мере в принципе, могли бы предсказывать свое будущее, анализируя наблюдательные мгновения и соединяя их, как детали пазла. Для практического предсказания событий этот подход от наблюдательных мгновений часто упрощают до «обычной физики». Предположим, например, что вы осуществляете эксперимент, показанный на рис. 10.2, подбрасывая баскетбольный мяч и изучая его движение. Если допустить, что 1) это движение описывается эйнштейновскими уравнениями гравитации и 2) не существует другой личности, чье субъективное восприятие было бы точно таким, как ваше, точно с такими же воспоминаниями, то вам известно, что лишь такие будущие наблюдательные мгновения гладко соединяются с вашим настоящим. В настоящем вы видите мяч летящим по параболической траектории, как показано на рисунке, и именно это, согласно вашему предсказанию, вы будете воспринимать. Как вы узнали, что это будет парабола, а не другая фигура, скажем, спираль? Путем решения уравнений Эйнштейна и получения параболы в качестве результата.

И вновь о предсказании будущего

Мы видели, однако, что второе предположение скорее всего ложно: если существует мультиверс I или III уровня, то есть другие люди, которые субъективно ощущают то же самое, что и вы, значит, проблема предсказания вашего будущего становится гораздо интереснее. Я проявил нерешительность, выбрав подзаголовок «Где вы? И что вы воспринимаете?», поскольку хотел сформулировать вопрос так, чтобы слово «вы» воспринималось в множественном смысле. Как видите, это довольно хитрая задача, когда число вас увеличивается или уменьшается.

Продолжим мысленный эксперимент, в котором вы знаете все о математической структуре, в которой живете. Тогда предсказание вашего будущего распадается на три шага:

1. Найдите в этой структуре все самосознающие сущности.
2. Выясните, что они субъективно воспринимают, чтобы узнать, какая из этих сущностей может быть вами, и что они будут воспринимать в будущем.
3. Предскажите, что вы будете субъективно воспринимать в будущем (вероятности для различных вариантов).

Забавно, что все три шага включают крайне далекие от разрешения проблемы.

В поисках самосознания

Если имеется некая математическая структура, которая является нашей внешней физической реальностью, возможно, включающей мультиверс, то как найти в ней все самосозна-

ющие сущности? Выше обсуждалось, что мы соответствуем некоторым сложным косицеобразным структурам в пространстве-времени. Однако не хочется ограничивать исследование самосознания только нашей формой жизни, так что будем использовать более общий термин *самосознающая структура* (ССС) для обозначения любой части математической структуры, которая обладает субъективным восприятием. В качестве синонима мы пользуемся словом «наблюдатель», но, чтобы избежать антропоцентризма, везде, где необходимо упомянуть нас самих, мы будем писать: СССР.

Как найти СССР в математической структуре? Краткий ответ, очевидно, таков: этого мы еще не знаем. Наука попросту недостаточно развита для этого. Мы даже не можем ответить на все вопросы о таком частном аспекте, с которым мы отлично знакомы, – о нашем пространстве-времени. Во-первых, мы не знаем, в какой математической структуре мы живем, поскольку пока нет самосогласованной модели квантовой гравитации. Во-вторых, даже если бы мы знали свою математическую структуру, мы не знали бы, что делать, чтобы найти в ней СССР.

Представьте, что дружелюбный инопланетный пришелец подарил вам «детектор СССР»: похожее на металлоискатель мобильное устройство, издающее громкий сигнал всякий раз, когда обнаруживает СССР. Вы повозились с ним и обнаружили, что он чуть слышно попискивает, если направить его на аквариумную рыбку, звучит громче, если направить его на кота, и похож на пронзительную сирену, когда нацелен на вас, но при этом он молчит, будучи направлен на огурец, на автомобиль или на труп. Как работал бы такой детектор?

Хотя минималистичное руководство пользователя, приложенное к детектору СССР, постоянно ссылается на «патентованный алгоритм», я предполагаю, что часть его работы состоит в измерении сложности и информационного содержания объекта, на который его направляют. *Сложность* какого-либо объекта обычно определяется как наименьшее число битов, которое требуется для полного его описания (бит – это либо 0, либо 1). Например, бриллиант, который можно описать как 10^{24} атомов углерода, организованных в форме строго регулярной кристаллической решетки, обладает очень низкой сложностью по сравнению с жестким диском, на котором записан терабайт случайных чисел, так как последний нельзя описать менее чем терабайтом (около 8×10^{12} битов) информации. И все же ваш жесткий диск гораздо менее сложен, чем мозг, для описания лишь состояния синапсов которого требуется более 100 квадриллионов (10^{17}) битов информации.

Тем не менее жесткий диск не будет обладать самосознанием, каким бы емким он ни был, так что одной только сложности недостаточно для создания СССР. Я предполагаю, что еще одной величиной, которую измеряет детектор СССР, является *информационное содержание* объекта. В математике и физике существует строгое определение информационного содержания, восходящее к работам Клода Шеннона и Джона фон Неймана. В то время как сложность объекта измеряется тем, насколько трудно его описать, информационное содержание⁷⁸ характеризует то, в какой мере он описывает остальной мир. Иными словами, информация – это мера *смысла*, который содержится в сложности. Если заполнить жесткий диск случайными числами, он не будет содержать никакой информации о внешнем мире, но если вы заполните его книгами по истории или семейными видеозаписями, такая информация на нем будет. Ваш мозг содержит огромное количество информации о внешнем мире – и в форме воспоминаний об отдаленных во времени и пространстве событиях, и в виде непрерывно обновляемой модели того, что происходит вокруг вас прямо сейчас. Когда человек умирает, информационное содержание электрических схем возбуждения его нейро-

⁷⁸ То, что я обычно называю информационным содержанием, в более строгой терминологии называется взаимной информацией объекта и остального мира.

нов исчезает, поскольку вся эта электрическая система выключается, а вскоре начинает исчезать и информация, которая хранится в химической и биологической форме в его синапсах.

Но сложности и информационного содержания по-прежнему недостаточно, чтобы гарантировать самосознание: у видеокамеры есть и то, и другое, но самосознанием в каком-либо смысле она не обладает. Это означает, что детектор ССС должен распознавать дополнительные ингредиенты самосознания, понять которые труднее. Например, на рис. 11.7 предполагается, что ССС должна быть способна не только хранить информацию, но также обрабатывать ее с помощью какого-то рода вычислений, и что в ходе этой обработки может потребоваться высокая степень внутренней взаимосвязанности. Нейропсихолог Джулио Тонони выдвинул интересную идею, как дать численную оценку требуемой взаимосвязанности. Ключевая идея состоит в том, что для появления сознания у системы обработки информации она должна быть интегрирована в единое целое, которое нельзя разделить на почти независимые части⁷⁹. Это означает, что все части должны заниматься вычислениями совместно, обладая большим количеством информации друг о друге. В противном случае получится более одного независимого сознания, как в комнате, заполненной людьми, или, возможно, в двух половинах мозга пациента с рассеченным мозолистым телом. Если же практически независимые части слишком просты, то никакого сознания не будет, как у независимых пикселей видеокамеры.

Физики и химики обнаружили, что при группировке большого количества атомов их коллективное поведение зависит от способа их организации. Основное различие между твердым телом, жидкостью и газом состоит не в типе атомов, а в том, как они связаны между собой. Я думаю, что однажды мы поймем: сознание – это еще одно фазовое состояние материи. Предполагаю, что должно быть много типов сознания, подобно тому, как существует много типов жидкости, при этом все вариации обладают общими чертами.

В качестве маленького шага к пониманию сознания рассмотрим *память*. Какими чертами она обладает? Чтобы вещество было полезным для хранения информации, оно, очевидно, должно обладать обширным репертуаром возможных долгоживущих состояний. Это свойство есть у твердых тел, но не у жидкостей и газов: если выгравировать имя на золотом кольце, оно сохранится на нем спустя много лет, но если написать его на поверхности пруда, через секунду, как только вода изменит форму, информация исчезнет. Другая желательная черта вещества памяти состоит в том, чтобы из нее было не только легко читать (как с золотого кольца), но и легко в нее записывать: для изменения состояния жесткого диска или ваших синапсов нужно меньше энергии, чем для гравирования по золоту.

Какими свойствами должен обладать «компьютроний» – самого общего рода материал, способный обрабатывать информацию? В отличие от золота, он должен демонстрировать сложную динамику, чтобы его будущие состояния сложным – и, надеюсь, контролируемым (программируемым) образом – зависели от его текущего состояния. Организация его атомов должна быть не настолько жестко упорядоченной, как в твердом теле, где не происходит никаких интересных изменений, но более упорядоченной, чем в жидкости или газе. На макроскопическом уровне «компьютроний» не обязательно должен быть очень сложным: специалисты по информатике показали, что устройство, способное выполнять некий базовый набор логических операций, является *универсальным*, и при наличии достаточного времени

⁷⁹ Это тесно связано с так называемой избыточностью и кодами коррекции ошибок, которые используются в штрих-кодах и жестких дисках, мобильной телефонии и других современных информационных технологиях: вы используете больше минимально необходимого числа битов так, что они совместно кодируют информацию образом, исключаяющим ее потерю, даже если вы утратите значительную часть своих битов. Наш мозг, похоже, использует подобную избыточную архитектуру, поскольку он, по-видимому, не зависит критически ни от одного конкретного нейрона и продолжает нормально работать, даже если заметная часть нейронов погибает. Возможно, причиной возникновения сознания стало то, что такая избыточность дает эволюционные преимущества.

и памяти его можно запрограммировать на выполнение тех же вычислений, что и любой другой компьютер.

А что можно сказать о «персептронии» – материале, обладающем субъективным самосознанием? Если Тонони прав, «персептроний» должен обладать не только всеми чертами «компьютрония», но и свойством информационной неделимости, образуя единое целое. Так что когда наш детектор ССС анализирует помещение, заполненное атомами, он сначала выясняет, какие из них сильно связаны между собой, и разделяет связанные атомы на группы объектов, скажем скамейку с двумя людьми на ней. Затем он идентифицирует части этих объектов, которые удовлетворяют критериям «компьютрония»: скажем, два мозга и два процессора мобильных телефонов. Наконец, детектор определит, что «персептроний» присутствует лишь в двух мозгах и что это два образования, которые не связаны друг с другом, и каждое соответствует сознанию человека.

Вычисление внутренней реальности: чему нас учит история?

Следующий шаг после обнаружения самосознающей сущности с помощью детектора ССС состоит в вычислении ее субъективных восприятий. Говоря языком гл. 9, мы хотим вычислить внутреннюю реальность по внешней. Это серьезный вызов, и в этой области у нас очень мало опыта, поскольку исторически физика концентрировалась на противоположной задаче: при том, что у нас есть субъективные восприятия, мы искали математические уравнения, способные их описать. Так, Ньютон наблюдал движение Луны и пришел к закону гравитации, который его объясняет. Тем не менее я считаю, что из истории физики можно извлечь много важных уроков о том, как связаны внутренняя реальность и внешняя реальность. Далее разобраны семь таких примеров.

Без паники!

Хотя эта трудная задача пока не решена, в гл. 9 мы увидели, что удобно разделить ее на две части. Физики могут ограничиться тем, чтобы, начав с внешней реальности, предсказывать консенсусную реальность, относительно которой придут к согласию все разумные наблюдатели, а поиски внутренней реальности останутся нейрофизиологам и психологам. Ниже мы убедимся, что для большинства хитрых вопросов, касающихся предсказания будущего, различия между консенсусной и внутренней реальностями несущественны. Более того, история физики дает нам ряд полезных примеров. Так, для классической механики, общей теории относительности и квантовой механики мы знаем и основные уравнения, и то, как ощущается жизнь под их управлением.

Мы воспринимаем то, что устойчиво

В течение жизни мы многократно заменяем большую часть нашего «железа» (т. е. клеток нашего тела) и «софта» (т. е. воспоминаний). Тем не менее мы воспринимаем себя как устойчивых и неизменных. Аналогично мы воспринимаем объекты, отличные от нас, как долговременно существующие. Точнее, то, что мы воспринимаем как объекты, – это такие аспекты мира, которые демонстрируют определенное постоянство. Например, наблюдая океан, мы воспринимаем движущиеся волны как объекты, поскольку они проявляют определенное постоянство, несмотря на то, что вода сама по себе лишь покачивается. Подобным образом (гл. 8) мы воспринимаем лишь очень устойчивые в отношении квантовой декогеренции аспекты мира.

Мы воспринимаем себя локализованными

Теория относительности и квантовая механика показывают, что вы воспринимаете себя локализованно, даже когда это не так. Несмотря на то, что во внешней реальности общей

теории относительности вы представляете собой косицеобразную структуру в статическом четырехмерном пространстве-времени, вы тем не менее воспринимаете себя локализованным в определенном месте и времени в трехмерном пространстве, где происходят события. Ваши основные восприятия – это наблюдательные мгновения, и каждое соответствует определенной локализованной части вашей косицеобразной структуры, а не ей целиком, то есть не всей вашей жизни.

Мы кажемся себе уникальными

В гл. 8 мы также видели, что воспринимаем себя в качестве уникальных и изолированных систем, даже если не являемся таковыми. Мы видим, что даже если квантовая механика эффективно нас клонирует, так что мы в итоге оказываемся в нескольких макроскопически различных местах сразу, сложно запутанными с иными системами, каждый из нас все равно ощущает себя как уникальное существо. То, что во внешней реальности выглядит как «разветвление наблюдателя», во внутренней реальности воспринимается как малозначительная случайность.

То же самое с классическим клонированием (рис. 8.3): в сочетании с детерминизмом оно воспринимается как уникальность в сочетании со случайностью. Иными словами, наша корректно определенная локализованная и уникальная личность существует лишь в нашей внутренней реальности. На фундаментальном уровне это иллюзия.

Мы воспринимаем себя как бессмертных?

В гл. 8 мы также обсуждали возможность того, что мультиверсы I и (или) III уровней дают нам ощущение бессмертия. Если коротко, то в тех случаях, когда дело касается увеличения и уменьшения числа ваших копий, связь между внешней и внутренней реальностями становится очень тонкой:

- При увеличении числа ваших копий вами это воспринимается как случайность.
- При уменьшении числа ваших копий вами это воспринимается как бессмертие.

Последнее парадоксально, и независимо от того, корректен ли этот вывод, он может быть связан с *проблемой меры*, которую мы в дальнейшем опишем.

Мы воспринимаем то, что полезно

Почему мы воспринимаем мир как стабильный, а самих себя как локализованных и уникальных? Вот мое предположение: потому что это полезно. Похоже, люди обзавелись самосознанием в первую очередь потому, что отдельные аспекты нашего мира до некоторой степени предсказуемы. Успешное моделирование мира, позволяющее предсказывать будущее и принимать разумные решения, способствует репродуктивному успеху. В более общем виде: любая ССС, развившаяся эволюционно или целенаправленно сконструированная, может обладать самосознанием как побочным продуктом обладания внутренней моделью мира и себя.

В таком случае естественно, что ССС будет воспринимать лишь те аспекты внешней реальности, которые полезны для достижения ее целей. Например, перелетные птицы воспринимают земное магнитное поле, поскольку это полезно для навигации, а кроты-звездоносы слепы, потому что зрение бесполезно при подземном образе жизни. Хотя то, что полезно и потому воспринимается, варьирует от вида к виду, некоторые положения, похоже, разделяют все формы жизни. Например, полезно воспринимать лишь аспекты, демонстрирующие достаточную стабильность и регулярность, чтобы информация помогала предсказывать будущее. Если вы наблюдаете океанский шторм, то воспринимать во всех деталях движение триллионов молекул воды совершенно бесполезно, поскольку из-за постоянных

столкновений молекулы менее чем за триллионные доли секунды меняют направление движения. При этом восприятие идущей в вашу сторону огромной волны очень полезно, поскольку вы можете предсказать ее движение на несколько секунд вперед и воспользоваться этим предсказанием, чтобы не допустить своего вымывания из человеческого генофонда.

Точно так же для ССС полезно восприятие себя как локализованной и уникальной сущности, поскольку информация может обрабатываться только локально. Даже если существует ваша идентичная копия в гуголплексе метров от вас или в декогерировавшей части квантового гильбертова пространства, никакая информация все равно не может передаваться между двумя вашими копиями, так что обе они вполне могут прибегнуть к упрощению и действовать так, будто других копий не существует.

Мы воспринимаем то, для чего требуется наше сознание

Поскольку отделы мозга, которые моделируют мир и наше место в нем (и порождают сознание), очень полезны и на них высокий спрос, их использование по большей части зарезервировано для вычислений (принятия решений), для которых они действительно необходимы. Вы не станете применять суперкомпьютер для запуска текстового редактора. Так и мозг не использует свой модуль сознания для обыденных задач наподобие регулирования сердцебиения, – они передаются иным отделам мозга, в работе которых вы не отдаете себе отчета. Можно предположить, что если в будущем роботы обретут самосознание, они не будут сознавать выполнения механических задач, не требующих доступа к модели реальности (таких, как умножение чисел). Схема сознания, предложенная Джулио Тонони, объясняет, как может осуществляться бессознательное выполнение когнитивных задач.

Я нахожу интересным то, что у нас физиологическая защита от микроскопических врагов (очень сложная иммунная система), по-видимому, не обладает самосознанием, а защита от макроскопических врагов (мозг, управляющий мышцами) – обладает. Вероятно, это связано с тем, что аспекты нашего мира, относящиеся к первому случаю, настолько отличаются от второго (например, меньшими масштабами длины и большими масштабами времени), что сложное логическое мышление и сопутствующее ему сознание здесь не требуется.

Когда вы?

Итак, математическая структура может содержать наблюдательные мгновения (в них проявляется самосознание), подобные тому, что вы испытываете прямо сейчас. Выше мы описали трудности обнаружения этих наблюдательных мгновений и то, как они могут субъективно ощущаться. Вы существуете в математической структуре, содержащей определенного рода пространство-время, и чтобы делать физические предсказания, следует попытаться узнать: в какого рода математической структуре вы находитесь, каково местоположение в ней вашего текущего наблюдательного мгновения – то есть где в пространстве и когда во времени вы находитесь? Как мы увидим, часть, относящаяся к вопросу *когда*, еще тоньше, чем связанная с вопросом *где*, особенно если число ваших копий меняется во времени.

За пределами попперовского двухвременья

Для меня наука – это все, что касается понимания реальности и нашего места в ней. В прагматическом отношении это касается поиска модели реальности, позволяющей предсказывать будущее настолько успешно, насколько это возможно, чтобы мы могли предпринимать такие действия, которые, согласно нашим предсказаниям, дают наилучший результат (для облегчения этой задачи, кажется, мы и имели счастье приобрести сознание). Мысли-

тели веками пытались формализовать этот научный процесс, и, думаю, большинство современных ученых согласится, что теперь мы имеем следующее:

1. Сделать предсказания на основе допущений.
2. Сравнить наблюдения с предсказаниями, пересмотреть допущения.
3. Повторить.

Совокупность предположений называют *теорией*. В контексте ГМВ ключевые предположения, которые составляют модель реальности, касаются того, какую математическую структуру мы населяем, и какое конкретно наблюдательное мгновение в ней является воспринимаемым вами прямо сейчас. Карл Поппер подчеркивал важность второго пункта списка, доказывая, что предположения, которые не дают проверяемых предсказаний, не являются научными. Хотя он упирал на фальсифицируемость (обязательно должна иметься принципиальная возможность проверить, не является ли научная теория ложной), существует красивый математический инструментарий, называемый байесовской теорией принятия решений, который обобщает дихотомию «истина – ложь», добавляя ей оттенки серого. Любому возможному предположению приписывается число от 0 до 1 – вероятность, с которой, как вы думаете, оно верно, и есть простая формула, позволяющая обновлять эти вероятности, когда вы делаете новые наблюдения.

Но при всей элегантности этого подхода и благожелательном к нему отношении есть проблема: он требует *двух* связанных наблюдательных мгновений. В первое мгновение вы делаете предсказание, а во второе оцениваете результат. Это годится в обычной ситуации, когда есть, была и всегда будет лишь одна ваша копия (рис. 11.8, слева). Однако все не так в сценарии с параллельными вселенными, где у вас есть альтернативные «я». Это может приводить к новым эффектам (гл. 6, 8), например, к субъективному бессмертию и субъективной случайности (рис. 11.8).

В контексте ГМВ мы показали, что восприятие течения времени, а также выдвижение предположений и осуществление наблюдений имеют место в каждое *единичное* наблюдательное мгновение, которое мы переживаем. Это означает, что мы должны выйти за пределы попперовского двухвременного подхода к науке и предложить одновременный подход, применимый к единственному наблюдательному мгновению. Мне нравится мечтать о замечательном карманном пульте управления реальностью. Участвуя в скучных совещаниях, я могу нажать кнопку ускоренной перемотки вперед. Когда я испытываю восторг, то могу «отмотать» время назад и пережить все столько раз, сколько захочу. А чтобы превзойти Поппера, я просто нажимаю кнопку «Пауза». Теперь я поистине могу в духе Горация поймать мгновение, рассмотреть его в целостности, прочувствовать и отрефлексировать. В частности, я могу раздумывать над тем, что я предполагаю и что наблюдаю. Если мой мозг работает хорошо, я обнаружу, что моя внутренняя модель реальности отлично согласуется с последними новостями, которые мои чувства поставляют из внешнего мира. И если мой алгоритм научных рассуждений хорош, я обнаружу, что предсказания, которые, как я помню, делаются для этого мгновения, находятся в полном согласии с тем, что действительно происходит. Пока чувства интенсивно трудятся над регистрацией новой информации, которой предстоит быть сознательно воспринятой в будущие наблюдательные мгновения, сознательная часть моей психики занята применением алгоритма научных рассуждений для обновления набора допущений, касающихся более тонких и абстрактных аспектов реальности.



Рис. 11.8. Когда каждое наблюдательное мгновение можно однозначно связать с предшествующим и последующим, мы субъективно воспринимаем это как причинность (слева). Когда некоторые последователи исчезают, мы можем воспринимать это субъективно как бессмертие. Когда некоторые субъективно различные последователи имеют одного и того же предшественника, мы субъективно воспринимаем это как случайность.

Почему вы не муравей?

Так как вы должны рассуждать в свое наблюдательное мгновение, нажав кнопку «Пауза»? Вам понадобится хорошая концептуальная схема, которая позволит не только уложить в нее мультиверс, но и справиться с аргументом Судного дня и иными философскими головоломками. Если вы признаете гипотезу математической Вселенной, то должны попытаться представить, в какой математической структуре вы живете. Если эта структура содержит множество наблюдательных мгновений, субъективно ощущаемые как ваши, то вы можете быть любым из них. Если в математике нет чего-либо, нарушающего симметрию и отдающего предпочтение одним мгновениям перед другими, вы с равной вероятностью выберете любое из них. Тем не менее, как я показал в статье о математической Вселенной в 1996 году, вы придете к заключению:

Следует рассуждать, как если бы ваше наблюдательное мгновение было случайно выбрано из всех возможных.

Два последних десятилетия философы спорят о различных альтернативных способах рассуждения. Эта дискуссия спровоцирована отчасти аргументом Судного дня (который я кратко разберу) и связанными с ним головоломками. Основная идея – нам следует ожидать обнаружить свое сознание не в произвольном месте (как следует из принципа Коперника), а у случайного наблюдателя, имеющего долгую историю. Брэндон Картер сформулировал это как *слабый антропный принцип* (гл. 6), а Александр Виленкин – как *принцип заурядности*. Его исследовали Ник Бострем, Пол Олмонд, Милан Чиркович и другие современные философы. В 2002 году Бострем ввел понятие, ставшее уже общепринятым – *сильное допущение о самовыборке* (СДСВ):

Каждое наблюдательное мгновение должно анализироваться так, как если бы оно было случайным образом выбрано из всех наблюдательных мгновений референтного класса.

Тонкость в том, как интерпретировать понятие *референтный класс*, и философы, признающие СДСВ, об этом спорят. Если использовать вариант с наиболее жесткими опциями и ограничить референтный класс наблюдательными мгновениями ваших копий, которые субъективно неотличимы от ваших собственных наблюдательных мгновений, то мы вернемся к моему старому подходу. Однако можно прийти к интересным выводам, используя гораздо более либеральный подход. Вы по-прежнему будете приходить к верным заключениям, даже если позволены различные наблюдательные мгновения, лишь бы способ, каким они субъективно ощущаются как различные, не влиял на ответ, который вы ищете. Рассмотрим пример СДСВ – задачу Бострема о Спящей Красавице.

Претендентки на роль Спящей Красавицы соглашаются участвовать в следующем эксперименте, обо всех условиях которого им сообщают. В воскресенье участница опыта ложится спать. Затем подбрасывается монета с равными шансами упасть на одну из сторон. Если выпадает решка, Красавицу будят и задают ей вопрос только в понедельник. Если выпадает орел, Красавицу будят и задают вопрос в понедельник и вторник, но когда она вновь ложится спать в понедельник, ей дают препарат, вызывающий амнезию, и это гарантирует, что она не сможет вспомнить предыдущее пробуждение. Всякий раз, когда Красавицу будят, ее спрашивают: «Как бы вы оценили шансы, что выпала решка?»

После большого числа публикаций на эту тему философское сообщество разделилось на считающих, что она должна назвать $1/2$, и тех, кто придерживается вероятности $1/3$. В рамках ГМВ не существует истинной случайности, поэтому заменим монету квантовым измерением, которое в равной мере реализует оба исхода в параллельных двух вселенных III уровня. Теперь в математической структуре, которая соответствует Красавице в момент интервью, есть три субъективно неразличимых наблюдательных мгновения, и все они одинаково реальны:

1. Выпала решка, и это понедельник.
2. Выпал орел, и это понедельник.
3. Выпал орел, и это вторник.

Поскольку лишь один из трех вариантов соответствует выпадению решки, Красавица должна приписать этому событию вероятность $1/3$ и испытывать соответствующее субъективное чувство случайности, когда это обнаружит.

Теперь предположим, что экспериментаторы тайно решили перекрасить ей ногти в цвет, зависящий от исхода квантового измерения. Это означает, что не все наблюдательные мгновения являются неразличимыми, но, поскольку красавица не знает, как построен цветовой код, ее оценка шансов не должна измениться. Иными словами, мы можем свободно расширять референтный класс, если только это не влияет на результаты.

У этого вывода есть радикальные следствия. Каким бы огромным и безумным ни был мультиверс, люди скорее всего довольно типичны среди наблюдателей, задающихся такого рода вопросами. Например, крайне маловероятно, чтобы типичная планетная система содержала квадриллионы похожих на нас гоминид, поскольку в таком случае у нас было бы примерно в миллион раз больше шансов обнаружить себя в такой густонаселенной планетной системе, а не в нашей собственной, с ее жалкими 7 млрд жителей. СДСВ позволяет делать утверждения о том, что происходит даже в таких местах, которые мы не можем наблюдать.

Однако, как и любой мощный инструмент, СДСВ следует применять с осторожностью. Например, почему вы не муравей? Если в качестве референтного класса взять углеродные формы земной жизни, то наши шестиногие друзья, которых свыше десяти квадриллионов (10^{16}), превзойдут по численности нас, двуногих, более чем в миллион раз. Не следует

ли отсюда, что вашему текущему наблюдательному мгновению в миллион раз вероятнее оказаться муравьиным, чем человеческим? Если так, то ваша фундаментальная структура реальности была бы исключена с надежностью 99,9999 %. Да, согласен, мы пренебрегли тем фактом, что люди живут примерно в 100 раз дольше муравьев, но это не избавляет от тревожного вывода.

В действительности решение лежит в выборе референтного класса. Его можно выбрать многими способами (рис. 11.9): самый обширный класс будет включать все наблюдательные мгновения всех самосознающих субструктур, а самый узкий – лишь те, в которых субъективно ощущается точно то же, что ощущаете вы в данный момент. Если вы спрашиваете, *какого рода сущностью вы скорее всего окажетесь*, то ваш референтный класс, очевидно, должен быть сужен до сущностей, которые задают такие вопросы, и муравьи в него не попадут.



Рис. 11.9. «Какова вероятность того, что [подставьте свой любимый вопрос], при условии, что я...?» То, чем вы заполняете пропуск – это ваш референтный класс. В рамках гипотезы математической Вселенной всегда справедливо рассуждать так, как если бы вы были случайным членом наиболее узкого референтного класса, соответствующего всем наблюдательным мгновениям, которые субъективно воспринимаются так же, как ваши. Но в некоторых случаях вы можете получить дополнительные корректные и интересные выводы, расширяя свой референтный класс, скажем, до людей или других самосознающих сущностей, способных задать такой же вопрос.

Вопрос о выборе правильного референтного класса соответствует правильному применению того, что статистики называют условными вероятностями. Неумелая работа с ними может привести к провалу. Так, в 2010 году большой опрос не смог предсказать переизбрание в Неваде лидера сенатского большинства Гарри Рида, поскольку автоматизированная система телефонных опросов вешала трубку, когда абонент не говорил по-английски, и в результате не были учтены ответы поддерживающих Рида испаноязычных избирателей. В гл. 6 мы увидели, что типичная область пространства окажется скорее всего в такой вселенной, где темной энергии слишком много для того, чтобы образовались галактики, а типичный атом водорода в нашей Вселенной скорее всего окажется в составе межгалактического газового облака или в звезде. Но эти варианты не следует рассматривать как вероятные для вас самих: *все точки* и *все атомы* – это нерелевантные для вас классы, поскольку ни точки, ни атомы не задают вопросов.

Почему вы не больцмановский мозг?

Если вам кажется безумием возможность иметь внеземных одноклассников в своем референтном классе, вас может позабавить то, что некоторые мои коллеги спорят об еще более экзотических одноклассниках: симуляциях и больцмановских мозгах.

Мы – живое доказательство того, что атомы можно соединить в сложную структуру, которая субъективно будет ощущать себя самосознающей. До сих пор физические исследования не дали свидетельств в пользу того, что наш пример является единственным возможным путем реализации сознания. Поэтому надо рассмотреть возможность существования других способов организации атомов, обладающих самосознанием, а также того, что некоторые жизненные формы (возможно, даже мы сами, или наши потомки) однажды породят такие сущности. Они могут напоминать разумных роботов, которые располагают телами, способными взаимодействовать с окружающим миром, или оказаться симуляциями, подобно персонажам с голопалубы в сериале «Звездный путь: Следующее поколение» или агенту Смит из «Матрицы»⁸⁰, чьи тела являются виртуальными, а жизнь воспроизводится в виртуальной реальности чрезвычайно мощного компьютера. Подобные симуляции могут обладать наблюдательными мгновениями, которые субъективно ощущаются точно такими же, как ваши ощущения прямо сейчас.

В этом случае вам, очевидно, нужно включить в свой референтный класс смоделированных себя. Ник Бострем и другие ученые пришли к выводу: существует ненулевая вероятность того, что мы сами в действительности смоделированы. Я приведу контраргументы в следующей главе, но если вы хотите все же действовать наверняка, в духе паскалевского пари, я советую жить полной жизнью и заниматься новыми интересными вещами. Тогда, если вы являетесь симуляцией, то, что вас породило, с меньшей вероятностью соскучится и выключит вас...

Теперь включим перематку до современной Вселенной и рассмотрим ее судьбу в долгосрочной перспективе. Ускоренное расширение заставит в конце концов рассеяться всю материю, которая сейчас заполняет нашу Вселенную. Но если плотность космической темной энергии остается постоянной (о чем говорят современные измерения), она всегда будет поставлять очень небольшое количество тепловой энергии. Это тепло возникает благодаря тем же квантовым флуктуациям, которые породили описанные в гл. 5 флуктуации космического микроволнового фона, и Стивен Хокинг сделал знаменитое открытие, состоящее в том, что чем быстрее расширяется Вселенная, тем выше *хокинговская температура*. Темная энергия заставляет нашу Вселенную расширяться гораздо медленнее, чем в период инфляции, так что температура, которую она обеспечивает, составляет около миллионной триллионной (10^{-30}) доли градуса выше абсолютного нуля.

Это не жарко даже по шведским стандартам, но все же не абсолютный нуль, а значит, если ждать достаточно долго, тепловая энергия трансформирует себя во что угодно. В стандартной космологической модели это случайное трансформирование продолжается *вечно*, так что оно может спонтанно породить точную вашу копию, которая будет субъективно ощущать то же самое, что и вы, вместе со всеми ложными воспоминаниями обо всей вашей жизни. Но гораздо чаще будет воспроизводиться лишь ваш лишенный тела мозг, живущий достаточно долго, чтобы воспроизвести ваше текущее наблюдательное мгновение. И это будет происходить вновь и вновь, бесконечное число раз, так что для любой вашей копии, появившейся в результате развития и прожившей реальную жизнь, существует бесконечно много иллюзорных бестелесных мозгов, которые думают, что они прожили точно такую же реальную жизнь.

⁸⁰ Обратите внимание, что многие персонажи «Матрицы» получали смоделированный опыт в мозге. Напротив, симулированные люди в фильме «Тринадцатый этаж» обходились без человеческих составляющих.

Это действительно серьезное затруднение. Если наше пространство-время в самом деле содержит эти больцмановские мозги, то вы почти со стопроцентной надежностью один из них! В конце концов наблюдательное мгновение вас, развившегося естественным путем, находится в том же референтном классе, что и мгновение тех мозгов, поскольку они субъективно ощущают то же самое, что и вы. Так что вам следует думать о себе как о произвольном наблюдателе этого мгновения, а среди них бестелесные в бесконечное число раз превосходят по численности обладающих телом...

Прежде чем вы слишком обеспокоитесь онтологическим статусом своего тела, вот простой тест, с помощью которого вы можете определить, являетесь ли вы больцмановским мозгом. Сделайте паузу. Загляните внутрь себя. Проанализируйте свои воспоминания. В сценарии с больцмановским мозгом в действительности более вероятно, что любое конкретное воспоминание является ложным. Однако для каждого набора ложных воспоминаний, которые могут казаться реальными, есть похожие наборы воспоминаний, в которые закрались несколько безумных битов (скажем, вы припоминаете Пятую симфонию Бетховена, звучащую совершенно статично). Они являются гораздо более вероятными, поскольку существует куда больше бестелесных мозгов с такими воспоминаниями. Это связано с тем, что существует гораздо больше способов сделать что-нибудь почти правильно, чем сделать это совершенно правильно. Значит, если вы действительно больцмановский мозг, который первоначально так о себе не думает, то как только вы начнете рыться в памяти, вы должны обнаруживать все больше нелепого. И после этого вы почувствуете, что ваша реальность растворяется по мере того, как частицы возвращаются в холодное, почти пустое пространство, из которого они появились.

То есть если вы продолжаете читать это, то не являетесь больцмановским мозгом. Значит, в наших предположениях о будущем Вселенной что-то в корне ошибочно. Есть еще урок, который нам надо выучить. (Мы займемся этим в разделе, посвященном «проблеме меры».)

Аргумент Судного дня

Та идея, что вы должны быть типичным наблюдателем, весьма глубокая и имеет неожиданные следствия. Еще одно много обсуждавшееся следствие – аргумент Судного дня, предложенный Брэндоном Картером в 1983 году.

Во время Второй мировой войны союзники по антигитлеровской коалиции успешно оценивали количество немецких танков по серийным номерам. Если первый захваченный танк имел № 50, это исключало гипотезу о том, что у противника имеется более тысячи танков, с вероятностью 95 %, поскольку вероятность захватить одну из первых 50 построенных машин составляет менее 5 %. Ключевое допущение состоит здесь в том, что первый захваченный танк можно считать случайным из референтного класса всех танков.

Картер подчеркивал, что если при рождении каждому человеку присваивался бы серийный номер, можно было бы применить этот же аргумент для оценки числа всех людей, которые когда-либо будут жить. При появлении на свет в 1967 году я оказался бы примерно 50-миллиардным родившимся на Земле человеком⁸¹. Если я случайный представитель всех людей, которые когда-либо жили, я могу исключить гипотезу о рождении в будущем более чем 1 трлн людей с надежностью 95 %. Иными словами, крайне маловероятно, чтобы в будущем родилось более 1 трлн человек: в этом случае я оказался бы среди первых 5 % всех людей, – а это нельзя объяснить ничем, кроме маловероятного совпадения. И если мировое

⁸¹ Нет надежных данных о том, сколько представителей вида *Homo sapiens* жило на Земле. Нидерландский статистик Петер Грюнвальд в 2008 г. оценил общее число людей, живших на планете на протяжении 162 тыс. лет, в 107 млрд. – *Прим. пер.*

население стабилизируется на 10 млрд человек с ожидаемой продолжительностью жизни около 80 лет, человечество, каким мы его знаем, с вероятностью 95 % не дотянет до 10000 года.

Если я верю, что Судный день будет вызван ядерным конфликтом (либо компьютерами, биотехнологией или любой другой технологией из появившихся после 1945 года), прогноз становится еще более мрачным. Мой порядковый номер с того момента, когда возникли эти опасности, составляет 1,6 млрд, и я могу исключить с вероятностью 95 %, что после меня до 2100 года родится еще 32 млрд человек. А ведь это предел с 95-процентной уверенностью: более вероятно, что конец человечества где-то неподалеку от нынешнего времени. Чтобы уйти от этого пессимистичного вывода, мне необходим некий априорный аргумент, объясняющий, почему я должен оказаться в числе первых 5 % людей, которым предстоит родиться под сенью этих технологий. (Мы вернемся к экзистенциальной угрозе со стороны технологии в гл. 13.)

Некоторые люди очень серьезно воспринимают аргумент Судного дня. Когда я встретил на конференции Брэндона Картера, он возбужденно рассказал мне о последних данных, свидетельствующих о замедлении популяционного взрыва, и заявил, что он это предсказывал и что нам теперь следует ожидать, что человечество просуществует дольше. Другие с различных позиций критиковали этот аргумент. Например, все становится гораздо интереснее, если существуют другие планеты с похожими на нас людьми. Рис. 11.10 иллюстрирует пример: общее число когда-либо родившихся сильно меняется от планеты к планете. Если вы знаете, что дела именно таковы, вы должны быть настроены оптимистичнее, чем предполагает стандартный аргумент Судного дня. В самом деле, если я верю в радикальную теорию, гласящую, что в пространстве-времени существуют лишь две населенные планеты, на которых от начала до конца истории живет соответственно 10 млрд и 10 квадриллионов человек, то с вероятностью 50 % я нахожусь на планете, где появится квадриллион людей.

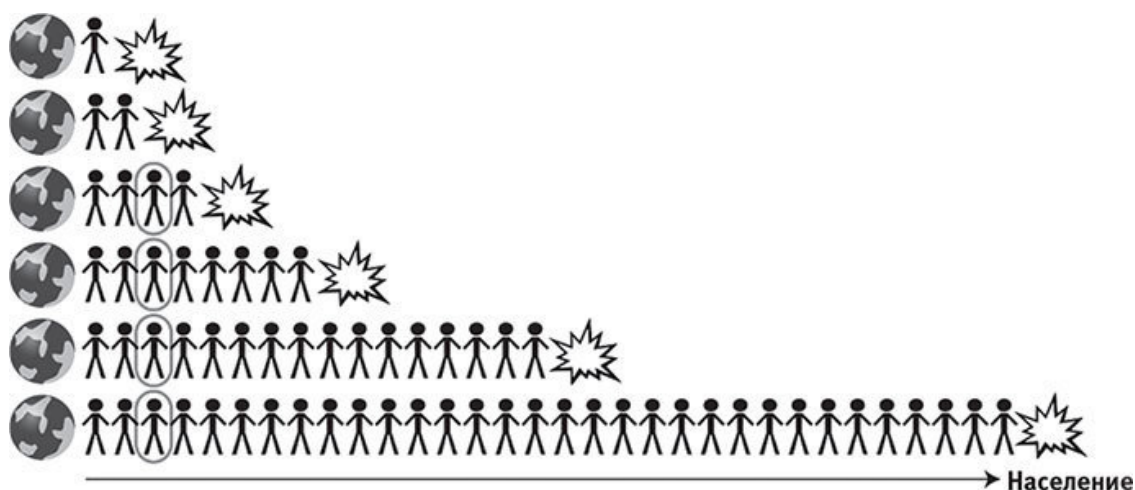


Рис. 11.10. Если вы знаете, что ваш порядковый номер при рождении – трехмиллиардный, то можете оценить, что лишь с 10-процентной вероятностью на вашей планете когда-либо родится более 30 млрд человек. Но, допустим, вам известно, что есть 6 планет, похожих на вашу, где общее число людей, родившихся за время существования цивилизации, составляет 1, 2, 4, 8, 16 и 32 млрд соответственно (каждый значок на рисунке соответствует 1 млрд человек). В этом случае вероятность того, что более 30 млрд человек будет когда-либо жить на вашей планете, составляет 25 %; есть четыре человека, имеющих ваш порядковый номер, и вы с равной вероятностью можете оказаться любым из них; 25 % живет на очень удачливой планете внизу рисунка.

К сожалению, этот контраргумент вселяет ложную надежду. У меня нет такой информации, однако есть очень серьезные основания считать, что теория о двух планетах ложна. Наблюдение, что мой порядковый номер при рождении составляет около 50 млрд, исключает данную теорию с надежностью более 99,999999 %: вероятность для случайного человека оказаться среди первых 50 млрд рожденных составляет лишь 0,0000005 %.

Почему Земля такая старая?

В марте 2005 года я имел удовольствие встретиться с Ником Бостремом на конференции в Калифорнии, и мы вскоре открыли, что нас связывают не только проведенное в Швеции детство, но и восхищение большими вопросами. Под хорошее вино наша беседа повернула к сценарию Судного дня. Может ли Большой адронный коллайдер породить миниатюрную черную дыру, которая в итоге поглотит Землю? Можно ли создать страпельку⁸², которая катализирует превращение Земли в странную кварковую материю? Мои коллеги из МТИ, расчетам которых я доверяю, выяснили, что риск этого ничтожен. Но вдруг они упустили что-нибудь? Обычно меня успокаивает тот факт, что природа куда суровее машин. Частицы космических лучей, порожденные вблизи гигантских черных дыр, постоянно врезаются в Землю с энергией в миллионы раз более высокой, чем достижимая на наших ускорителях, и все же Земля живет и здравствует уже 4,5 млрд лет. Так что наша планета явно очень устойчива, и беспокоиться мне не стоит. По той же причине нет нужды тревожиться о других космических сценариях Судного дня, вроде космического «замерзания» с переходом пространства в другую, низкоэнергетическую фазу. В гл. 5 речь шла о смертельном космическом пузыре, расширяющемся со скоростью света и уничтожающем всех людей в то же мгновение, когда они его видят. Если мы все еще есть, значит, таких событий происходить не должно или они очень редки.

И тут у меня возникла жуткая мысль: успокаивающий меня аргумент содержит ошибку! Допустим, каждая планета каждый день имеет 50-процентную вероятность быть уничтоженной. Тогда подавляющее большинство их исчезнет за несколько недель, но в бесконечном пространстве с бесконечным числом планет их всегда бесконечное число, а их обитатели будут пребывать в блаженном неведении касательно своей судьбы. И если я случайный наблюдатель в пространстве-времени, мне следует ожидать, что я окажусь одним из множества наивных людей, которые не осознают, что они подобны овцам на скотобойне. Иными словами, тот факт, что моя область пространства еще не уничтожена, *ни о чем* не говорит, поскольку *все* живые наблюдатели находятся в областях пространства, которые еще не были уничтожены. Я по-настоящему занервничал. Я почувствовал себя так, как если бы оказался в зоопарке наедине с компанией голодных львов и обнаружил, что решетка, которая, как я думал, защищает меня, на самом деле оптическая иллюзия и львы ее не видят.

Мы с Ником бились над этой проблемой, пока не нашли другое, не содержащее ошибок возражение на аргумент Судного дня. Земля образовалась примерно через 9 млрд лет после нашего Большого взрыва, и теперь совершенно ясно, что наша Галактика (и ей подобные) содержит множество подобных Земле планет, которые образовались на несколько миллиардов лет раньше. Когда мы считаем во всем пространстве-времени подобных нам наблюдателей, получается, что значительная их доля существовала задолго до нас. Теперь в сценарии, где планеты спонтанно уничтожаются с коротким периодом полураспада (скажем за день, за год или тысячелетие), почти все наблюдательные мгновения будут относиться к раннему

⁸² Страпелька (англ. *strangelet*) – гипотетический объект из странной материи. Нуклоны в ядрах обычных атомов состоят из кварков всего двух типов – верхних (*u*) и нижних (*d*). Частицы, содержащие кварки других типов, в частности странные (*s*) кварки, неустойчивы. Однако есть гипотеза: если собрать некоторое макроскопическое количество кварковой материи, включающей *s*-кварки, то она может оказаться стабильной и даже станет превращать окружающее вещество в странную материю. – *Прим. пер.*

периоду, и для нас крайне мала вероятность обнаружить себя ближе к концу игры на планете, развивающейся в таком ленивом темпе. Мы решили написать об этом статью и до глубокой ночи работали в вестибюле гостиницы. Я отправился спать, будучи на 99,9 % уверенным, что ни смертельные пузыри, ни черные дыры, ни стрепельки в ближайший миллиард лет нам не грозят. Если, конечно, мы не сделаем какую-нибудь глупость из тех, что природа еще не пыталась совершить...

Почему вы не моложе?

Если физика предусматривает некую ужасную уязвимость, делающую большинство планет короткоживущими, то следует считать, что мы живем на одной из первых образовавшихся обитаемых планет. Так что эта депрессивная теория исключается. К несчастью для инфляции, Алан Гут понял, что при некоторых вполне разумных условиях она предсказывает именно такой результат. Беспокоясь за свое детище, предсказывающее гораздо более молодую Землю, он назвал это *парадоксом молодости*. Примерно в 2004 году, когда я стал его коллегой в МТИ, я потратил много времени на размышления о том, как делать предсказания в мультиверсе. Я написал на эту тему статью, которая объемом далеко превзошла все мои рекорды, и был удивлен, обнаружив, что парадокс молодости оказался еще более жестким, чем я думал.

Обычно инфляция длится вечно (гл. 5), удваивая объем пространства примерно каждые 10^{-38} секунды и порождая беспорядочное пространство-время с бесчисленными Большими взрывами, происходящими в разные моменты времени, и бессчетным числом образующихся в разное время планет. Мы видели, что наблюдатель на любой планете будет рассматривать свой Большой взрыв в качестве момента окончания инфляции в своей части космоса. Лично для меня задержка между Большим взрывом и текущим наблюдательным мгновением составляет около 14 млрд лет. Теперь рассмотрим все одновременные наблюдательные мгновения: для некоторых время, прошедшее с момента их Большого взрыва, составляет 13 млрд лет, для других – 15 млрд, и т. д. Из-за безумного удвоения объемов спустя секунду число Больших взрывов возрастет в $2^{10^{38}}$ раз, поскольку объем за это время увеличится в 10^{38} раз. По той же причине в галактиках рождается в $2^{10^{38}}$ раз больше наблюдателей. Это означает, что если я – случайный наблюдатель среди всех существующих в данный момент, то мой шанс оказаться во Вселенной на секунду моложе, в которой Большой взрыв произошел секундой позднее, в $2^{10^{38}}$ раз выше! Это единица со ста триллионами триллионов триллионов нулей. Моя планета должна быть моложе, мое тело должно быть моложе, и все вокруг должно казаться образовавшимся в страшной спешке.

Часть пространства, испытавшая свой Большой взрыв в более близкое время, будет горячее, поскольку у нее было меньше времени. Обнаружить себя в относительно холодной Вселенной крайне маловероятно, и возникает *проблема холодности*. Когда я рассчитал вероятность того, что измеренная температура космического микроволнового фона окажется ниже 3° над абсолютным нулем, у меня получилось $10^{-10^{56}}$, так что результат измерения этой температуры спутником *COBE*, составляющий 2,725 кельвина, исключает нашу основанную на теории инфляции историю с надежностью 99,999...999 %, где после десятичной запятой следует сто миллионов триллионов триллионов триллионов триллионов девяток. Это нехорошо. В зале позора, где выставлены расхождения между теорией и экспериментом, этот результат побивает даже проблему устойчивости атома водорода из гл. 7 (28 девяток) и проблему темной энергии из гл. 4 (123 девятки). Итак, встречайте *проблему меры*!

Проблема меры: кризис в физике

Что-то пошло не так. Но что именно? Действительно ли вечная инфляция исключена? Посмотрим. Мы задали резонный вопрос о том, каких результатов измерений должен ожидать типичный наблюдатель. В качестве примера мы взяли температуру космического микроволнового фона. Поскольку мы рассматриваем вечную инфляцию, мы проанализировали пространство-время, содержащее множество наблюдательных мгновений, в которые измерено много разных температур. Так что мы не можем предсказать один-единственный ответ, а можем лишь указать вероятность для определенного диапазона температур. Само по себе это не конец света: в гл. 7 мы видели, что квантовая механика не дает определенных ответов, а предсказывает лишь вероятности – и при этом является проверяемой и успешной научной теорией. И все же проблема в том, что вычисленные нами вероятности указывают на то, что результаты наших наблюдений совершенно неправдоподобны, и это заставляет отбросить теорию, на которой мы основываемся.

Может ли дело быть в ошибке в вычислениях вероятности? Математика здесь, в принципе, очень простая: вероятности – это доли от числа всех наблюдательных мгновений в референтном классе, в которые измерена температура. Если существует только пять таких наблюдательных мгновений, в которые зарегистрированы значения 1° , 2° , 5° , 10° и 12° над абсолютным нулем, то доля измерений менее 3° составит два из пяти, $2/5 = 40\%$ – тривиально! Но что если, как предсказывает вечная инфляция, существует бесконечно много таких наблюдательных мгновений, и доля измерений с результатом менее 3° – это бесконечность, разделенная на бесконечность? Как придать этому смысл?

Математики разработали элегантную схему, называемую *предельным переходом*, которая во многих случаях позволяет придать смысл выражению ∞/∞ . Например, какую долю всех натуральных чисел $1, 2, 3, \dots$ составляют четные? Существует бесконечное количество чисел, и среди них бесконечно много четных, так что их доля составляет ∞/∞ . Но если мы сосчитаем только первые n чисел, то получим разумный ответ, слегка зависящий от числа n , на котором мы остановились в подсчетах. Если увеличивать n , мы обнаружим, что с ростом n доля четных чисел все меньше варьирует. Если теперь взять предел, в котором n стремится к бесконечности, мы получим корректно определенный ответ, который вообще не зависит от n : ровно половина всех чисел – четные.

Это кажется разумным, однако бесконечность коварна, и доля четных чисел зависит от порядка, в котором мы их считаем. Если мы упорядочим числа так: $1, 2, 4, 3, 6, 8, 5, 10, 12, 7, 14, 16$ и т. д., согласно той же схеме с пределом получится, что $2/3$ чисел являются четными. Дело в том, что, двигаясь по этому списку чисел, мы встречаем два четных числа на каждое нечетное. Мы не жульничали, поскольку все четные и нечетные числа рано или поздно появятся в списке; мы просто их переупорядочили. Соответствующим образом переупорядочивая числа, я могу доказать, что доля четных чисел равна единице, деленной на номер вашего телефона.

Аналогично доля наблюдателей (из бесконечного их множества в пространстве-времени), получающих конкретный результат измерения, зависит от порядка, в котором вы их считаете. Космологи пользуются термином *мера* для обозначения схемы упорядочивания наблюдательных мгновений или, в более общем случае, для метода подсчета вероятностей, связанных с этими досадными бесконечностями. Те безумные вероятности, которые я насчитал для проблемы холодности, соответствуют конкретной мере, и большинство моих коллег догадывается, что проблема не в инфляции, а именно в мере: оказывается, неверно говорить о референтном классе всех наблюдательных мгновений в фиксированное время.

В последние несколько лет появилась целая лавина интересных статей, предлагающих альтернативные меры. Доказано, что на удивление трудно найти такую меру, которая работала бы с вечной инфляцией: одни меры не справляются с проблемой холодности; другие терпят неудачу, предсказывая, что вы являетесь бальзамовским мозгом; третьи говорят, что

вид нашего неба должен быть искажен гигантскими черными дырами. Александр Виленкин недавно сказал мне, что находится в глубоком унынии: несколько лет назад он надеялся, что одна-единственная мера позволит обойти все подводные камни и что ее простота и элегантность покажутся всем убедительными. Однако сейчас мы имеем множество мер, которые, похоже, дают различные, но разумные предсказания, и нет очевидного способа выбрать между ними. Но если вероятности, которые мы предсказываем, зависят от предполагаемой нами меры и мы сами можем придумать меру, дающую почти любой желаемый ответ, то это значит, что предсказать мы ничего не можем.

Я разделяю беспокойство Александра. Я считаю проблему меры сильнейшим кризисом современной физики. На мой взгляд, инфляция оказалась логически саморазрушительной. О ней всерьез заговорили потому, что она давала верные предсказания (гл. 5): она предсказала, что типичные наблюдатели должны обнаружить вокруг себя плоское, а не искривленное пространство (проблема плоской геометрии); они должны обнаружить, что температура их космического микроволнового фона почти одинакова во всех направлениях (проблема горизонта), а спектр мощности микроволнового фона похож на тот, который измерил спутник *WMAP*, и т. д. Но затем она предсказала, что бесконечное множество наблюдателей измеряет различные вещи с вероятностями, зависящими от меры, которой мы не знаем. А это означает, что инфляция, строго говоря, не дает никаких предсказаний о том, что должны видеть типичные наблюдатели. Отзываются все предсказания, и в первую очередь заставившие нас принять инфляцию всерьез. Полное саморазрушение. Новорожденная инфляционная Вселенная выросла в непредсказуемого подростка.

Буду объективным по отношению к инфляции: я не знаю лучшей конкурирующей космологической теории, и поэтому я не рассматриваю все перечисленное в качестве аргумента против инфляции как таковой. Я просто понимаю, что нам нужно решить проблему меры, и догадываюсь, что когда мы ее решим, некая форма инфляции сохранится. Более того, проблема меры не ограничивается инфляцией, а возникает в *любой* теории с бесконечным числом наблюдателей. В качестве примера вернемся к квантовой механике без коллапса волновой функции. Рассуждения о квантовом бессмертии из гл. 8 критически зависят от существования бесконечного числа наблюдателей, чтобы некоторые из них выжили, а значит, мы не можем доверять никаким выводам, пока не решена проблема меры.

На рис. 11.11 показано, что субъективное бессмертие не требует квантовой механики. Для него достаточно параллельных вселенных – неважно, находятся ли два самолета, изображенные на рисунке, в различных частях нашего трехмерного пространства (мультиверс I уровня) или нашего гильбертова пространства (мультиверс III уровня). Так что в самом общем виде рассмотрим произвольный мультиверсный сценарий, в котором некий механизм ежесекундно убивает половину всех ваших копий. Через 20 секунд в живых останется лишь один из миллиона (1 из 2^{20}) ваших первоначальных двойников. До этого момента наберется $2^{20} + 2^{19} + \dots + 4 + 2 + 1 \approx 2^{21}$ наблюдательных мгновений секундной продолжительности, так что лишь в одном из 2 млн наблюдательных мгновений будет иметься воспоминание о выживании в течение 20 секунд. Как отметил Пол Олмонд, это означает, что выжившие столь долго должны исключать саму постановку вопроса, что они участвуют в эксперименте по изучению бессмертия, с вероятностью 99,99995 %. Странная ситуация: начав с верной теории происходящего, вы сделали предсказание о том, что произойдет (вы выживете); ваши наблюдения подтвердили правильность этого предсказания, а вы тем не менее меняете свои взгляды и утверждаете, что данная теория исключена! Более того, чем дольше вы ждете, тем более странным кажется то, что вы остаетесь в живых (гл. 8). Спасение за счет отключения электричества, падения астероида и т. д. заставило бы большинство людей поставить под вопрос свои представления о реальности.



Рис. 11.11. На рис. 11.5 мы видели, что наблюдательное мгновение (b) воспринимается как продолжение наблюдательного мгновения (b), поскольку имеет с ним общие воспоминания. Однако (b) также воспринимается как продолжение (b), наблюдательного мгновения, принадлежащего двойнику, чей полет идентичен – с тем исключением, что бомба террориста убивает всех пассажиров, прежде чем те проснутся. Если нет других двойников, то верное предсказание для (b) и для (b) состоит в том, что следующим будет восприниматься (b).

Бесконечные проблемы

О чем свидетельствует проблема меры? Вот мое мнение: в самом основании современной физики лежит ошибочное допущение. Провалы классической механики потребовали перехода к квантовой механике, и, я думаю, лучшие современные теории также нуждаются во встряске. Никто не знает достоверно, где корень проблемы. У меня есть подозрения на этот счет. И вот мой главный подозреваемый: ∞ .

Собственно, у меня два подозреваемых: *бесконечно большое* и *бесконечно малое*. Под первым я подразумеваю ту идею, что пространство может иметь бесконечный объем, время может тянуться вечно, а физических объектов бесконечно много. Под вторым я подразумеваю континуум – ту идею, что литр пространства содержит бесконечное число точек, что пространство можно бесконечно растягивать без каких-либо нежелательных последствий и что в природе существуют величины, которые могут непрерывно изменяться. Два моих подозреваемых тесно связаны: в гл. 5 мы видели, что инфляция породила бесконечный объем путем неограниченного растягивания непрерывного пространства.

У нас нет прямых наблюдательных подтверждений существования чего-либо бесконечно большого или бесконечно малого. Мы говорим о бесконечных объемах с бесконечным числом планет, но наблюдаемая Вселенная содержит лишь около 10^{89} объектов (в основном фотонов). Если пространство и вправду есть континуум, то для описания даже чего-то столь простого, как расстояние между двумя точками, потребовалось бы бесконечное количество информации, задаваемой числом с бесконечным количеством десятичных знаков. На практике физики никогда не измеряли что-либо точнее, чем до 16 знаков.

Я помню, что не доверял бесконечности еще будучи подростком, и чем больше я узнавал, тем подозрительнее становился. Без бесконечности не должно возникать проблемы меры – в результате вычислений мы всегда получим одну и ту же долю, независимо от порядка подсчета. Без бесконечности не будет и квантового бессмертия.

Среди физиков мой скептицизм в отношении бесконечности оставил меня в меньшинстве. Математики обычно смотрят на бесконечность и континуум с подозрением. Карл Фридрих Гаусс, которого иногда называют величайшим математиком со времен античности, в 1831 году писал: «Я возражаю против употребления <актуально> бесконечной величины как чего-либо завершеного, что никогда не позволительно в математике. Бесконечность –

это скорее фигура речи, и ее истинный смысл состоит в отсутствии предела, к которому некоторые отношения неограниченно приближаются, тогда как другим позволено возражать без ограничений». Критикуя континуум и связанные с ним идеи, молодой коллега Гаусса Леопольд Кронекер заметил: «Целые числа сотворил Господь Бог, все остальное – дело рук человеческих»⁸³. В XX веке, однако, идея бесконечности стала достоянием математического мейнстрима, и лишь немногие ее критиковали вслух. Так, канадско-австралийский математик Норман Уилдбергер доказывал, что «вещественные числа – это шутка».

Почему современные физики и математики столь влюблены в бесконечность, что почти никогда не ставят ее под вопрос? Главным образом потому, что бесконечность – это чрезвычайно удобное приближение, и пока мы не нашли подходящей альтернативы. Рассмотрим, например, воздух. Отслеживание положений и скоростей октиллионов атомов было бы безнадежным усложнением дела. Но если игнорировать тот факт, что воздух состоит из атомов, и вместо этого использовать в качестве приближения континуум – непрерывную среду, которая обладает плотностью, давлением и скоростью в каждой точке, то окажется, что идеализированный воздух подчиняется простому, красивому уравнению. Оно описывает почти все, что нас может интересовать – от характера распространения в воздухе звуковых волн до того, как возникает ветер. И все же, несмотря на удобство, воздух не является непрерывным. Не может ли то же самое относиться и к пространству, времени и прочим «строительным материалам» нашего физического мира?

Резюме

- Математические структуры вечны и неизменны: не они существуют в пространстве и времени, а скорее пространство и время существуют в них (в некоторых). Если бы космическая история была кинофильмом, то математическая структура была бы целым дивиди.

- Гипотеза математической Вселенной (ГМВ) предполагает, что течение времени является иллюзией, как и изменение.

- ГМВ предполагает, что созидание и уничтожение – это иллюзии, поскольку они связаны с изменением.

- ГМВ предполагает, что математической структурой является не только пространство-время, но и все вещество в нем, включая частицы, из которых состоим мы. Математически это вещество, по-видимому, соответствует *полям* – числам в каждой точке пространства времени, которые задают, что там находится.

- ГМВ предполагает, что вы – самосознающая субструктура математической структуры. В эйнштейновской теории гравитации вы представляете собой косоцеобразную структуру в пространстве-времени, паттерн которой соответствует обработке информации и самосознанию. В квантовой механике ваш паттерн ветвится, подобно дереву.

- Похожая на кино субъективная реальность существует лишь у вас в голове как часть модели реальности вашего мозга, и она включает не только отредактированные образы, полученные здесь и сейчас, но и подборки заранее записанных отдаленных в пространстве и времени событий, что создает иллюзию течения времени.

- Вы обладаете самосознанием, а не просто сознанием, поскольку модель реальности мозга включает модель вас самих и отношений с внешним миром: восприятие субъективной наблюдательной перспективы, которую вы называете «я», – это квалиа, подобно субъективному восприятию «красного» или «сладкого».

⁸³ Цит. по: Александров, П. С. *Энциклопедия элементарной математики*. В 5 т. Т. 1. *Арифметика*. М.—Л.: Гостехиздат, 1951. С. 15. – *Прим. пер.*

- Теория, предполагающая, что внешняя физическая реальность идеально описывается математической структурой, но не является ею, стопроцентно ненаучна в том смысле, что не дает проверяемых наблюдениями предсказаний.

- Следует ожидать, что ваше текущее наблюдательное мгновение является типичным среди всех наблюдательных мгновений, которые воспринимаются подобно вашему. Это рассуждение приводит к спорным выводам относительно конца человечества, стабильности Вселенной, правильности теории космологической инфляции, а также того, не являетесь ли вы лишенным тела мозгом или симуляцией.

- Это рассуждение также приводит к проблеме меры – научному кризису, который ставит под вопрос способность физики предсказывать что-либо.

Глава 12. Мультиверс IV уровня

Что вдыхает огонь в уравнения и создает Вселенную, чтобы они описывали ее?
Стивен Хокинг

Почему я верю в мультиверс IV уровня

Почему эти уравнения, а не другие?

Предположим, что вы физик и нашли, как объединить физические законы в «теорию всего». Пользуясь ее математическими уравнениями, вы можете ответить на трудные вопросы, которые лишают физиков сна, например, как действует квантовая гравитация или как решить проблему меры. Футболка с вашими уравнениями стала бестселлером. Вас наградили Нобелевской премией. Вы ликуете, но в ночь перед церемонией не можете уснуть, поскольку так и остался без ответа вопрос, поставленный Джоном Уилером: *почему именно эти уравнения, а не другие?*

В двух предыдущих главах я обосновывал гипотезу математической Вселенной (ГМВ), согласно которой наша внешняя физическая реальность является математической структурой, и это лишь заостряет вопрос Уилера. Математики открыли много математических структур, и прямоугольники на рис. 12.1 изображают некоторые простейшие из них. Ни одна из этих структур не совпадает с нашей физической реальностью целиком. В 1916 году прямоугольник, помеченный словами «Общая теория относительности», был серьезным кандидатом на точное совпадение, поскольку он охватывал не только пространство и время, но и различные формы материи. Однако открытие квантовой механики вскоре сделало очевидным, что физическая реальность обладает такими свойствами, которых у этой математической структуры нет. К счастью, теперь вы можете дополнить этот рисунок, добавив открытую вами математическую структуру, за которую вам присуждается премия, и твердо зная, что именно *этот* новый прямоугольник – тот самый, соответствующий нашей физической реальности.

На этом месте я слышу, как дружелюбный голос Джона Уилера вставляет: «А что можно сказать о других прямоугольниках?» Если ваш прямоугольник соответствует физически существующей реальности, то почему не другие?

Все прямоугольники имеют равноценный математический фундамент, соответствующий различным математическим структурам, почему же некоторые из них оказываются «равнее» других, когда дело доходит до физического существования? Может ли существовать фундаментальная необъясненная экзистенциальная асимметрия в сердцевине реальности, разделяющая математические структуры на два класса – обладающие и не обладающие физическим существованием?

Математическая демократия

Этот вопрос глубоко встревожил меня вечером 1990 года, когда мне впервые пришла в голову идея математической Вселенной и я изложил ее своему другу Биллу Пуарье на пятом этаже общежития в Беркли, в коридоре. И лампочка у меня в голове не гасла, пока я не понял, что из этого философского парадокса есть выход. Я сказал Биллу, что соблюдается полная математическая демократия: математическое и физическое существование эквивалентны, так что *все* структуры, которые существуют математически, существуют также и физически. Каждый прямоугольник на рис. 12.1 описывает реальную вселенную – просто отличную от

той, где довелось жить нам. В этом можно усмотреть своего рода радикальный платонизм, согласно которому все математические структуры в платоновском царстве идей существуют *где-то* в физическом смысле.

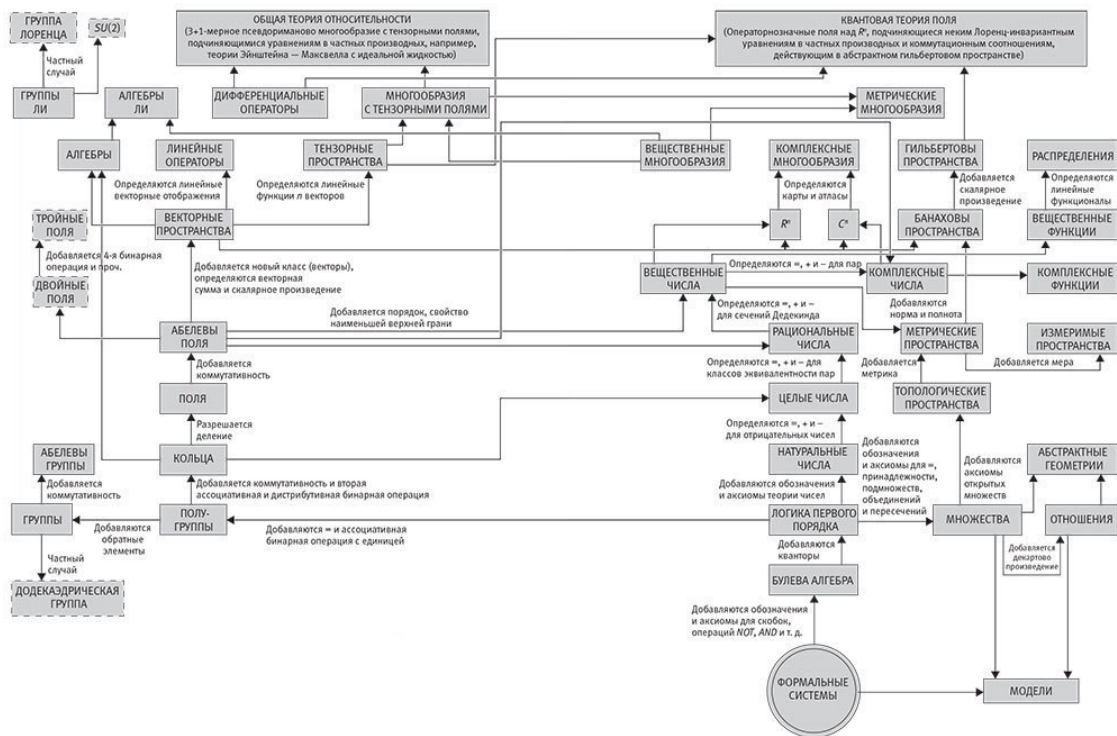


Рис. 12.1. Взаимосвязи между фундаментальными математическими структурами. Стрелки, как правило, указывают на добавление новых понятий и (или) аксиом. Сходящиеся стрелки указывают на объединение структур, например алгебра – это векторное пространство, которое также является кольцом, а группа Ли – это группа, которая также является многообразием. Это “фамильное древо”, по-видимому, имеет бесконечную протяженность: на рисунке показана лишь небольшая его часть, у самого основания.

Иными словами, IV уровень параллельных вселенных, соответствующий различным математическим структурам, неизмеримо обширнее тех, с которыми мы до сих пор встречались. Первые три уровня соответствуют некоммуницирующим параллельным вселенным внутри одной математической структуры: I уровень означает просто далекие области, из которых свет еще не успел дойти до нас, II уровень охватывает области, которые навсегда останутся недостижимыми из-за космологической инфляции в разделяющем нас пространстве, а III уровень, эвереттовская Мультивселенная, включает некоммуницирующие части гильбертова пространства квантовой механики. В то время как параллельные вселенные на I, II и III уровнях подчиняются одним и тем же уравнениям (описывающим квантовую механику, инфляцию и т. д.), IV уровень касается выбора уравнений, отвечающих разным математическим структурам. На рис. 12.2 показана четырехуровневая иерархия мультиверсов, которая является стержневой идеей моей книги.

Как из гипотезы математической Вселенной вытекает мультиверс IV уровня?

Если теория о существовании мультиверса IV уровня верна, то, поскольку у нее нет свободных параметров, все свойства всех параллельных вселенных (включая субъективные восприятия самосознающих структур в них) могут, в принципе, быть выведены бесконечно

умным математиком. Но верна ли эта теория? Действительно ли существует мультиверс IV уровня?

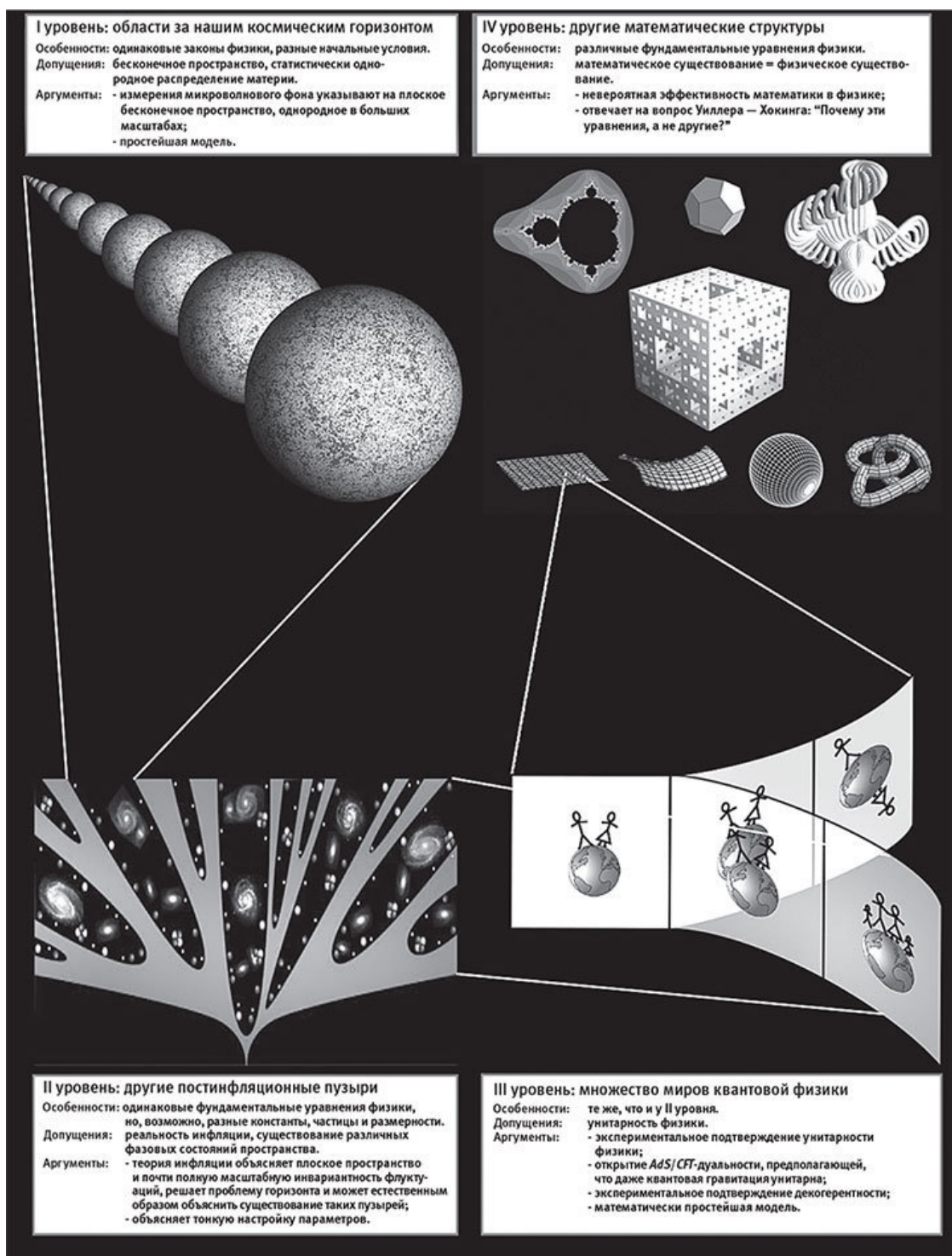


Рис. 12.2. Описываемые в этой книге параллельные вселенные образуют четырехуровневую иерархию, где каждый мультиверс является одним из многих элементов на следующем уровне.

Интересно, что в контексте гипотезы математической Вселенной (ГМВ) существование мультиверса IV уровня не является факультативным. ГМВ утверждает, что математическая структура является *самой* нашей внешней физической реальностью, а не просто

ее *описанием*. Эта эквивалентность между физическим и математическим существованием означает, что если математическая структура содержит самосознающую субструктуру, та будет воспринимать себя как существующую в реальной физической вселенной так же, как мы с вами (хотя, вообще говоря, во вселенной, отличающейся свойствами от нашей). Стивен Хокинг задал знаменитый вопрос: «Что вдыхает огонь в уравнения и создает Вселенную, чтобы они описывали ее?» В рамках ГМВ никакого огня не требуется, поскольку суть не в том, что математические структуры *описывают* Вселенную, а в том, что они *являются* Вселенной. Более того, и *создавать* ничего не требуется. Нельзя *образовать* математическую структуру – она просто существует. Но не она существует в пространстве и времени – пространство и время могут существовать в ней. Иными словами, все структуры, которые существуют математически, имеют одинаковый онтологический статус, и самый интересный вопрос не в том, какие из них существуют физически (все они существуют), но какие из них содержат жизнь и, возможно, нас. Многие математические структуры – додекаэдр, например, – недостаточно сложны, чтобы поддерживать самосознающие субструктуры какого-либо вида. Так что скорее всего мультиверс IV уровня напоминает огромную, по большей части необитаемую пустыню, где жизнь заключена в редких оазисах дружественных к биологии математических структур, вроде той, в которой живем мы. Аналогично (гл. 6), мультиверс II уровня по большей части бесплоден, а самосознание заключено в нем в крошечную долю пространства, которой повезло иметь как раз подходящие для жизни значения плотности темной энергии и других физических параметров. В мультиверсе I уровня история, похоже, повторяется и жизнь процветает в основном в крошечной доле пространства у самой поверхности планет. Так что мы, люди, находимся в чрезвычайно привилегированном месте!

Исследование мультиверса IV уровня

Наши ближайшие соседи

Потратим немного времени на знакомство с мультиверсом IV уровня и «зоопарком» содержащихся в нем математических структур. Начнем с ближних окрестностей. Хотя мы еще не знаем точно, в какой математической структуре живем, нетрудно представить себе множество небольших ее модификаций, дающих другие корректные математические структуры. Стандартная модель физики элементарных частиц включает определенные симметрии, которые математики обозначают так: $SU(3) \times SU(2) \times U(1)$, и если заменить их иными симметриями, получится другая математическая структура с частицами иных типов и силами, где кварки, электроны и фотоны заменены иными сущностями с новыми свойствами. В некоторых математических структурах нет света, а в других отсутствует гравитация. В эйнштейновском математическом описании пространства-времени числа 1 и 3, соответственно задающие количество временных и пространственных измерений, могут быть заменены иными значениями по выбору.

В гл. 6 мы обсудили, как в рамках одной математической структуры с единственным набором *фундаментальных* законов физики инфляция может порождать различные *эффективные* физические законы в разных частях пространства, образуя тем самым мультиверс II уровня. Сейчас мы говорим о чем-то более радикальном, где даже фундаментальные законы могут отличаться и где нет, например, квантовой механики. Если теорию струн можно строго определить математически, то существует математическая структура, для которой теория струн является верной «теорией всего», но для всего остального в мультиверсе IV уровня это не так.

Чтобы оценить мультиверс IV уровня, надо раскрепостить воображение, освободиться от предубеждений относительно того, какими должны быть законы физики. Рассмотрим

пространство и время. Вместо того чтобы быть непрерывными, как предполагается для нашего мира, они могут оказаться дискретными, как в «Пэкмене» и «Тетрисе» или в игре «Жизнь» Джона Конвея, где движения характеризуется лишь резкими скачками. Если отключить подачу команд пользователя так, чтобы эволюцию во времени можно было рассчитывать детерминистически, все эти игры отвечают корректным математическим структурам. На рис. 12.3 показан упоминавшийся в гл. 3 трехмерный клон «Тетриса» под названием *FRAC*, написанный мной с приятелем Пером Бергландом в 1990 году. Если запустить его и не трогать клавиатуру (много очков с такой стратегией не набрать), то игра от начала до конца определяется простыми математическими правилами, заложенными в программу. Они делают ее математической структурой, входящей в мультиверс IV уровня. Часто встречаются рассуждения о том, что даже в нашей Вселенной пространство-время может проявлять своего рода дискретность, скрывающуюся в столь малых масштабах, что мы до них еще не добрались.

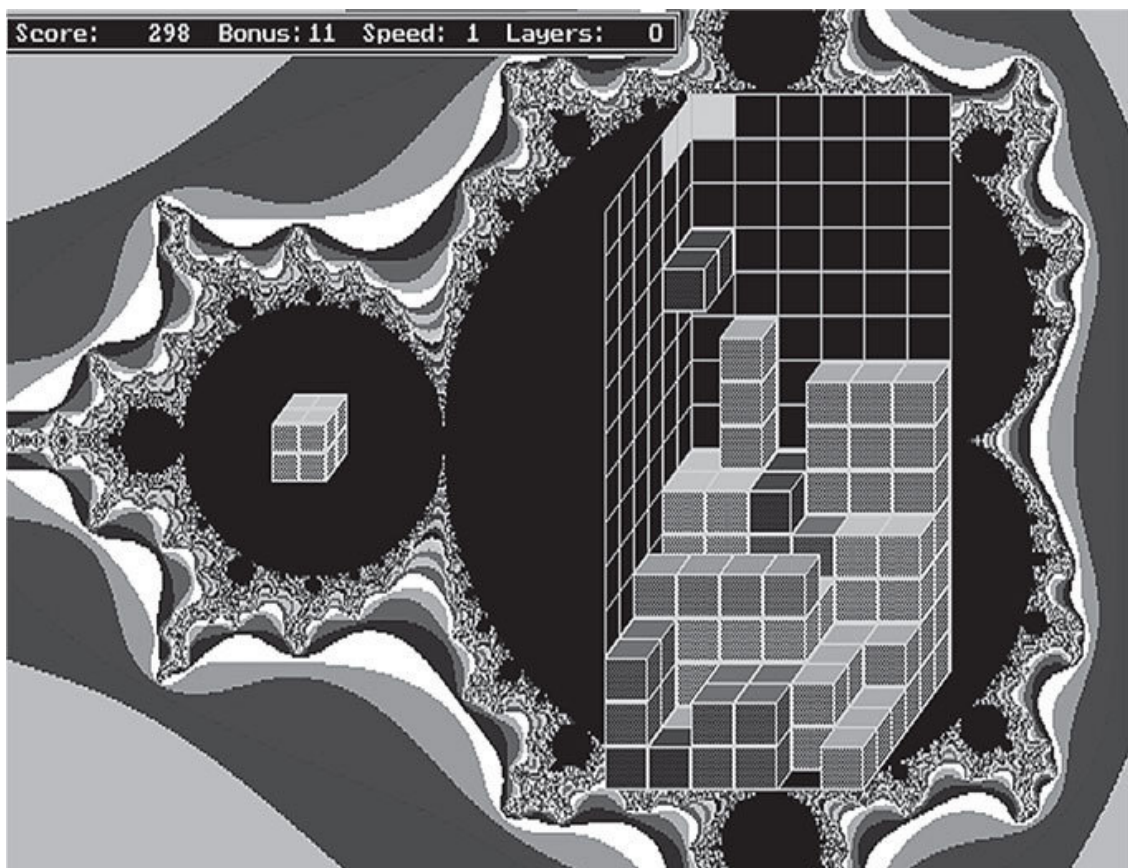


Рис. 12.3. *FRAC*, трехмерный клон «Тетриса», реализует математическую структуру, где пространство и время дискретны, а не непрерывны.

100	Пустое множество
105	Множество из пяти элементов 
113100120	Повороты треугольника 
11220000110	Группа C_2
11220001110	Булева алгебра
1132000012120201	Группа C_3
12410002311003102	Повороты тетраэдра 
126100024351100510243	Повороты куба 
214220010100111101110111	Граф в форме воздушного змея 
1281001230567410015620473	Повороты октаэдра 

Рис. 12.4. Компьютерная программа может автоматически генерировать упорядоченный список конечных математических структур, где каждая кодируется последовательностью цифр. В таблице показаны некоторые примеры, заданные при помощи схемы кодирования из моей статьи 2007 года. Слова и диаграммы во второй колонке – это избыточный «багаж», отражающий способы, какими люди называют и иллюстрируют эти структуры.

Или даже так: существует множество математических структур, где нет ни пространства, ни времени, а значит, не имеет и смысла говорить, будто в них что-то происходит. Большинство структур, примеры которых приведены на рис. 12.4, как раз такого типа. Скажем, внутри абстрактного додекаэдра ничего не происходит, поскольку эта математическая структура не содержит времени.

Наш «почтовый индекс» в мультиверсе IV уровня

Как отмечалось в гл. 10, математическая структура – это множество абстрактных элементов с отношениями между ними. Для более систематического изучения мультиверса IV уровня нам понадобится написать компьютерную программу, которая автоматически генерирует список существующих математических структур, начиная с простейших. На рис. 12.4 показаны десять строк этого списка, составленного с помощью схемы кодирования, которую я описал в статье 2007 года о математической Вселенной⁸⁴. Детали этого метода здесь несущественны, кроме того замечательного свойства, что *любая* математическая структура с конечным числом элементов обязательно появится в этом списке. А значит, любую из этих математических структур можно задать одним числом – ее номером в списке.

Для конечных математических структур все отношения можно описать конечными таблицами чисел, распространяющими идею таблицы умножения на другие типы отношений. Для структур с очень большим числом элементов эти таблицы становятся огромными и кодируются длинными числами, что смещает их вниз по списку. Однако для небольшой доли очень больших структур характерна внутренняя элегантная простота, что сильно упрощает их описание. Рассмотрим математическую структуру, элементами которой являются целые числа: 0, 1, 2, 3, ..., и отношения сложения и умножения. Было бы напрасной тратой сил выписывать для задания умножения колоссальную таблицу умножения для всех пар чисел:

⁸⁴ См.: <http://arxiv.org/pdf/0704.0646.pdf>.

даже если ограничиться первым миллионом чисел, таблица с миллионом строк и миллионом столбцов содержит триллион клеток. Вместо этого мы учим детей лишь таблице умножения первых десяти чисел, а также простому алгоритму, как использовать эту таблицу для умножения многозначных чисел. Для компьютеров мы описываем умножение еще эффективнее, чем для детей: когда все числа представлены в двоичной системе счисления, нужно задать таблицу умножения размером всего 2×2 для нулей и единиц и добавить короткую компьютерную программу, которая указывает, как пользоваться таблицей для перемножения сколь угодно больших чисел.

Программа хранится просто как конечная строка нулей и единиц (*битовая строка*), которую можно интерпретировать как целое число, записанное в двоичной системе. Это дает альтернативный способ кодирования и нумерации математических структур на рис. 12.4: пусть каждая математическая структура представляется числом, битовая строка которого является кратчайшей компьютерной программой, и ее функции определяют все отношения в данной структуре. Теперь структуры будут появляться вверху списка, если их просто описать, даже если они огромны по числу своих элементов. Пионеры теории сложности Рэй Соломонофф, Андрей Колмогоров и Грегори Хайтин определили *алгоритмическую сложность* (для краткости – *сложность*) битовой строки как длину компьютерной программы, которая выдает эту строку. Это означает, что альтернативный основной список перечисляет математические структуры в порядке возрастания сложности.

Замечательная особенность этого нового списка состоит в том, что он также может содержать математические структуры с бесконечным числом элементов. Так, для определения математической структуры из всех целых чисел с операциями сложения и умножения понадобится просто задать кратчайшую программу, которая способна считывать сколь угодно длинные числа, складывать и перемножать их. Такие алгоритмы есть в системе *Mathematica* и других программных пакетах компьютерной алгебры. Математические структуры, включающие бесконечное множество точек, образующее континуум, подобно пространству-времени, электромагнитным полям и волновым функциям, нередко можно хорошо аппроксимировать конечными структурами, пригодными для компьютерной обработки. Именно так я с коллегами и выполняю большую долю расчетов в области теоретической физики.

Короче говоря, мультиверс IV уровня можно систематически отобразить путем перечисления математических структур с помощью компьютера и изучения их свойств. Если однажды нам удастся определить, в какой математической структуре мы живем, можно будет сослаться на нее по номеру в основном списке, и мы получим возможность записать свой адрес в полной физической реальности (рис. 12.5). Государства применяют разные схемы записи адресов: в одних почтовые индексы состоят из цифр, в других – из букв, а кое-где индексов нет вообще. Аналогично, способ записи локальной части адреса будет зависеть от математической структуры: в большинстве их нет ни квантовой механики, ни инфляции, а значит, нет ни мультиверсов I, II и III уровней, ни планет, хотя другие структуры могут содержать иные типы параллельных вселенных, о которых мы и не догадываемся.

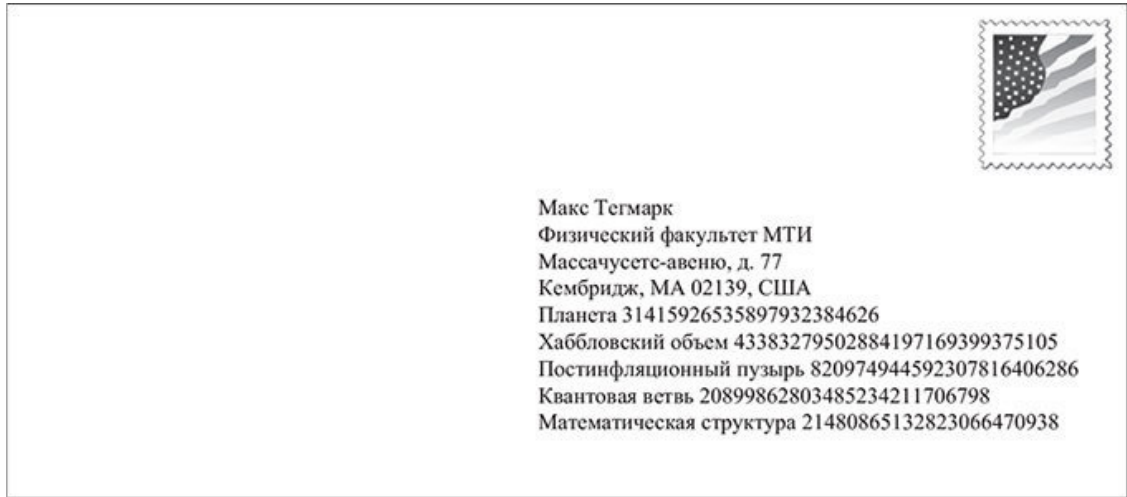


Рис. 12.5. Для задания адреса в полной физической реальности мне понадобится указать свое положение в мультиверсе IV уровня (номер моей математической структуры), в мультиверсе III уровня (ветвь квантовой волновой функции), в мультиверсе II уровня (постинфляционный пузырь), в мультиверсе I уровня (хаббловский объем), а также положение внутри нашей Вселенной. Я привел здесь небольшие числа, хотя на каждом из четырех уровней может быть бесконечно много членов, так что в мой реальный адрес будут входить числа слишком большие, чтобы они поместились на конверте.

Структура мультиверса IV уровня

Исследовать мультиверс IV уровня интересно. Если принять популярное формалистическое определение математики как «изучение математических структур», то исследование мультиверса IV уровня окажется тем самым делом, которым занимаются математики. Для физиков вроде меня, признающих гипотезу математической Вселенной, это равносильно исследованию фундаментальной физической реальности и поиску нашего места в ней. Причем исследовать мультиверс IV уровня проще, чем любой нижестоящий мультиверс или даже нашу Вселенную, поскольку для этого не нужны ни ракеты, ни телескопы – достаточно компьютеров и идей. Так что я получил массу удовольствия, создавая компьютерные программы, перечисляющие и классифицирующие математические структуры.

Занимаясь этим на практике, сталкиваешься с ошеломляющей избыточностью. Существует очень много способов написать компьютерную программу, которая выполняет любое вычисление, и столь же огромное число эквивалентных способов описания конечных математических структур с помощью таблиц чисел, соответствующих, например, способам упорядочения или обозначения элементов. В гл. 10 мы упоминали о том, что математическая структура – это класс эквивалентности описаний. Так что каждая математическая структура должна появляться в основном списке всего однажды, причем заданная лишь одним, самым коротким, из множества эквивалентных описаний.

Для любых двух математических структур можно определить новую структуру путем объединения всех элементов двух исходных структур и отношений между ними. Многие структуры в нашем основном списке как раз составные, и при изучении мультиверса IV уровня есть смысл их игнорировать. Это связано с тем, что нет отношений, соединяющих две части, а значит, самосознающий наблюдатель в одной из таких частей никогда не узнает о существовании другой части и не испытает ее влияния. Поэтому он может действовать так, будто другой части вовсе не существует либо она не является частью его математической структуры. Единственный случай, при котором составные структуры могут, вероятно, иметь значение, – когда они входят в решение проблемы меры, изменяя вероятности того, что вам

выпадет жить в той или иной математической структуре. Поскольку составные структуры описывать гораздо сложнее, они обычно оказываются гораздо дальше в нашем списке, чем их части, и это может придавать им меньшую «меру». На самом деле для любого конечного числа структур мультиверса IV уровня далеко внизу основного списка существует единая составная структура, содержащая их все.

Хотя математические структуры в мультиверсе IV уровня не соединены каким-либо физически осмысленным образом, на метауровне между ними много интересных отношений. Например, мы только что разобрали, как одна структура может быть объединением других. Или: одна структура может в некотором смысле описывать другую. Элементы первой могут соответствовать отношениям во второй, а отношения в первой описывать, что происходит при комбинировании отношений во второй. В этом смысле содержащая 24 отношения структура «повороты куба» (рис. 12.4) описывается структурой, которую математики называют «группа вращений куба». Ее 24 элемента соответствуют всем возможным поворотам, сохраняющим идеальный куб внешне неизменным. Множество математических структур обладает симметриями куба и, таким образом, имеет основания считаться кубами – например структуры, элементы которых соответствуют граням, вершинам или ребрам куба, а отношения указывают, как повороты переупорядочивают эти элементы, либо говорят, какие из них чьими соседями являются.

Ограничения, накладываемые на мультиверс IV уровня: неразрешимость, невычислимость и неопределенность

Насколько велик мультиверс IV уровня? Прежде всего, существует бесконечно много конечных математических структур: их так же бесконечно много, как и чисел: 1, 2, 3, ..., поскольку все их можно перечислить в одном пронумерованном списке. Но сколько в мультиверсе IV уровня бесконечных математических структур, и каждая состоит из бесконечного множества элементов? Мы видели, что некоторые бесконечные структуры также могут быть заданы и включены в основной список наряду с конечными структурами за счет использования компьютерных программ, определяющих их отношения. Однако включение бесконечности вызывает множество онтологических проблем. Чтобы убедиться в этом, рассмотрим математическую структуру, где элементами являются числа 1, 2, 3, ..., над которыми определены три отношения (функции) – правила, которые получают на входе числа и определяют новое число согласно следующим определениям:

1. $P(n)$ – для данного числа n , $P(n)$ обозначает наименьшее простое число, большее чем n .

2. $T(n)$ – для данного числа n , $T(n)$ обозначает наименьшее простое число-близнец, большее n (парное простое число – такое, что ближайшее к нему число-близнец отличается от него на 2; примером простых чисел-близнецов служат числа 11 и 13).

3. $H(m, n)$ – для данных двух чисел, m и n , $H(m, n)$ равно 0, если m -ая компьютерная программа в нашем основном списке всех компьютерных программ будет работать бесконечно, если ей на вход подать число n , и $H(m, n)$ равно 1, если, напротив, эта программа завершит работу, сделав конечное число шагов.

Подходит ли эта структура для включения в качестве члена в мультиверс IV уровня, или она недостаточно корректно определена? Первая функция, $P(n)$, совершенно замечательна: нетрудно написать программу, которая начинает проверять, являются ли следующие за n числа простыми, и останавливается, как только находит такое. У нас есть гарантия, что эта программа остановится после конечного числа шагов, поскольку известно, что существует бесконечно много простых чисел (это доказал еще Евклид). Так что $P(n)$ – пример *вычислимой функции*.

Вторая функция, $T(n)$, хитрее. Легко написать программу, которая проверяет каждое число, следующее за n , на предмет того, не является ли оно простым-близнецом. Но если подставить число n больше, чем $37568016956852^{666669} - 1$ (это самое большое простое число-близнец, известное сейчас), то нет гарантии, что программа когда-нибудь остановится и даст ответ. Несмотря на все усилия математиков, мы до сих пор не знаем, бесконечно ли количество простых чисел-близнецов. Так что мы не знаем, является ли $T(n)$ вычислимой, а значит, и строго определенной функцией. Таким образом, остается под вопросом, можно ли математическую структуру, содержащую такое неаккуратно заданное отношение, считать корректно определенной.

Третья функция, $H(m, n)$, еще более скверная: пионеры кибернетики Алонзо Черч и Алан Тьюринг установили, что *не существует* программы, которая могла бы вычислить $H(m, n)$ для произвольных аргументов m и n за конечное число шагов, так что $H(m, n)$ – это пример *невычислимой функции*. Иными словами, не существует программы, способной определять, какие из других программ в конце концов остановятся. Конечно, любая программа либо остановится, либо нет, но хитрость в том, что, как и в случае с простыми числами-близнецами, вам, возможно, понадобится ждать окончания расчетов вечно. Открытие Черчем и Тьюрингом невычислимых функций тесно связано с открытием логиком Куртом Геделем того факта, что некоторые арифметические теоремы неразрешимы, то есть их нельзя ни доказать, ни опровергнуть за конечное число шагов.

Следует ли рассматривать математические структуры как корректно определенные, даже если они содержат такие отношения, как H , которые нельзя вычислить и на сколь угодно мощном компьютере? Если да, то такая структура может быть известна лишь подобной оракулу сущности, которая способна реально выполнить бесконечное число вычислительных шагов, необходимых для получения ответа. Такие структуры никогда не появятся в обсуждавшемся выше основном списке: он учитывает лишь структуры, определяемые с помощью обычных компьютерных программ, а не при участии всемогущего оракула.

Наконец, рассмотрим одну из самых популярных математических структур нашего времени – *вещественные числа* (наподобие $3,141592\dots$, где последовательность десятичных цифр тянется до бесконечности). Они образуют континуум, и для задания даже одного произвольного такого числа потребуется список из бесконечного числа цифр, то есть бесконечное количество информации. Это означает, что обычные компьютерные программы не способны обрабатывать такие числа: проблема касается не только выполнения бесконечного числа вычислительных шагов, как в примере с функцией H , но также ввода и вывода бесконечного количества информации.

С другой стороны, работа Геделя может вызвать беспокойство: не лишена ли смысла ГМВ в применении к бесконечным структурам? Наша Вселенная тогда оказалась бы в некотором смысле противоречивой или неопределенной. Если принять тезис математика Давида Гильберта о том, что «математическое существование сводится, по сути, к отсутствию противоречий», то внутренне противоречивая структура не существует математически, не говоря уже о физическом существовании, как в ГМВ. Стандартная модель физики включает такие повседневно применяемые математические структуры, как целые и вещественные числа. Тем не менее работа Геделя оставляет открытыми вопросы, не является ли повседневная математика внутренне противоречивой и не существует ли в рамках теории чисел доказательства конечной длины, демонстрирующего, что $0 = 1$. На основе такого шокирующего результата можно было бы доказать, что любое синтаксически корректное утверждение о целых числах является истинным, и математика в том виде, как мы ее знаем, обрушилась бы, подобно карточному домику.

Подобные сомнения относительно неразрешимости и внутренней противоречивости применимы лишь к математическим структурам, содержащим бесконечно много элементов.

Присущи ли бесконечности, неразрешимости и потенциальные внутренние противоречия непосредственно фундаментальной физической реальности? Или это, по сути, миражи, артефакты, возникающие в результате нашей игры с огнем и применения мощных математических инструментов, которые скорее более удобны в использовании, нежели подходят для фактического описания нашей Вселенной? То есть – насколько корректно определенными должны быть математические структуры, чтобы быть реальными, выступать членами мультиверса IV уровня?

Есть целый спектр интересных возможностей для квалификации структур:

1. Нет структур (т. е. гипотеза математической Вселенной неверна).
2. Финитные (конечные) структуры. Они тривиально вычисляются, поскольку все их отношения можно задать таблицами конечного размера.
3. Вычислимые структуры (отношения в которых определяются останавливающимися вычислениями).
4. Структуры с отношениями, определяемыми вычислениями, которые не обязательно останавливаются (могут потребовать бесконечного числа шагов), подобно примеру с функцией H .
5. Еще более общего вида структуры, включающие в том числе континуум, где типичные элементы требуют для своего описания бесконечного количества информации.

Гипотеза вычислимой Вселенной

Интересные возможности предоставляет нам *гипотеза вычислимой Вселенной* (ГВВ). Она состоит в том, чтобы провести границу по варианту № 3 и дисквалифицировать структуры более общего вида:

Математическая структура, которая является нашей внешней физической реальностью, задана вычислимыми функциями.

Я имею в виду следующее: все отношения (функции), которые определяют математическую структуру, могут быть реализованы как вычисления, которые гарантированно останавливаются после конечного числа шагов. Если ГВВ неверна, то еще более консервативной гипотезой является гипотеза финитной Вселенной (ГФВ). Она проводит границу по варианту № 2: наша внешняя реальность является финитной математической структурой.

Мне кажется интересным, что очень близкие вопросы дебатировались среди математиков без ссылок на физику. Согласно финитистской школе математиков, к которой принадлежали Леопольд Кронекер, Герман Вейль и Рубен Гудстейн, математический объект не существует, если его нельзя построить из целых чисел за конечное число шагов. Это ведет прямо к варианту № 3.

Согласно ГВВ, математическая структура, которая является нашей физической реальностью, обладает привлекательным свойством вычислимости, а значит, является корректно определенной в строгом смысле (то есть все ее отношения могут быть вычислены). Таким образом, у нашей Вселенной не может быть никаких невычислимых (неразрешимых) физических особенностей, а значит, можно не беспокоиться, что работы Черча, Тьюринга и Геделя каким-то образом сделают наш мир неполным или внутренне противоречивым. Я не знаю точно, каковы свойства нашей физической реальности, но уверен, что эти свойства существуют в том смысле, что они корректно определены: природа наверняка знает, что делает.

Многих авторов озадачивало, почему наши физические законы выглядят относительно просто. Например, почему Стандартная модель физики элементарных частиц обладает такими простыми симметриями, которые мы обозначаем как $SU(3) \times SU(2) \times U(1)$, и требует всего 32 параметра (гл. 10), тогда как большинство альтернатив значительно сложнее

ее? Очень соблазнительно думать о том, что свой вклад в эту простоту внесла ГВВ, которая строго ограничивает сложность природы. Может быть, изгнав континуум, ГВВ также поможет уменьшить размер инфляционного ландшафта и разрешить космологическую проблему меры? Она в значительной мере связана с возможностью истинного континуума вечно испытывать экспоненциальное расширение, порождая бесконечное число наблюдателей.

Это были хорошие новости. Однако, хотя ГВВ имеет привлекательные черты, гарантирующие строгую определенность нашей Вселенной и, возможно, снижающие остроту космологической проблемы меры за счет ограничения того, что считается существующим, она также приводит к серьезным вызовам.

Прежде всего меня беспокоит, что ГВВ кажется сдачей важных философских высот, так как, по сути, она признает: хотя *где-то* существуют все математические структуры, некоторые из них обладают привилегированным статусом. Но если ГВВ верна, то все остальные математические ландшафты являются, по большому счету, иллюзиями, фундаментально неопределенными и в любом смысле несуществующими.

Более насущной является та проблема, что наша нынешняя Стандартная модель (как и все исторически успешные теории) нарушает ГВВ, и совершенно неочевидно, что существует жизнеспособная вычислимая альтернатива. Главная причина нарушения ГВВ состоит в использовании континуума, обычно в форме вещественных и комплексных чисел. Они не могут служить даже исходными данными для финитных вычислений, поскольку в общем случае требуют для своего задания бесконечно много битов. Даже те подходы, в рамках которых предпринимается попытка избавиться от классического континуума пространства-времени путем дискретизации или квантования, обычно применяют непрерывные переменные для других элементов теории, таких как напряженность электромагнитного поля или амплитуда квантовой волновой функции.

Один из интересных подходов к проблеме континуума состоит в замене вещественных чисел математической структурой, которая имитирует континуум, сохраняя вычислимость, – например алгебраическими числами. Другой подход (он кажется мне перспективнее) состоит в том, чтобы перестать рассматривать континуум в качестве фундаментальной структуры и попробовать относиться к нему как к аппроксимации. Я уже отмечал, что физики никогда ничего не измеряли с точностью более 16 значащих цифр, и нет эксперимента, исход которого зависел бы от гипотезы существования истинного континуума или от способности природы вычислять нечто невычислимое. Поразительно, но многие основанные на континууме модели классической математической физики (например уравнения, описывающие волны, диффузию или течение жидкости) являются не более чем аппроксимацией лежащего в основе поведения совокупностей дискретных атомов. Исследования в области квантовой гравитации указывают на то, что даже классическое пространство-время на очень малых масштабах распадается. Таким образом, нет уверенности, что величины, с которыми мы обращаемся как с непрерывными (вроде пространства-времени, напряженности поля, амплитуды квантовой волновой функции), не являются лишь аппроксимациями чего-то дискретного. На самом деле некоторые дискретные вычислимые структуры (и даже финитные, удовлетворяющие ГФВ) могут аппроксимировать континуальную физическую модель настолько хорошо, что физики применяют их, когда нужно выполнить практические вычисления, оставляя открытым вопрос о том, что ближе к математической структуре Вселенной – первое или второе. Некоторые исследователи, например Конрад Цузе, Джон Барроу, Юрген Шмидхубер и Стивен Вольфрам, зашли по этому пути настолько далеко, что предполагают и вычислимость, и финитность законов природы, подобно клеточным автоматам или компьютерным моделям. Отмечу, однако, что эти предположения отличаются от ГВВ и ГФВ тем, что требуют вычислимости *эволюции во времени*, а не просто *описания* (отношений) структуры.

Еще один поворот. Физики нашли примеры того, как нечто непрерывное (вроде квантовых полей) может порождать дискретное решение (вроде кристаллической решетки), которая, в свою очередь, кажется похожей на непрерывную среду в больших масштабах, и при этом подвержена колебаниям, которые ведут себя как дискретные частицы, называемые фононами. Мой коллега из МТИ Вэнь Сяоган показал, что «эмерджентные» частицы могут даже вести себя, как частицы в нашей Стандартной модели. Это открывает возможность существования множества слоев эффективно непрерывных и дискретных описаний, надстроенных над дискретной вычислимой структурой в основании.

Трансцендентная структура IV уровня

Выше мы рассмотрели тесную взаимосвязь математических структур с вычислениями, при которой первые определяются вторыми. С другой стороны, вычисления – не более чем частный случай математических структур. Так, информационное содержание (состояние памяти) цифрового компьютера – эта строка битов (скажем, 1001011100111001...) большой, но конечной длины, эквивалентная некоему большому, но конечному целому числу n , записанному в двоичной системе. Обработка информации в компьютере – это детерминистическое правило изменения каждого состояния памяти на другое (применяемое снова и снова). Так что математически это просто отображающая целые числа на себя функция f , которая многократно применяется: $n, f(n), f(f(n)) \dots$. Иными словами, даже самая сложная компьютерная модель – это не более чем частный случай математической структуры, а значит, она включается в мультиверс IV уровня.

На рис. 12.6 показано, как вычисления и математические структуры связаны не только друг с другом, но также с *формальными системами* – абстрактными символическими системами аксиом и правил вывода, которые математики применяют для доказательства теорем о математических структурах. Прямоугольники на рис. 12.1 соответствуют таким формальным системам. Если формальная система описывает математическую структуру, то говорят, что последняя является *моделью* первой. Более того, вычисления могут порождать теоремы в формальных системах (для некоторых классов формальных систем существуют алгоритмы, способные вычислить все теоремы).

На рис. 12.6 также показано, что во всех трех вершинах треугольника потенциально существуют проблемы: отношения в математических структурах могут быть неопределенными, формальные системы могут содержать неразрешимые утверждения, а вычисления могут не останавливаться после конечного количества шагов. Отношения между тремя вершинами и соответствующими трудностями обозначены шестью стрелками, смысл которых я подробно объяснил в статье 2007 года о математической Вселенной. Поскольку разные стрелки изучаются специалистами из разных областей – от математической логики до информатики, – исследование этого треугольника как целого является междисциплинарным. Я думаю, оно заслуживает большего внимания.



Рис. 12.6. Стрелки обозначают тесные взаимосвязи между математическими структурами, формальными системами и вычислениями. Вопросительный знак указывает на то, что все это аспекты одной трансцендентной структуры, природу которой мы до конца пока не понимаем.

В центре треугольника я поставил вопросительный знак. Он указывает на предположение, что три вершины (математические структуры, формальные системы и вычисления) являются просто аспектами одной лежащей в основе трансцендентной структуры, природу которой мы пока понимаем не до конца. Эта структура – возможно, ограниченная до определенной (разрешимой, останавливающейся) части, как в ГВВ, существует *где-то* в свободном от «багажа» виде и являет собой всю полноту математического и физического существования.

Следствия существования мультиверса IV уровня

В этой главе мы смогли показать, что фундаментальная физическая реальность является мультиверсом IV уровня, и начали разбирать его математические свойства. Теперь займемся его физическими свойствами, а также следствиями, вытекающими из самой идеи мультиверса IV уровня.

Симметрии и не только

Если взять конкретную математическую структуру из нашего списка, служащего атласом мультиверса IV уровня, то как вывести физические свойства, которые будут восприниматься находящимся в ней самосознающим наблюдателем? Иными словами, каким образом бесконечно разумный математик, начав с математического определения структуры, выводит физические свойства, которые мы в гл. 9 назвали «консенсусной реальностью»?⁸⁵

В гл. 10 мы показали, что его первым шагом стало бы вычисление того, какими симметриями обладает математическая структура. Свойства симметрии относятся к числу тех немногих типов свойств, которыми обладает любая математическая структура, и они могут для обитателей данной структуры проявляться как физические симметрии.

По большому счету, вопрос о том, что именно наш математик, исследуя произвольную структуру, должен далее вычислить, неясен. Но меня удивляет, что в конкретной математической структуре, которую мы населяем, дальнейшие исследования ее симметрий привели поистине к золотой жиле. Эмми Нетер в 1915 году доказала, что каждая непрерывная симметрия нашей математической структуры приводит к так называемому закону сохранения в физике, то есть к тому, что некоторая величина гарантированно остается неизменной и возникает постоянство, которое может быть замечено самосознающими наблюдателями и получить у них «багажное» название. Все сохраняющиеся величины, которые мы обсуждали в гл. 7, соответствуют таким симметриям. Например, энергия соответствует симметрии относительно переноса во времени (то есть тому, что законы физики остаются всегда одинаковыми), импульс соответствует симметрии переноса в пространстве (тому, что законы остаются одинаковыми везде), угловой момент соответствует вращательной симметрии (тому, что пустое пространство не имеет выделенного направления «верх»), а электрический заряд соответствует определенной симметрии в квантовой механике. Венгерский физик Юджин Вигнер обнаружил, что эти симметрии также диктуют все квантовые свойства, которыми могут обладать частицы, включая массу и спин. Иными словами, Нетер и Вигнер показали, что, по крайней мере в нашей математической структуре, изучение симметрий открывает, какого рода «материи» могут в ней существовать. Как говорилось в главе 7, некоторые мои коллеги любят в шутку сказать, что частица – это просто «элемент неприводимого представления группы симметрии». Становится ясно, что почти все наши физические законы вытекают из симметрий, а лауреат Нобелевской премии по физике Филип Уоррен Андерсон пошел еще дальше, заявив, что «лишь небольшое преувеличение сказать, что физика сводится к изучению симметрии».

Почему симметрии играют такую важную роль в физике? ГМВ отвечает, что физическая реальность обладает свойствами симметрии, поскольку она математическая структура, а математические структуры обладают свойствами симметрии. Тогда более глубокий вопрос о том, почему конкретная структура, в которой мы обитаем, имеет так много симметрий, становится эквивалентным вопросу о том, почему мы оказались в этой конкретной структуре, а не в другой, обладающей меньшей симметрией. Ответ может состоять отчасти в том, что симметрии, по-видимому, скорее правило, чем исключение для математических структур – особенно крупных, находящихся не очень далеко внизу в основном списке (то есть таких, для которых простые алгоритмы определяют отношения большого числа элементов, из-за чего у всех них много общих свойств). Также может сказываться эффект антропной селекции: как отмечал Вигнер, существование наблюдателей, способных замечать закономерности в окружающем их мире, вероятно, требует симметрий, так что, раз мы являемся

⁸⁵ В философии науки общепринятый подход состоит в том, что теория в математической физике может быть разбита на: 1) математическую структуру, 2) эмпирическую сферу и 3) набор правил сопоставления, которые связывают части математической структуры с частями эмпирической сферы. Если ГМВ верна, то 2) и 3) излишни в том смысле, что они могут, по крайней мере в принципе, быть выведены из 1). В таком случае их можно рассматривать как удобное руководство пользователя по теории, определенной 1).

наблюдателями, следует ожидать, что мы окажемся в высокосимметричной математической структуре. Представьте себе попытку понять мир, в котором эксперименты никогда не повторяются, поскольку их исход зависит от того, где и когда вы их выполняете. Если бы брошенный камень иногда падал вниз, иногда летел вверх, да и все остальное вело бы себя внешне произвольным образом, не было бы смысла в развитии мозга.

При современном способе изложения физики симметрии рассматриваются в качестве исходных положений, а не выводов. Так, Эйнштейн построил специальную теорию относительности на основе лоренцевой симметрии (утверждения, гласящего, что вы не можете определить, когда вы находитесь в покое, поскольку все законы физики, включая определяющие скорость света, одинаковы для всех равномерно движущихся наблюдателей). Аналогично симметрия, называемая $SU(3) \times SU(2) \times U(1)$, обычно берется за исходное предположение Стандартной модели физики элементарных частиц. В рамках гипотезы математической Вселенной логика изменяется на противоположную: симметрии – это не предположение, а просто свойства математической структуры, вычисляемые из ее определения в основном списке.

Иллюзия начальных условий

В сравнении с тем, как мы обычно обучаем физике студентов МТИ, мультиверс IV уровня – это подход к предмету от совершенно иной начальной точки, и это заставляет реинтерпретировать большинство традиционных физических понятий. Некоторые понятия, такие как симметрии, сохраняют свое центральное положение. Другие, напротив (например, начальные условия, сложность и случайность), интерпретируются как, по сути, иллюзии, существующие лишь в сознании наблюдателя, а не во внешней физической реальности.

Для начала разберемся с начальными условиями (гл. 6). Никто не сформулировал традиционный взгляд на начальные условия лучше Юджина Вигнера: «Наши знания о физическом мире делятся на две категории – начальные условия и законы природы. Состояние мира описывается начальными условиями. Они сложные, и в них не обнаруживается строгих закономерностей. По большому счету, физик не интересуется начальными условиями, а оставляет их исследование астроному, геологу, географу и т. д.». Иначе говоря, физики традиционно называют правила, которые нам удалось понять, «законами» и отправляют все, что мы не можем понять, в категорию «начальных условий». Законы позволяют предсказывать, как эти условия будут меняться во времени, но не дают информации о том, почему все началось именно так.

Гипотеза математической Вселенной, напротив, не оставляет места для такой произвольной вещи, как начальные условия, полностью исключая их из числа фундаментальных понятий. Это связано с тем, что наша физическая реальность является математической структурой, которая *полностью* задана во всех аспектах своим определением в основном списке. Предполагаемая «теория всего», утверждающая, что все «появилось» или «было создано» в не вполне определенном состоянии, будет представлять собой неполное описание, нарушающее ГМВ. Математической структуре не позволено быть частично неопределенной. Так что традиционная физика признает начальные условия, а ГМВ их отвергает. И что нам с этим делать?

Иллюзия случайности

Из-за требования полной определенности ГМВ также отвергает другое понятие, играющее центральную роль в физике, – случайность. Что бы ни *казалось* наблюдателю случайным, в конечном счете на фундаментальном уровне это должно быть иллюзией, поскольку в математической структуре нет ничего случайного. Тем не менее в учебниках физики это слово встречается часто: квантовые измерения, говорится в них, дают случайные исходы,

и тепло в чашке кофе, как утверждается, вызвано случайным движением молекул. И вновь традиционная физика признает нечто, отвергаемое ГМВ.

Загадка начальных условий и загадка случайности связаны. По грубым оценкам, требуется почти гугол (10^{100}) битов информации, чтобы описать реальное состояние всех частиц нашей Вселенной в данный момент. Каково происхождение этой информации? Традиционный ответ включает сочетание начальных условий и случайности: для описания начального состояния Вселенной необходимо множество битов, поскольку традиционные законы физики ничего об этом не говорят, а затем нам нужны дополнительные биты для описания исходов случайных процессов, которые имели место между «тогда» и «теперь». Однако ГМВ требует, чтобы все было задано точно. Она отвергает и начальные условия, и случайность. Как же объяснить всю эту информацию? Если математическая структура достаточно проста, чтобы ее можно было описать уравнениями, уместящимися на футболке, то это, честно говоря, кажется невозможным.

Давайте разберемся с этим.

Иллюзия сложности

Сколько информации действительно содержит наша Вселенная? Информационное содержание (алгоритмическая сложность) чего-либо – это длина в битах его самого краткого самодостаточного описания. Чтобы оценить тонкость этого вопроса, сначала разберемся, сколько информации содержит каждый из шести паттернов на рис. 12.7. На первый взгляд, два паттерна слева очень похожи. Это внешне случайные наборы $128 \times 128 = 16\,384$ черных и белых пикселей. Можно предположить, что для описания каждого нужно около 16 384 битов – по одному биту для цвета каждого пикселя. Но хотя это верно для верхнего паттерна, который я построил с помощью квантового генератора случайных чисел, в нижнем есть скрытая простота: это просто двоичные цифры квадратного корня из двух. Этого простого описания достаточно для вычисления всего паттерна $\sqrt{2} \approx 1,414213562\dots$, что в двоичной системе счисления записывается как $1,0100001010000110\dots$. Условно примем, что эту последовательность из 0 и 1 можно сгенерировать компьютерной программой длиной 100 битов. Тогда видимая сложность нижнего левого рисунка оказывается иллюзией: мы видим не 16 384 бита информации, а никак не более 100.

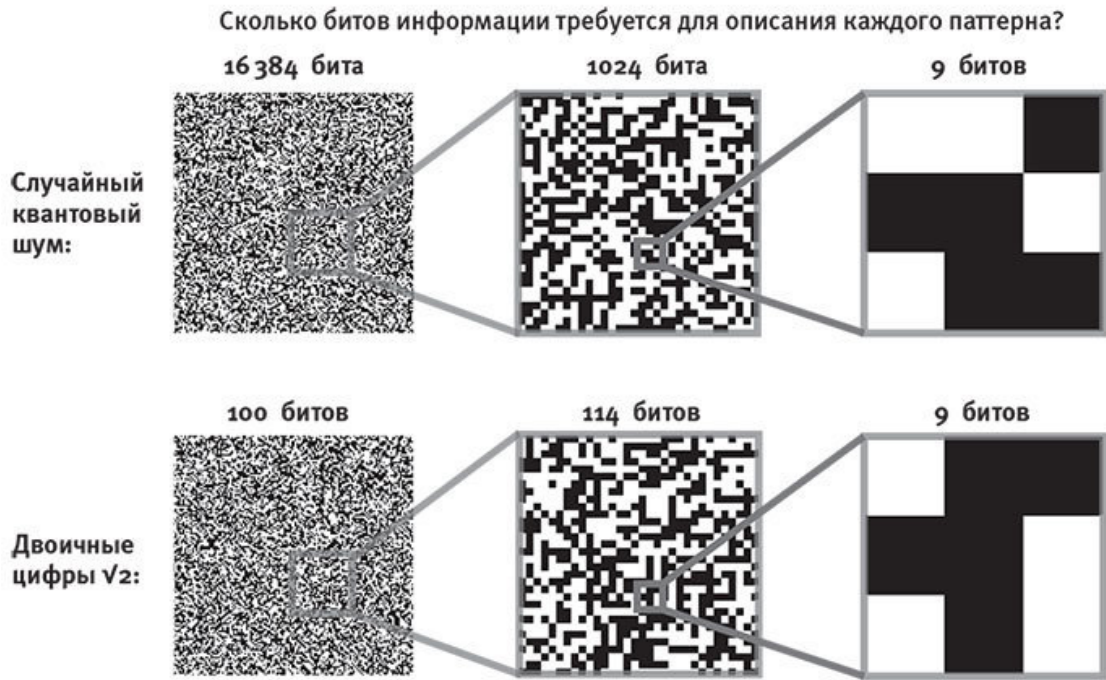


Рис. 12.7. Сложность паттерна (сколько битов информации нужно для его описания) не всегда очевидна. Слева сверху $128 \times 128 = 16\,384$ квадрата, которые случайным образом окрашены в черный или белый цвет, что обычно нельзя описать, используя менее 16 384 битов. Маленькие фрагменты этого паттерна (сверху посередине и справа) состоят из меньшего числа случайно окрашенных квадратов, а значит, их описание требует меньше битов. С другой стороны, нижний левый узор может быть сгенерирован очень короткой (скажем, 100-битовой) программой, поскольку это просто двоичные цифры числа $\sqrt{2}$ (0 = черный квадрат, 1 = белый). Для описания нижнего среднего квадрата потребуется задать дополнительных 14 битов, указывающих, какие цифры числа $\sqrt{2}$ в нем используются. Наконец, для правого нижнего рисунка потребуется 9 битов – столько же, сколько и для рисунка над ним. Этот паттерн настолько мал, что здесь не поможет знание того, что это часть $\sqrt{2}$.

Дело еще сильнее запутывается, когда доходит до информационного содержания малых частей. В верхнем ряду на рис. 12.7 все обстоит так, как можно ожидать: чем меньше паттерн, тем он проще и тем меньше информации требуется для его описания – нам нужно по 1 биту для описания черного или белого пиксела. Но в нижнем ряду мы видим прямо противоположный пример. Здесь меньшее становится большим в том смысле, что средний паттерн *сложнее* левого, его описание требует больше битов. Теперь недостаточно просто сказать, что это двоичные цифры $\sqrt{2}$: следует также указать, с каких цифр начинается паттерн, а на это в данном случае потребуется еще 14 битов. Короче говоря, *целое может содержать меньше информации, чем сумма его частей, а иногда даже меньше, чем одна часть*.

Наконец, описание двух крайних справа паттернов на рис. 12.7 требует по 9 битов. Мы знаем, что правый нижний паттерн спрятан среди 16 384 цифр $\sqrt{2}$, но для такого маленького паттерна это знание уже неинтересно и бесполезно: существует лишь $2^9 = 512$ возможных паттернов длиной 9, так что данный узор прячется в *большинстве* случайно выглядящих строк из тысячи 0 и 1.

На рис. 12.8 изображена красивая математическая структура, известная как множество (фрактал) Мандельброта. Она обладает тем замечательным свойством, что сложные паттерны существуют в ней на сколь угодно малых масштабах, и хотя многие из них кажутся похожими, повторяющихся среди них нет. Насколько сложны два приведенных изображе-

ния? Каждое содержит около 1 млн пикселей, которые, в свою очередь, представляются 3 байтами информации⁸⁶ (байт равен 8 битам), а значит, для описания каждого изображения требуется несколько мегабайт. Однако левое изображение можно вычислить с помощью программы длиной всего в несколько сотен байтов, многократно выполняющей простое вычисление $z^2 + c$.

Правое изображение тоже простое, поскольку является крошечной частью левого. При этом оно немного сложнее: чтобы указать 20-значный номер одной из 10^{20} частей, дополнительно требуется 8 байтов информации. Так что вновь меньшее становится большим в том смысле, что видимое информационное содержание увеличивается, когда мы ограничиваем свое внимание малой частью целого, теряя симметрию и простоту, характерные для совокупности частей. А вот еще более простой пример: алгоритмическое информационное содержание произвольного числа, записываемого триллионом цифр, существенно, поскольку кратчайшая программа, печатающая это число, не может быть чем-то гораздо лучшим, чем просто записью всего триллиона цифр. Однако список *всех* чисел 1, 2, 3, ... может быть сгенерирован совершенно тривиальной компьютерной программой, так что сложность множества меньше сложности типичного его члена.

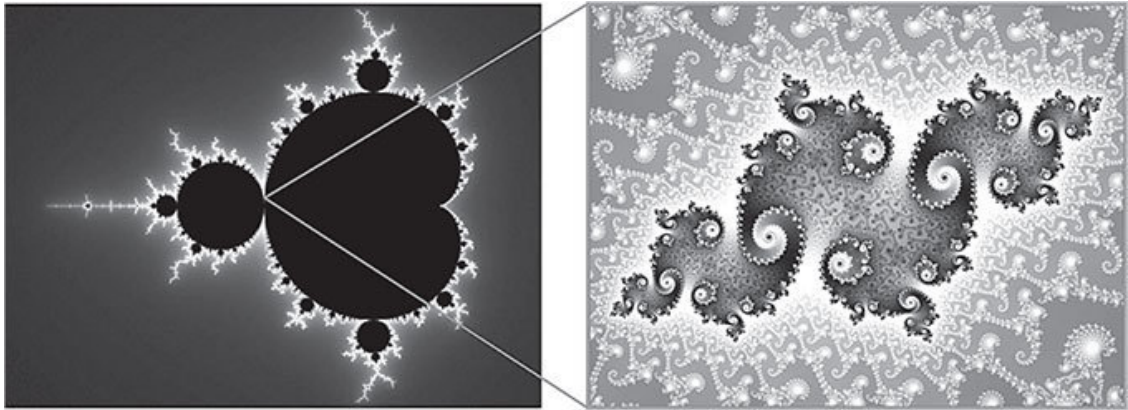


Рис. 12.8. Несмотря на миллионы искусно раскрашенных пикселей, множество Мандельброта (*слева*) имеет очень простое описание: точки на рисунке соответствуют тому, что математики обозначают комплексным числом c , а цвет указывает, насколько быстро комплексное число z устремляется к бесконечности, если начать с $z = 0$ и продолжать вводить его в квадрат, прибавляя c , то есть повторно применяя преобразование $z = z^2 + c$. Парадоксально, но описание правого изображения требует больше информации, несмотря на то, что оно лишь малая часть левого: если разрезать множество Мандельброта примерно на сто триллионов триллионов частей, оно само окажется одной из них, а информация, содержащаяся на правом изображении, по сути, соответствует ее адресу внутри большого изображения, поскольку самый экономичный способ описать ее – сказать нечто вроде: «31415926535897932384-й фрагмент множества Мандельброта».

Теперь вернемся к нашей физической Вселенной и почти гуголу битов, которые, по-видимому, требуются для ее описания. Стивен Вольфрам, Юрген Шмидхубер и некоторые другие ученые задумались, не является ли по большей части эта сложность иллюзией, подобно сложности множества Мандельброта или левого нижнего паттерна на рис. 12.7, то есть возникающей благодаря еще не открытому, но очень простому математическому пра-

⁸⁶ Речь идет о цветном изображении, представленном в трехканальном (*RGB*) формате – по 1 байту для задания яркости в каждом цветовом канале. – *Прим. пер.*

вилу. Хотя эта идея кажется мне элегантной, я с ней не согласен: по-моему, маловероятно, чтобы все числа, характеризующие нашу Вселенную, от паттернов на картах космического микроволнового фона, полученных *WMAP*, до положения песчинок на пляже, могли сводиться к почти полному ничто за счет простого алгоритма сжатия данных. На самом деле, как мы видели в гл. 5, космологическая инфляция явно предсказывает, что первичные космические флуктуации, из которых появилась значительная доля этой информации, распределены как случайные числа, для которых существенное сжатие данных невозможно.

Эти первичные флуктуации задают все, чем ранняя Вселенная отличалась от легко описываемой идеально однородной плазмы. Почему паттерн первичных космических флуктуаций кажется случайным? В гл. 5 мы видели, что, согласно космологической стандартной модели, инфляция порождает все возможные паттерны в различных областях космоса (в различных вселенных мультиверса I уровня). И, поскольку мы сами находимся во вполне типичной части этого мультиверса, открывающийся нам паттерн будет казаться случайным без каких-либо скрытых закономерностей, которые помогли бы сжать содержащуюся в нем информацию. Эта ситуация очень похожа на нижний ряд на рис. 12.7, где наша Вселенная (соотносимая с правым изображением) соответствует небольшой, кажущейся случайной части мультиверса I уровня (соотносимого с левым изображением), который имеет простое описание. Если вы вернетесь к гл. 6, то увидите, что рис. 6.2 становится эквивалентен нижнему ряду на рис. 12.7 (если дополнить последний так, чтобы на нем умещался гуголplex двоичных цифр числа $\sqrt{2}$, а правый рисунок содержал около гугола битов, как наша Вселенная). Хотя это еще не доказано, среди математиков широко признано, что цифры числа $\sqrt{2}$ ведут себя как случайные числа, поэтому рано или поздно появляется любая возможная последовательность (так же, как где-то в мультиверсе I уровня появляются вселенные со всеми возможными начальными условиями). Это означает, что последовательность из гугола цифр числа $\sqrt{2}$ ничего не говорит нам о числе $\sqrt{2}$, а указывает лишь, какое место в последовательности его цифр мы видим. Аналогичным образом, наблюдение гугола битов информации о кажущемся случайным фоне первичных космических флуктуаций, порожденном инфляцией, дает нам информацию лишь о том, где в огромном постинфляционном пространстве мы ведем наблюдение.

Реинтерпретация начальных условий

Выше выражалось беспокойство относительно начальных условий. Теперь у нас есть радикальный ответ: *эта информация относится не к нашей фундаментальной физической реальности, а к нашему месту в ней*. Огромная наблюдаемая нами сложность иллюзорна в том смысле, что реальность очень проста в описании, а гугол битов требуется просто для того, чтобы указать наш адрес в мультиверсе. Поскольку в нашей Галактике много планетных систем с различным числом планет (гл. 6), то когда мы говорим, что в Солнечной системе их восемь, в этом нет фундаментальной информации о нашей Галактике, а есть лишь некоторые сведения о нашем галактическом адресе. Поскольку мультиверс I уровня содержит другие Земли, на небе которых видны все возможные вариации рисунка космического микроволнового фона, информация, содержащаяся на картах *WMAP* или на фотографии ковша Большой Медведицы, сходным образом говорит о нашем мультиверсном адресе. Аналогично 32 физические константы из гл. 10 указывают наше место в мультиверсе II уровня (если он существует). Хотя мы думали, что вся эта информация относится к нашей физической реальности, она на самом деле относится к нам. Сложность — это иллюзия, она существует лишь в голове наблюдателя.

Первые мысли на этот счет появились у меня во время велосипедной поездки по мюнхенскому Английскому саду в 1995 году, и я изложил их в статье с провокационным названием «Действительно ли наша Вселенная почти не содержит информации?» Теперь я пони-

маю, что должен был обойтись без «почти», и вот почему. Наш мультиверс III уровня сильнее напоминает мне множество Мандельброта (рис. 12.8), чем пример с $\sqrt{2}$ (рис. 12.7), поскольку его части демонстрируют много закономерностей. В последовательности цифр числа $\sqrt{2}$ одинаково часто встречаются все возможные цепочки цифр, а во множестве Мандельброта многие рисунки (изображения ваших друзей, например) нигде не появляются. Так же, как большинство фрагментов множества Мандельброта, похоже, имеет общий художественный стиль, диктуемый формулой $z^2 + c$, большинство инфляционных вселенных в мультиверсе III уровня имеют общие закономерности развития во времени, вытекающие из квантовой механики. Когда я писал «почти не содержит информации», я имел в виду небольшое количество информации, необходимое для описания этих закономерностей, задания математической структуры, которая является мультиверсом III уровня. Но в свете гипотезы математической Вселенной даже эта информация не говорит нам ничего о фундаментальной физической реальности, а лишь указывает наш адрес в мультиверсе IV уровня.

Реинтерпретация случайности

Теперь, когда мы знаем, как интерпретировать начальные состояния, что можно сказать о случайности? Ответ на этот вопрос также следует искать в мультиверсе. Мы видели в гл. 8, что целиком детерминистическое уравнение Шредингера в квантовой механике способно порождать впечатление случайности у наблюдателя, находящегося в мультиверсе III уровня, и что ключевой процесс при более общем подходе оказался клонированием, не имеющим ничего общего с квантовой механикой. Например, случайность – это просто ощущение, возникающее у вас при клонировании: вы не можете предсказать, что будете ощущать в следующий момент, если появятся две ваши копии, воспринимающие различные события. В гл. 8 мы убедились, что видимая случайность вызывается клонированием наблюдателя в *некоторых* случаях. Теперь мы видим, что на самом деле она вызывается клонированием во *всех* случаях, поскольку ГМВ отвергает фундаментальную случайность (которая послужила бы логически возможным объяснением).

Иными словами, если начальные условия, кажущиеся произвольными, вызваны множественностью вселенных, то кажущаяся случайность вызвана вашей собственной множественностью. Эти две идеи сливаются, если рассматривать те параллельные вселенные, которые содержат субъективно неразличимые ваши копии. В этом случае, когда вы измеряете начальные условия своей вселенной, эта информация будет казаться случайной для всех ваших копий и не будет разницы, интерпретируете вы ее как определяемую начальными условиями или случайностью – информация та же самая. Наблюдая, в какой вы вселенной, вы обнаруживаете, какая из ваших копий делает наблюдения.

Почему сложность предполагает мультиверс

Выше мы много рассуждали о сложности Вселенной, но что можно сказать о сложности нашей математической структуры?

ГМВ не предопределяет, высока или низка сложность математической структуры с «птичьей» точки зрения, так что мы рассмотрим оба этих варианта. Если эта сложность чрезвычайно высока, то, очевидно, поиски описания такой математической структуры обречены на провал. Так, если описание структуры требует больше битов, чем описание наблюдаемой Вселенной, то мы не сможем даже сохранить информацию об этой структуре: она просто не уместится в нашей Вселенной. Примером такой теории высокой сложности была бы стандартная модель с ее 32 параметрами (гл. 10), явно заданными вещественными числами, такими как $1/\alpha = 1/137,035999\dots$, с бесконечным числом десятичных знаков без всякой упрощающей закономерности. Поскольку даже один параметр потребовал бы бесконеч-

ного информационного хранилища, эта математическая структура оказалась бы бесконечно сложной и на практике ее было бы невозможно описать.

Большинство физиков надеется, что «теория всего» окажется гораздо проще и ее можно будет описать количеством битов, которое уместится в книге, а лучше на футболке: это гораздо меньше гугола битов, нужных для описания Вселенной. Такая простая теория должна предсказывать мультиверс независимо от того, верна ГМВ или нет. Почему? Потому что «теория всего» по определению является полным описанием реальности. Если в ней недостаточно битов, чтобы полностью описать нашу Вселенную, то она должна описывать все вероятные комбинации звезд, песчинок и т. д., чтобы дополнительные биты, которые описывают Вселенную, просто кодировали, в какой из вселенных мы находимся (как в мультиверсном почтовом коде). Адрес на конверте (рис. 12.5) будет тогда иметь относительно короткую последнюю строку, указывающую теорию, но предшествующая ей строка адреса должна содержать около гугола символов.

Живем ли мы в модели?

Только что мы познакомились с тем, как гипотеза математической Вселенной меняет наш взгляд на многие фундаментальные вопросы. Обратимся теперь к другой подобной теме – симулированным реальностям. Та идея, что наша внешняя физическая реальность является некоей компьютерной моделью, долгое время оставалась исключительно предметом научной фантастики (и породила, например, «Матрицу»). Эрик Дрекслер, Рэй Курцвейл, Ханс Моравек и другие ученые утверждали, что появление смоделированного сознания не только возможно, но и неизбежно, а некоторые (например Фрэнк Типлер, Ник Бострем и Юрген Шмидхубер) пошли еще дальше и выдвинули предположение, что это уже случилось и мы являемся симуляциями.

С чего бы вам думать, что вы – симуляция? Да, многие фантасты предлагали сценарии, в которых будущая колонизация космоса преобразует большую часть материи нашей Вселенной в сверхмощные компьютеры, которые моделируют огромное число наблюдательных мгновений, субъективно неотличимых от ваших. Ник Бострем и другие доказывали, что в этом случае ваше текущее наблюдательное мгновение скорее всего является симулированным, поскольку таких мгновений большинство. Однако, думаю, эта аргументация логически противоречива: если доказательство верно, ваши неотличимые смоделированные копии также смогут им воспользоваться, а значит, существует еще больше дважды симулированных копий и вы, вероятно, симуляция внутри симуляции. Повторяя этот аргумент, вы придете к тому абсурдному выводу, что скорее всего являетесь симуляцией внутри симуляции внутри симуляции и т. д. с неограниченным числом уровней погружения. Я думаю, логическая ошибка случилась уже на первом шаге. Если вы склонны допустить, что являетесь симуляцией, то, как подчеркивал Филлип Хелбиг, вычислительные мощности вашей собственной (симулированной) вселенной несущественны: важны вычислительные ресурсы вселенной, в которой осуществляется симуляция, а о ней вы, в сущности, ничего не знаете.

Другие доказывали, что наша реальность по фундаментальным причинам не может быть симуляцией. Сет Ллойд ратовал за промежуточную возможность, согласно которой мы живем в аналоговой симуляции, осуществляемой квантовым компьютером, который, однако, никем не создан: просто структура квантовой теории поля математически эквивалентна этому пространственно распределенному квантовому компьютеру. Подобным же образом Конрад Цузе, Джон Барроу, Юрген Шмидхубер, Стивен Вольфрам и другие рассматривали ту идею, что законы физики соответствуют классическим вычислениям. Рассмотрим эти идеи в контексте гипотезы математической Вселенной.

Ошибочное представление о времени

Допустим, что наша Вселенная действительно является разновидностью вычисления. В литературе, посвященной симуляции Вселенной, распространено недоразумение, предполагающее, что наше физическое представление об одномерном времени обязательно должно приравняться к одномерной последовательности пошаговых вычислений. Ниже я докажу, что если ГМВ верна, то вычисления не обязательно реализуют *эволюцию* нашей Вселенной, а скорее *описывают* ее (определяя все соответствующие отношения).

Соблазн приравнять временные шаги к вычислительным вполне понятен: и те, и другие образуют одномерную последовательность, в которой (по крайней мере, в некантовом случае) следующий шаг определяется текущим состоянием. Однако этот соблазн проистекает из устаревшего классического описания физики. В теории относительности Эйнштейна в общем случае нет естественной и корректно определенной глобальной временной переменной, а в квантовой гравитации все еще хуже – там время появляется только как приближенное свойство конкретной подсистемы, рассматриваемой в качестве часов. В действительности соотношение времени «с точки зрения лягушки» с компьютерным временем ненадежно даже в контексте классической физики. Темп течения времени воспринимается наблюдателем в симулированной вселенной совершенно независимо от темпа, в котором компьютер выполняет моделирование, что подчеркивается в научно-фантастическом романе Грегга Игана «Город перестановок». Более того, напоминая Эйнштейна, нашу Вселенную, по-видимому, естественнее рассматривать не с «лягушачьей» точки зрения, то есть как трехмерное пространство, в котором происходят события, а с «птичьей», как четырехмерное пространство-время, которое просто существует. Поэтому для вычисления всего существующего нет необходимости в компьютере – все может просто храниться в виде четырехмерных данных, кодирующих все свойства математической структуры, которая является нашей Вселенной. Тогда отдельные временные срезы при желании можно считать последовательно и симулированный мир должен казаться его обитателям реальным, как в случае, когда хранятся лишь трехмерные данные, которые эволюционируют. Итак, *роль моделирующего компьютера заключается не в том, чтобы вычислить историю нашей Вселенной, а в том, чтобы специфицировать Вселенную.*

Как ее специфицировать? Способ хранения данных (тип компьютера, формат данных и т. д.) должен быть несущественен, так что степень, в которой обитатели симулированной вселенной воспринимают себя реальными, должна быть независима от метода, применяемого для сжатия данных. Физические законы, которые мы открыли, являются великолепным способом сжатия данных: они делают достаточным хранение начальных данных на некоторый момент времени, а также уравнений и программ вычисления будущего по этим начальным данным. Выше я объяснял, что начальные данные могут быть чрезвычайно простыми: популярные начальные состояния в квантовой теории поля с такими пугающими названиями, как *волновая функция Хартли – Хокинга* или *инфляционный вакуум Банча – Дэвиса*, обладают очень низкой алгоритмической сложностью. Их можно определить в коротких физических статьях, однако моделирование их эволюции во времени породило бы симуляцию не одной вселенной вроде нашей, а огромной декогерирующей совокупности параллельных вселенных. Поэтому весьма правдоподобно, что наша Вселенная (и даже весь мультиверс III уровня) может быть смоделирована очень короткой компьютерной программой.

Типы вычислений

Предыдущий пример отправляет нас к нашей конкретной математической структуре с ее квантовой механикой и всем прочим. В более общем виде, как уже говорилось, полное описание произвольной математической структуры является по определению заданием отношений между ее элементами. Ранее в этой главе мы видели, что для корректной определенности

этих отношений все функции должны быть *вычислимыми*: должна существовать компьютерная программа, которая рассчитывает отношения за конечное число шагов. Каждое отношение в математической структуре, таким образом, определяется вычислением. Иными словами, если наш мир – корректно определенная математическая структура в данном смысле, то он действительно неразрывно связан с вычислениями, хотя и с вычислениями иного типа, нежели обычно ассоциирующимися с гипотезой симуляции. Эти вычисления не *вызывают развития* нашей Вселенной, а *описывают* ее, определяя ее отношения⁸⁷.

Действительно ли симуляция должна выполняться?

Более глубокое понимание отношений между математическими структурами, формальными системами и вычислениями (треугольник на рис. 12.6) проливает свет на многие трудные вопросы. Один из них – проблема меры, которая досаждала нам в предыдущей главе и которая, по сути, является вопросом, как обращаться с мешающими бесконечностями и предсказывать вероятности того, что мы должны наблюдать. Так, поскольку любая симуляция Вселенной соответствует математической структуре, а значит, уже существует в мультиверсе IV уровня, можно ли в некоем разумном смысле говорить, что она *в большей степени* существует, если вдобавок запущена на компьютере? Этот вопрос еще усложняется тем, что вечная инфляция предсказывает бесконечное пространство с бесконечным числом планет, цивилизаций и компьютеров, среди которых могут быть такие, где запущены симуляции, а также с учетом того, что и мультиверс IV уровня включает в себя бесконечное число математических структур (их можно интерпретировать как компьютерные симуляции).

Тот факт, что наша Вселенная (вместе со всем мультиверсом III уровня) может быть смоделирована очень короткой компьютерной программой, вызывает вопрос: создается ли некоторое онтологическое различие тем, «запущено» это моделирование или нет? Если, как мы сказали, компьютер нужен лишь для описания, а не для вычисления истории, то полное описание, вероятно, уместилось бы на одной флешке и не потребовало бы процессорной мощности. Кажется абсурдом, что существование этой флешки могло бы как-либо влиять на то, существует ли описываемый ею мультиверс «в действительности». Даже если существование этой флешки имеет значение, некоторые элементы данного мультиверса будут содержать точно такие же флешки и тем самым «рекурсивно» поддерживать собственное физическое существование. Тут нет никакой «уловки-22» или проблемы курицы и яйца (что появилось сначала, флешка или мультиверс?): элементы мультиверса – это четырехмерные пространства-времени, тогда как «созидание» – это, конечно, понятие, имеющее смысл лишь *внутри* пространства-времени.

Смоделированы ли мы? Согласно ГМВ, наша физическая реальность является математической структурой, а раз так, она существует независимо от того, есть ли здесь или где-нибудь еще в мультиверсе IV уровня некто, создавший программу для ее моделирования (описания). Тогда единственный остающийся вопрос – может ли компьютерная симуляция сделать нашу математическую структуру в каком-либо разумном смысле более существующей, чем она уже есть. Если мы решим проблему меры, то, вероятно, обнаружим, что моделирование математической структуры немного увеличило бы ее меру – на некоторую долю меры той математической структуры, внутри которой она смоделирована. Я предполагаю, однако, что это даст в лучшем случае едва заметный эффект, так что в вопросе, смоделированы ли мы, я бы сделал ставку на ответ «нет».

⁸⁷ В действительности, как отмечает Кен Уортон в статье «Вселенная – не компьютер» (<http://arxiv.org/pdf/1211.7081.pdf>), наши законы физики могут быть такими, что прошлое не определяет будущее однозначно, так что даже идея, что наша Вселенная может быть симулирована, является, в принципе, гипотезой и не должна приниматься как нечто само собой разумеющееся.

Отношения между ГМВ, мультиверсом IV уровня и иными гипотезами

Интересные версии о природе фундаментальной физической реальности выдвигались многими исследователями на стыке философии, теории информации, компьютерных наук и физики. На эту тему я рекомендую книги Брайана Грина «Скрытая реальность» и Рассела Стэндиша «Теория ничто».

С философской стороны предположение, наиболее близкое к мультиверсу IV уровня, – это теория модельного реализма Дэвида Льюиса, который утверждал, что «все возможные миры столь же реальны, как и наш мир». Роберт Нозик выдвинул похожее предположение, которое назвал *принципом плодovitости*. Одна из наиболее распространенных претензий к модальному реализму состоит в том, что, поскольку он утверждает существование всех воображаемых вселенных, он не дает никаких проверяемых предположений. Мультиверс IV уровня может рассматриваться как уменьшенная, более строго определенная реальность, в силу замены «всех возможных миров» Льюиса «всеми математическими структурами». Представление о мультиверсе IV уровня *не предполагает*, что существуют все воображаемые вселенные. Мы можем вообразить множество вещей, которые математически не определены, а значит, не соответствуют математическим структурам. Математики публикуют статьи с доказательствами существования, которые демонстрируют математическую непротиворечивость различных описаний математических структур именно потому, что сделать это трудно и не во всех случаях возможно.

Со стороны компьютерных наук наиболее близко связанные предположения состоят в том, что наша физическая реальность – это некоторого рода компьютерная модель или модели, что обсуждалось выше в этой главе. Эта взаимосвязь наиболее ясно показана на рис. 12.6, где эти две идеи соответствуют двум вершинам треугольника: согласно гипотезе моделирования, наша реальность – это вычисление, а согласно ГМВ – математическая структура. Вычисления *реализуют эволюцию* нашей Вселенной в рамках гипотезы моделирования, но в рамках ГМВ они, скорее, ее описывают, определяя ее отношения. Согласно теориям вычисляемого мультиверса Юргена Шмидхубера, Стивена Вольфрама и других, *эволюция во времени* должна быть вычислимой, тогда как согласно гипотезе вычисляемой Вселенной (ГВВ) вычисляемым должно быть *описание* Вселенной (ее связи). Джон Барроу и Роджер Пенроуз предположили, что самосознающих наблюдателей могут содержать лишь структуры достаточно сложные, чтобы удовлетворять требованиям теоремы Геделя о неполноте. Выше мы видели, что ГВВ, по сути, утверждает прямо противоположное.

Проверка мультиверса IV уровня

Мы показали, что из гипотезы внешней реальности (ГВР) – она утверждает, что внешняя реальность существует совершенно независимо от людей, – вытекает гипотеза математической Вселенной (ГМВ): наша внешняя физическая реальность является математической структурой, а из нее, в свою очередь, следует существование мультиверса IV уровня. Поэтому наиболее прямой способ усилить или ослабить нашу уверенность в мультиверсе IV уровня – это продолжить изучение ГВР. Хотя однозначности относительно ГВР по-прежнему нет, я думаю, справедливо сказать, что большинство моих коллег-физиков под ней подпишется. А недавние успехи стандартных моделей в физике элементарных частиц и космологии оставляют мало места для предположений, будто наша фундаментальная физическая реальность, какой бы она ни была, не может существовать без нас. Рассмотрим тем не менее два потенциальных способа прямой проверки ГМВ и мультиверса IV уровня.

Предсказание типичности

Открытие того, что физические параметры кажутся точно настроенными для жизни (гл. 6), можно интерпретировать как свидетельство в пользу мультиверса, где все параметры принимают значения в широком диапазоне. Эта интерпретация делает существование обитаемой вселенной вроде нашей неудивительным и предсказывает, что именно в ней мы и должны себя обнаружить. В частности, мы видели, что одно из самых сильных свидетельств в пользу мультиверса II уровня появилось из наблюдаемой точной настройки плотности темной энергии. Может ли, хотя бы в принципе, точная настройка свидетельствовать и в пользу IV уровня мультиверса?

В 2005 году на физической конференции в Кембридже, прогуливаясь поздно вечером по старинным дворам Тринити-колледжа и беседуя с Энтони Агирре, я вдруг понял, что ответ – «да». И вот почему.

Допустим, подруга привезла вас в незнакомый город. Вы выходите из машины и видите странный набор дорожных знаков (рис. 12.9), запрещающих парковаться везде, за исключением места, где припарковалась она. Оказывается, в рамках экологической кампании новый мэр заказал десять знаков, которые случайным образом расставили на улице. Каждый знак запрещает парковку вдоль всей улицы с левой или с правой стороны от знака. Прodelав кое-какие вычисления, вы понимаете, что такой случайный процесс будет обычно запрещать парковку на всей улице и лишь с вероятностью около 1 % останется место, где парковаться разрешено⁸⁸. Это случится, только если все знаки со стрелками влево будут помещены левее всех знаков со стрелками вправо.

Просто совпадение? Если вы, подобно типичному ученому, не терпите необъяснимых совпадений, вы склонитесь к интерпретации, которая не требует такой невероятной удачи: в этом странном городе существует много улиц, возможно, около ста или больше. Это делает вероятным существование легальной парковки на *некоторой* улице, и поскольку ваша подруга знает город, совершенно неудивительно, что она выбрала для парковки именно это место. Данный пример точной настройки отличается от рассмотренного в гл. 6: то, что кажется точно настроенным, является не непрерывным, как плотность темной энергии, а скорее дискретным: все направления стрелок, указывающих влево и вправо, определенным образом согласованы.

⁸⁸ Если есть n случайных знаков, вероятность того, что парковка хоть где-нибудь окажется разрешенной, составляет: после того, как знаки расставлены, существует 2^n способов ориентации стрелок влево или вправо, и только $n + 1$ этих способов соответствует случаям, когда все стрелки влево находятся слева от всех стрелок вправо.

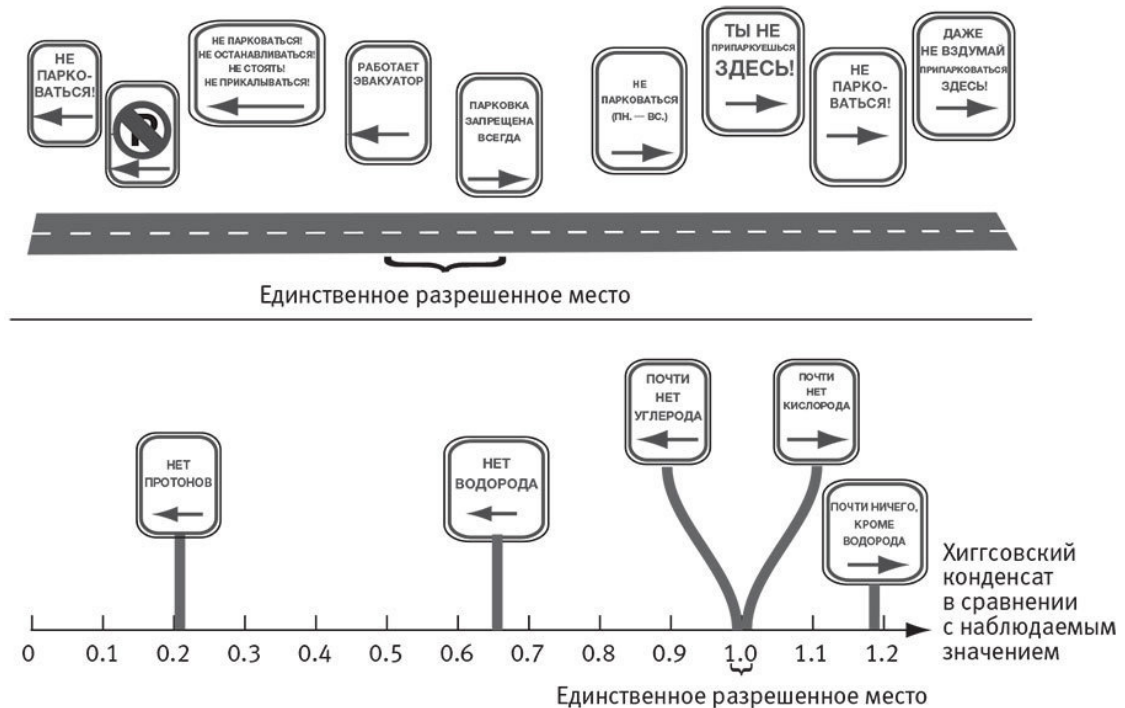


Рис. 12.9. Если на улице случайным образом размещено множество знаков и каждый запрещает парковку на всей улице либо слева, либо справа от знака, то крайне маловероятно, чтобы парковка на улице была разрешена хоть где-нибудь. Это произойдет, лишь если все стрелки влево располагаются слева от всех стрелок вправо (*вверху*). Аналогично, если у вселенной есть физический параметр, который должен удовлетворять множеству ограничений, чтобы позволить существование жизни (*внизу*), априори маловероятно, чтобы существовал хоть какой-нибудь пригодный для жизни диапазон значений этого параметра. Ситуации вроде тех, что показаны на рисунках, могут, таким образом, интерпретироваться как свидетельство существования соответственно множества улиц или математических структур в мультиверсе IV уровня.

Мой пример с парковкой, конечно, дурацкий, но, как показано в нижней части рис. 12.9, в нашей Вселенной мы наблюдаем нечто похожее. По горизонтальной оси отложен параметр, связанный с недавно открытой частицей Хиггса. А в недавней работе Джона Донахью, Крейга Хогана, Хайнца Оберхаммера и их соавторов показано, что эта величина, подобно плотности темной энергии, кажется очень точно настроенной: она примерно на 16 порядков меньше, чем было бы естественно ожидать. При этом изменение даже на 1 % вверх или вниз значительно изменяет количество кислорода и производимого звездами углерода. Увеличение на 18 % радикально снижает способность водорода к ядерным реакциям, в результате которых в звездах рождались бы хоть какие-нибудь другие атомы, тогда как уменьшение на 34 % приводит к распаду атомов водорода, поскольку протоны проглатывают свои электроны и превращаются в нейтроны. При пятикратном уменьшении этой величины даже одиночные протоны распадаются на нейтроны. Тогда во Вселенной вообще не будет атомов.

Как это интерпретировать? Прежде всего это кажется дополнительным подтверждением существования мультиверса II уровня, в котором варьируют физические параметры. Точно так же, как мультиверс объясняет, почему мы обнаружили плотность темной энергии, как раз подходящую для образования галактик, он может объяснить и то, почему обнаруженные свойства поля Хиггса очень подходят для существования более сложных атомов, чем водород. И неудивительно, что мы в одной из тех сравнительно редких вселенных, где

существуют и интересные атомы, и интересные галактики, раз уж жизнь требует по крайней мере минимального уровня сложности.

Но возникает вопрос: почему стрелки на нижней схеме согласованы так, что создают хоть какой-нибудь пригодный для жизни диапазон значений в свойствах поля Хиггса? Это, конечно, может быть случайностью: пять произвольно расположенных стрелок образовали бы такой диапазон с вероятностью 19 %, так что нам понадобилась бы лишь небольшая удача. Более того, в силу особенностей ядерной физики эти пять стрелок не являются независимыми, так что я не рассматриваю пример с пятью стрелками в качестве сильного аргумента в пользу чего бы то ни было. Однако вполне вероятно, что дальнейшие физические исследования могут открыть более впечатляющую точную настройку этого дискретного типа, скажем, с десятью или более стрелками, согласованными так, чтобы получался пригодный для существования жизни диапазон значений некоторого физического параметра или параметров⁸⁹. Если это случится, мы сможем рассуждать, как и в ситуации, представленной в верхней части рисунка: что это является свидетельством существования не только других улиц, но и других вселенных, где иные законы физики порождают совершенно иные требования для жизни! В некоторых случаях эти вселенные могут существовать в мультиверсе II уровня, в областях, где те же фундаментальные законы физики порождают иное фазовое состояние пространства с иными эффективными законами. В других случаях, однако, можно сказать, что подобное нереализуемо и другие вселенные должны подчиняться иным *фундаментальным* законам, что соответствует иным математическим структурам в мультиверсе IV уровня. Иными словами, сейчас мы не имеем прямых наблюдательных подтверждений существования мультиверса IV уровня, однако в будущем мы можем получить их.

Предсказание математических закономерностей

В эссе 1960 года Вигнер утверждал, что «невероятная эффективность математики в естественных науках есть нечто граничащее с мистикой» и что «никакого рационального объяснения этому факту нет». Гипотеза математической Вселенной (ГМВ) предлагает такое объяснение. Она объясняет полезность математики для описания физических законов как естественное следствие того факта, что последние *являются* математическими структурами и мы просто открываем их шаг за шагом. Различные приближения, из которых складываются наши современные физические теории, успешны потому, что простые математические структуры обеспечивают хорошие аппроксимации для отдельных аспектов более сложных математических структур. Иными словами, наши успешные теории являются не математическими аппроксимациями физики, а математическими аппроксимациями математики.

Одно из ключевых проверяемых предсказаний гипотезы математической Вселенной таково: физики и далее будут находить в природе математические закономерности. Поль Дирак в 1931 году так выразил предсказательную силу идеи математической Вселенной: «Наиболее мощный способ продвижения, который можно предложить сейчас, состоит, пожалуй, в том, чтобы использовать все ресурсы чистой математики в попытках завершать и обобщать математический формализм, образующий соответствующую основу теоретической физики, и после каждого успеха в этом направлении пытаться интерпретировать новые математические явления в терминах физических реальностей»⁹⁰.

Насколько успешным до сих пор было это предсказание? Спустя два тысячелетия после того, как пифагорейцы выдвинули идею математической Вселенной, новые открытия позволили Галилею охарактеризовать природу как книгу, написанную на языке математики.

⁸⁹ Нетрудно обобщить это определение дискретной тонкой настройки на случай, когда варьирует более чем один параметр.

⁹⁰ Пер. В. П. Шелеста. – *Прим. пер.*

Затем были открыты гораздо более глубокие математические закономерности, от движения планет до свойств атомов. Стандартные модели в физике элементарных частиц и космологии открыли новый «непостижимый» математический порядок, охватывающий впечатляющий диапазон: от микрокосма элементарных частиц до макрокосма ранней Вселенной – возможно, позволяющий успешно вывести все когда-либо выполненные физические измерения для определения набора из 32 чисел (*табл. 10.1*). Не знаю другого убедительного объяснения этой тенденции, кроме следующего: физический мир целиком является математическим.

Я вижу здесь два исхода. Если я ошибаюсь и ГМВ ложна, то физика в конце концов наткнется на непреодолимое препятствие, из-за которого прогресс станет невозможен: не останется новых математических закономерностей, которые можно было бы открыть, несмотря на то, что мы все еще не будем располагать полным описанием нашей физической реальности. Например, убедительная демонстрация того, что в законах природы существует фундаментальная случайность (в противоположность детерминистическому клонированию наблюдателя, который субъективно *ощущает* случайность), позволила бы отвергнуть ГМВ. С другой стороны, если я прав, то наши поиски понимания реальности не встретят никаких пределов и мы будем ограничены только нашим воображением.

Резюме

- Гипотеза математической Вселенной предполагает, что математическое существование эквивалентно физическому.
- Это означает, что все структуры, которые существуют математически, существуют и физически и образуют мультиверс IV уровня.
- Параллельные вселенные, которые мы рассмотрели, образуют вложенную четырехуровневую иерархию с растущим разнообразием: I уровень (наблюдаемые далекие области пространства), II уровень (другие постинфляционные области), III уровень (где-то в квантовом гильбертовом пространстве) и IV уровень (другие математические структуры).
- Разумная жизнь кажется редкой, и I, II и IV уровни большей частью необитаемы.
- Исследование мультиверса IV уровня требует не ракет и телескопов, а в основном компьютеров и идей.
- Простейшие математические структуры можно перечислить с помощью компьютера в виде списка наподобие телефонной книги, где каждая структура имеет собственный уникальный номер.
- Чтобы придать ГМВ смысл, может потребоваться гипотеза вычислимой Вселенной (ГВВ), состоящая в том, что математическая структура, которая является нашей внешней физической реальностью, определена вычислимыми функциями. В противном случае гедделевская неполнота и невычислимость Черча – Тьюринга будут соответствовать неудовлетворительно определенным отношениям в нашей математической структуре.
- Гипотеза финитной Вселенной (ГФВ), состоящая в том, что наша внешняя физическая реальность является конечной математической структурой, влечет за собой ГВВ и устраняет всякое беспокойство относительно неопределенности реальности.
- ГВВ/ГФВ могут помочь разрешить проблему меры и объяснить, почему наша Вселенная столь проста.
- Из ГМВ вытекает, что не существует неопределенных начальных условий: начальные условия ничего не говорят нам о физической реальности, а относятся лишь к нашему «адресу» в мультиверсе.
- Из ГМВ вытекает, что фундаментальной случайности не существует: случайность – это просто то, как субъективно воспринимается клонирование.

- Из ГМВ вытекает, что большая часть сложности, которую мы наблюдаем, является иллюзией, существующей только в глазах наблюдателя и отражающей в основном информацию о нашем «адресе» в мультиверсе.
- Описать совокупность вещей может оказаться проще, чем одну из ее частей.
- Наш мультиверс проще, чем наша Вселенная, в том смысле, что его можно описать с помощью меньшего количества информации, а мультиверс IV уровня является простейшим из всех и, в сущности, не требует информации для своего описания.
- Вероятно, мы живем не в симуляции.
- ГМВ является принципиально проверяемой и фальсифицируемой.

Глава 13. Жизнь, Вселенная и все такое

*Вот как кончится мир
Не взрыв но всхлип.*

*Т. С. Элиот
«Полые люди»⁹¹*

*Будущее не такое, как мы привыкли.
Йоги Берра*

Насколько велика наша физическая реальность?

Я горжусь тем, дорогой читатель, что вы остались со мной до последней главы. Мы проделали долгий путь от сверхгалактического макрокосма до субатомного микрокосма, встретившись с реальностью более величественной, чем я мог себе представить в детских мечтах, – реальностью с четырьмя уровнями параллельных вселенных.

Мое представление о том, как все это связано, отражено на рис. 13.1. В первой части книги мы занимались вопросом, насколько велико все сущее, и исследовали крупные масштабы. Мы живем на планете в галактике в такой вселенной, которая, как я полагаю, располагается в полном двойников мультиверсе I уровня, входящем в более разнообразный мультиверс II уровня в квантово-механическом мультиверсе III уровня из мультиверса IV уровня, содержащего все математические структуры. Во второй части мы задавались вопросом, из чего все состоит, и исследовали все меньшие масштабы. Мы сложены из клеток, состоящих из молекул, состоящих из атомов, состоящих из элементарных частиц – а те являются чисто математическими структурами в том смысле, что все свойства, которыми они обладают, являются математическими. Хотя мы пока не знаем, из чего состоят эти частицы (если они вообще из чего-то состоят), теория струн и ее основные конкуренты предполагают, что любые более мелкие «строительные блоки» также являются чисто математическими. В этом смысле две наши интеллектуальные экспедиции, хотя и были отправлены в противоположных направлениях – к очень большому и очень малому, – привели к одному и тому же месту: к царству математических структур. Хотя говорят, что все дороги ведут в Рим, обе дороги к реальности привели к математике. Это элегантно отражает тот факт, что одна математическая структура может содержать другие, объясняя все открытые физикой математические закономерности как проявления или приближенные свойства величественной математической структуры, которая являет собой нашу внешнюю реальность. На самых больших и самых малых масштабах математическая природа реальности очевидна, тогда как на промежуточных масштабах, с которыми люди обычно имеют дело, ее трудно заметить⁹².

⁹¹ Пер. А. Сергеева. – Прим. пер.

⁹² Это расширение нашей онтологии в физике напоминает расширение математической онтологии в последние века. Математики называют это *обобщением* – пониманием того, что предмет нашего изучения является частью более крупной структуры.



Рис. 13.1. Когда мы спрашиваем, из чего все состоит, и изучаем все меньшие масштабы, то обнаруживаем, что мельчайшие “строительные блоки” материи – это математические структуры: объекты, свойства которых являются математическими. Когда мы спрашиваем, насколько велико все сущее, и переходим к все большим масштабам, мы приходим к тому же самому – царству математических структур: к мультиверсу IV уровня, охватывающему все математические структуры.

Случай реальности малого

Я нарисовал картину фундаментальной физической реальности такой, как я ее вижу. Лично я считаю эту реальность захватывающе красивой и величественной. Но не может ли эта картина вводить в заблуждение, а ее величие оказаться миражом? Действительно ли мы живем в мультиверсе? А может, сам этот вопрос глуп и лежит за пределами науки?

С самого появления представлений о мультиверсе их ждала скорая расправа: Джордано Бруно с его бесконечным мультиверсом сожгли в 1600 году на костре, а Хью Эверетт со своим квантовым мультиверсом в 1957 году не нашел работы в области физики. Я и сам почувствовал, что припекает, когда старший коллега предположил, что публикации, связанные с мультиверсом, погубят мою карьеру. Однако в последние годы произошли радикальные изменения. Все теперь сходят с ума по параллельным вселенным, они появились в кни-

гах, в фильмах и даже в шутках: «Во многих параллельных вселенных вы сдали экзамен. Но не в этой».

Успех этих идей, конечно, не привел к консенсусу среди ученых, однако он сделал дискуссию о мультиверсе гораздо более тонкой и, на мой взгляд, интересной. Ученые перестали просто перекрикивать друг друга и искреннее пытаются понять оппонентов. Замечательным примером может служить недавняя антимультиверсная статья в журнале «Сайентифик американи», написанная одним из пионеров релятивизма Джорджем Эллисом. Я очень рекомендую ее прочитать⁹³.

Как отмечалось в гл. 6, мы используем термин «наша Вселенная» для обозначения физической области пространства, из которой свет успел дойти до нас за 14 млрд лет с момента нашего Большого взрыва. Говоря о параллельных вселенных, мы различаем четыре их уровня:

I уровень. Другие такие области, находящиеся далеко в пространстве, где наблюдаемые законы физики такие же, однако история разворачивалась иначе, поскольку она по-другому началась;

II уровень. Области пространства, в которых даже наблюдаемые законы физики оказываются другими;

III уровень. Параллельные миры в гильбертовом пространстве, где разворачивается квантовая реальность;

IV уровень. Совершенно не взаимосвязанные реальности, управляемые различными математическими уравнениями.

Джордж Эллис разбирает множество аргументов в пользу этих уровней мультиверса и показывает, почему все они сталкиваются с проблемами. Вот мое резюме его основных антимультиверсных аргументов:

1. Теория инфляции может быть ошибочной (или инфляция не вечна).
2. Квантовая механика может быть ошибочной (или не унитарной).
3. Теория струн может быть ошибочной (или не допускать множества решений).
4. Мультиверсы могут быть нефальсифицируемы.
5. Некоторые свидетельства в пользу существования мультиверса сомнительны.
6. Аргументы о точной настройке могут содержать слишком много допущений.
7. Это скользкий путь к еще более крупным мультиверсам.

(Джордж не упоминает в статье аргумент № 2, но я добавил его, поскольку, думаю, он и сам бы сделал это, выдели ему редактор более шести полос.)

Как я отношусь к этой критике? Как ни странно, я согласен со всеми семью утверждениями, и, тем не менее, с радостью поставлю на существование мультиверса все свои сбережения!

Начнем с первых четырех аргументов. Инфляция естественным образом порождает мультиверс I уровня (гл. 6), и если прибавить теорию струн с ландшафтом возможных решений, вы получите также и II уровень. Как было показано в гл. 8, квантовая механика в своей простейшей математической бесколлапсной («унитарной») форме дает III уровень. Так что если эти теории отброшены, то ключевые аргументы в пользу мультиверсов рушатся. Помните: *параллельные вселенные — это не теория, а предсказания определенных теорий.*

⁹³ См.: <http://tinyurl.com/antiverse>. [Рус. пер.: Эллис, Джордж *Существует ли Мультимир на самом деле?* // В мире науки, 2011, № 10.]

Для меня ключевым моментом является то, что если теория научна, то правомерной научной деятельностью будет получение и обсуждение всех ее следствий, даже если они включают в себя ненаблюдаемые сущности. Чтобы теория была фальсифицируемой, нет нужды наблюдать и проверять все ее предсказания – достаточно хотя бы одного из них. Поэтому мой ответ на аргумент № 4 таков: научно проверяемыми являются наши математические теории, но не обязательно их следствия, и это совершенно нормально. Поскольку, как говорилось в гл. 6, общая теория относительности Эйнштейна успешно предсказала многие вещи, доступные наблюдению, мы также всерьез относимся к ее предсказаниям относительно вещей, которые мы наблюдать не можем, например относительно того, что происходит внутри черных дыр. Подобным образом, если нас до сих пор впечатляли успешные предсказания теории инфляции или квантовой механики, мы должны серьезно относиться и к иным их предсказаниям, включая мультиверсы I и III уровней. Джордж даже упоминает возможность того, что теория вечной инфляции может быть однажды отброшена: для меня это просто аргумент, подтверждающий научность теории вечной инфляции.

Теории струн, конечно, еще далеко в отношении проверяемости до теории инфляции и квантовой механики. Однако я предполагаю, что мы находимся в мультиверсе II уровня, даже если теория струн окажется ошибочным направлением. Математические уравнения очень часто имеют множество решений, и если это относится к фундаментальным уравнениям, описывающим нашу реальность, то вечная инфляция в общем случае создает огромные области пространства, в которых физически реализуется каждое из этих решений (гл. 6). Например, уравнения, управляющие молекулами воды, которые не имеют ничего общего с теорией струн, имеют три решения, соответствующих водяному пару, жидкой воде и льду, и если само пространство сходным образом может существовать в разных фазах, инфляция будет стремиться реализовать их все.

Джордж перечислил ряд наблюдений, которые, как считается, поддерживают мультиверсные теории. На самом деле они в лучшем случае сомнительны – вроде свидетельств о том, что некоторые физические постоянные в действительности непостоянны, или данных о наличии в космическом микроволновом фоне следов от столкновений с иными вселенными либо о странной связности пространства. Я полностью разделяю его скептицизм. Во всех этих случаях, однако, анализ данных вызывал много споров, и это очень напоминало скандальную ситуацию вокруг холодного ядерного синтеза в 1989 году. Но для меня сам факт, что исследователи выполняют эти измерения и рассуждают о результатах, является дополнительным свидетельством в пользу того, что такая деятельность лежит в рамках науки: именно этим научный спор и отличается от ненаучного.

В гл. 6 мы узнали, что наша Вселенная кажется удивительно точно настроенной для жизни: если варьировать многие из физических констант, то жизнь, какой мы ее знаем, станет невозможной. Почему? Если существует мультиверс II уровня, где эти «константы» принимают все возможные значения, то неудивительно, что мы обнаружили себя в одной из редких пригодных для жизни вселенных. Это не более удивительно, чем то, что мы оказались на Земле, а не на Меркурии или Нептуне. Джордж подвергает критике тот факт, что выдвигать мультиверсную теорию приходится, чтобы получить этот вывод. Но ведь именно так мы проверяем любую научную теорию: предполагаем, что она верна, выводим следствия и отбрасываем теорию, если ее предсказания не совпадают с наблюдениями. Некоторые настройки подобраны настолько точно, что это порождает серьезные затруднения. Например, чтобы галактики были пригодными для жизни, темная энергия должна быть настроена примерно до 123-й значащей цифры. Для меня такое необъясненное совпадение служит четким сигналом о пробеле в наших научных представлениях. Отрицание его со словами: «Нам просто повезло, и перестаньте искать объяснения!» – не только неудовлетворительно, но равносильно игнорированию потенциально важнейшей улики.

По мнению Джорджа, если мы всерьез признаем, что происходит все, что может произойти, мы вступаем на скользкую дорожку, ведущую к все более крупным мультиверсам, таким как мультиверс IV уровня. Поскольку это мой любимый уровень и я один из его немногочисленных защитников, я только счастлив скользить по этой дорожке!

Джордж также упоминает, что мультиверсы могут нарушать принцип бритвы Оккама, вводя ненужные усложнения. Я физик-теоретик и сужу об элегантности и простоте теории не по ее онтологии, а по элегантности и простоте ее математических уравнений, и меня поражает, что математически простейшие теории тяготеют к мультиверсам. Как выяснилось, чрезвычайно трудно построить теорию, которая объясняет точно такую вселенную, какую мы видим, и никакую больше.

Наконец, существует аргумент против мультиверса (Джордж обошел его, и я ему за это признателен), который является, на мой взгляд, наиболее убедительным для большинства людей: параллельные вселенные слишком странные, чтобы быть реальными. Но именно этого следует ожидать (гл. 1). Эволюция наделила нас интуицией лишь для распознавания обыденных проявлений физики, важных для выживания наших предков, и всякий раз, когда мы используем технологии, чтобы взглянуть на реальность за пределами человеческих масштабов, наша выработанная эволюцией интуиция должна отказывать. Мы видели, как это случалось с противоречащими интуиции особенностями теории относительности, квантовой механики и т. д., и должны ожидать, что окончательная физическая теория, какой бы она ни оказалась, будет еще более странной.

Случай реальности большого

Кратко разобрав аргументы против мультиверса, проанализируем аргументы за него. Я собираюсь показать, что все спорные вопросы снимаются, если принять гипотезу внешней реальности из гл. 10: *существует внешняя физическая реальность, совершенно независимая от людей*. Допустим, что эта гипотеза верна. Тогда большая доля критики в адрес мультиверса будет основываться на трех сомнительных допущениях:

1. *Допущение о всевидении*. Физическая реальность должна быть такой, чтобы по меньшей мере один наблюдатель мог в принципе наблюдать ее целиком.
2. *Допущение о педагогичности реальности*. Физическая реальность должна быть такой, чтобы все достаточно информированные люди-наблюдатели чувствовали, что они интуитивно ее понимают.
3. *Допущение о невозможности копий*. Ни один физический процесс не может копировать наблюдателя или породить субъективно неотличимых наблюдателей.

Допущения №№ 1 и 2, по-видимому, не мотивированы ничем, кроме человеческого высокомерия. Допущение о всевидении, по сути, переопределяет слово «существует» как синоним того, что наблюдаемо, а это значит прятать голову в песок. Те, кто настаивает на допущении о педагогичности реальности, будут, как правило, отвергать комфортные представления вроде Санта-Клауса, евклидова пространства, зубной феи и креационизма, но достаточно ли усердно трудились они над тем, чтобы освободиться от более глубоко укорененных убаюкивающих представлений? По моему мнению, задача ученых состоит в том, чтобы пытаться понять, как устроен мир, а не диктовать ему, как он должен быть устроен.

Если допущение о всевидении ложно, то по определению есть вещи, которые существуют несмотря на то, что даже в принципе ненаблюдаемы. Поскольку определение Вселенной включает все, что в принципе наблюдаемо, значит, Вселенная – это не все, что существует, так что мы живем в мультиверсе. Если допущение о педагогичности реальности

ложно, то претензия, состоящая в том, что мультиверсы слишком странны, перестает быть логичной. Если ошибочно допущение о невозможности копий, то нет фундаментальных причин, согласно которым где-то во внешней реальности не может быть ваших копий, – в действительности и вечная инфляция, и безколлапсная квантовая механика обеспечивают механизм их созидания (гл. 6, 8).

Более того (гл. 10), из гипотезы внешней реальности вытекает гипотеза математической Вселенной, состоящая в том, что наша внешняя физическая реальность является математической структурой. В гл. 12 мы видели, как из нее, в свою очередь, следует существование мультиверса IV уровня, который содержит все остальные уровни мультиверсов. Мы, по сути, оказываемся неразрывно связаны со всеми этими параллельными вселенными, если только признаем существование независимой от нас внешней реальности.

Подведем итоги. Мы видели, как менялось представление человечества о себе. Люди всегда были склонны к высокомерию и самонадеянно представляли себя в центре мироздания. Но постепенно выяснялось, что мы заблуждаемся: это мы обращаемся вокруг Солнца, а оно, в свою очередь, обращается вокруг центра одной из бесчисленных галактик во вселенной, которая может быть лишь одной из множества в четырехуровневой иерархии мультиверсов. Я надеюсь, понимание этого делает нас скромнее. Однако, хотя люди переоценивали свою значимость, мы недооценивали силу собственной мысли. Наши предки думали, что привязаны к земле и никогда по-настоящему не поймут природу звезд и того, что за ними. Потом они поняли, как далеко могут зайти, даже без всяких полетов в космос, а просто разрешив полет разуму. Благодаря физике мы все глубже проникаем в природу реальности. Оказалось, что мы обитаем в реальности гораздо более величественной, чем наши предки могли представить, а это значит, что наш жизненный потенциал гораздо больше, чем мы думали. При наличии почти безграничных физических ресурсов ключевую роль станет играть наша изобретательность. Так что наша судьба в наших собственных руках.

Будущее физики

Если я ошибаюсь и гипотеза математической Вселенной неверна, значит, фундаментальная физика рано или поздно натолкнется на непреодолимое препятствие. Выйдя за этот предел, мы уже не сможем расширять свое понимание физической реальности, поскольку для нее не будет математического описания. А если я прав, то все является принципиально познаваемым. Я думаю, это было бы замечательно, поскольку в таком случае мы ограничены лишь своим воображением. Точнее, воображением и готовностью проделать тяжелую работу. Ответ, который Дуглас Адамс дал на свой самый главный вопрос жизни, Вселенной и всего такого, вряд ли снимет все остальные вопросы. А ответ, который я даю на вопрос о фундаментальной природе реальности («она чисто математическая», или, более точно, «это мультиверс IV уровня»), оставляет без ответа большинство наших традиционных больших вопросов. Например, вопрос «Каковы уравнения квантовой гравитации?» превращается в вопрос: «Где мы находимся в мультиверсе IV уровня?», на который, по-видимому, так же трудно ответить, как и на исходный. Поэтому окончательный вопрос о природе реальности надо сформулировать иначе. Отложим сбивающий нас с пути вопрос о том, какие конкретно математические уравнения описывают нашу реальность, и вместо этого поинтересуемся, как путем вычислений представить Вселенную с «лягушачьей» точки зрения – то есть наши наблюдения, – основываясь на ее виде с «птичьей» точки зрения. Это позволило бы определить, открыта ли истинная структура нашей конкретной Вселенной, и помогло бы представить, в каком уголке математического космоса располагается наш дом.

Ситуация, когда ответить на фундаментальные вопросы проще, чем на прикладные, на самом деле типична для физики. Если мы найдем правильные уравнения, описывающие

квантовую гравитацию, они обеспечат нам более глубокое понимание пространства, времени и материи, но не помогут точнее смоделировать глобальные изменения климата – хотя в принципе они объясняют всю физику, имеющую отношение к погоде. Дьявол в деталях, и понимание этих деталей часто требует большого труда, причем совершенно независимо от лежащей в основе окончательной теории.

С учетом этого посвятим остаток книги рассмотрению некоторых больших вопросов, которые уведут нас все дальше от фундаментальной физики и подводят все ближе к дому. Поскольку прежде мы концентрировались преимущественно на прошлом, естественно закончить путешествие, занявшись будущим.

Чем все закончится: о будущем нашей Вселенной

Если гипотеза математической Вселенной верна, то о будущем нашей физической реальности сказать в целом нечего: поскольку она существует вне пространства и времени, она не может закончиться, исчезнуть, равно как не может быть создана или изменена. Однако если мы переместимся поближе к дому и сконцентрируемся на математической структуре, в которой мы обитаем, где есть пространство и время, все станет гораздо интереснее. Здесь, в нашем захолустье, вещи кажутся изменяющимися с точки зрения наблюдателей вроде нас, и поэтому естественно спросить, чем все это кончится.

Что ждет Вселенную через миллиарды лет? У меня есть пять основных предположений относительно грядущего космического апокалипсиса или «космокалипсиса», представленных на рис. 13.2 и в виде сводки в табл. 13.1: Большое замерзание (*Big Chill*), Большой хлопок (*Big Crunch*), Большой разрыв (*Big Rip*), Большое дробление (*Big Snap*) и Смертельные пузыри (*Death Bubbles*).

Вселенная расширяется около 14 млрд лет (гл. 3). Большое замерзание случится, если Вселенная продолжит расширяться вечно, превращая космос в холодное, темное и, в конечном счете, мертвое место. Я представляю себе это примерно как Т. С. Элиот: «Вот как кончится мир / Не взрыв но всхлип». Если вы, подобно Роберту Фросту, предпочитаете, чтобы мир погиб в огне, а не во льду, держите кулаки за Большой хлопок: космологическое расширение в конце концов обратится вспять, и все будет смято в коллапсе, напоминающем обращенный во времени Большой взрыв. Наконец, Большой разрыв – это замерзание для нетерпеливых: галактики, планеты и даже атомы разрываются на части. На какой из трех вариантов сделать ставку? Это зависит от того, что будет делать темная энергия (гл. 4), которая составляет около 70 % массы Вселенной, по мере расширения пространства. Это может быть замерзание, хлопок и разрыв – в зависимости от того, останется ли плотность темной энергии прежней, рассеется ли она до отрицательной плотности или, напротив, сгустится. Поскольку мы до сих пор не понимаем, что такое темная энергия, я просто скажу, какие ставки сделал бы сам: 40 % на Большое замерзание, 9 % на Большой хлопок, 1 % – на Большой разрыв.

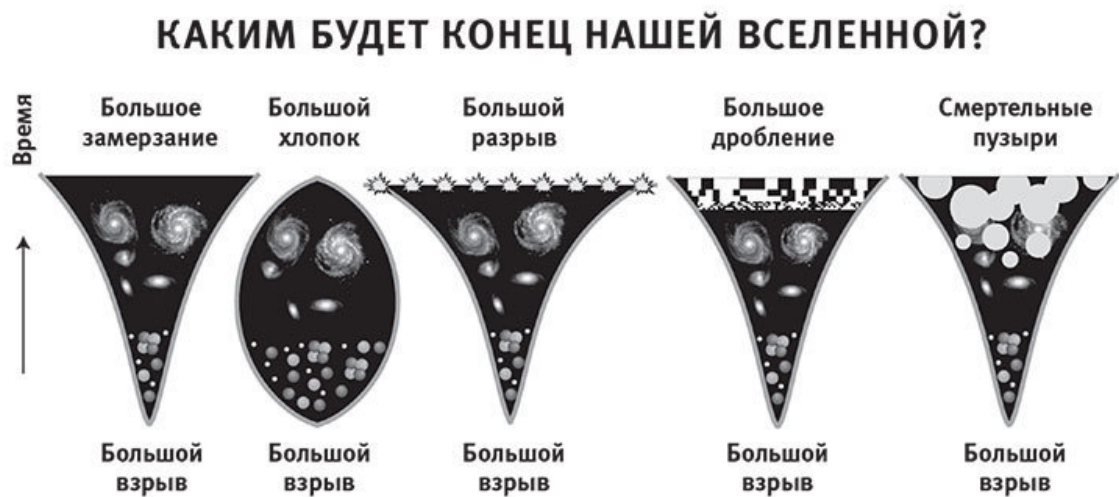


Рис. 13.2. Мы знаем, что Вселенная началась 14 млрд лет назад с Большого взрыва, затем она расширялась и остывала, а ее частицы сливались в атомы, звезды и галактики. Но мы не знаем, какова ее окончательная судьба. Предлагаемые сценарии учитывают Большое заморозание (вечное расширение), Большой хлопок (обратный коллапс), Большой разрыв (расширение с бесконечной скоростью, разрывающее все на части), Большое дробление (когда ткань пространства растягивается слишком сильно, в ней обнаруживается губительная дискретная природа) и Смертельные пузыри (пространство “замерзает” внутри пузырей, которые расширяются со скоростью света).

Табл. 13.1. Будущее пространства в пяти сценариях космического Судного дня.

Будущее пространства	Большое заморозание	Большой хлопок	Большой разрыв	Большое дробление	Смертельные пузыри
Существует вечно?	Да	Нет	Нет	Нет	Нет
Стремится к бесконечному размеру?	Да	Нет	Да	Нет	Нет
Стремится к бесконечной плотности?	Нет	Да	Да	Нет	Нет
Устойчиво?	Да	Да	Да	Нет	Нет
Бесконечно растяжимо?	Да	Да	Да	Нет	Да

А что с остальными 50 % моих денег? Я придержал бы их на случай, отличный от вышеперечисленного, поскольку считаю: люди должны быть скромнее и признать, что существуют фундаментальные вещи, которые мы еще не понимаем. Я говорю о природе пространства, например. Замерзание, хлопок и разрыв – это варианты конца, предполагающие, что пространство само по себе устойчиво и бесконечно растяжимо.

Мы привыкли думать, что пространство – это скучная статическая сцена, на которой разворачивается космическая драма. Эйнштейн научил нас, что пространство – один из главных персонажей: оно может закручиваться в черные дыры, покрываться рябью гравитаци-

онных волн и растягиваться по мере расширения Вселенной. Не исключено даже, что оно может замерзнуть, переходя в другие фазы, подобно воде в стакане, и образуя при этом смертельные быстро расширяющиеся пузыри новой фазы (гл. 6). Мы также привыкли думать, что нельзя получить больше места, если не забрать его у кого-нибудь. Однако теория гравитации Эйнштейна говорит о прямо противоположном (гл. 3): дополнительный объем может быть получен в конкретной области пространства между галактиками без того, чтобы этот объем охватывал другие области – он остается между теми же галактиками. Более того, согласно теории Эйнштейна, растяжение пространства может продолжаться вечно, что позволяет Вселенной стремиться к бесконечному объему – и в случае Большого замерзания, и в сценарии Большого разрыва. Похоже, это слишком хорошо, чтобы быть правдой.

Резиновый жгут гладкий, цельный, как пространство, но если его слишком растянуть, он лопнет. Почему? Потому что он состоит из атомов и при достаточном натяжении о себе дает знать дискретная атомарная природа резины. Может ли быть так, что и пространство обладает некоего рода гранулярностью в масштабах слишком малых, чтобы мы это заметили? Математикам нравится модель пространства, представляющая его как идеализированный континуум без всякой гранулярности, и тогда разговор о сколь угодно малых расстояниях имеет смысл. Мы используем эту непрерывную модель пространства в большинстве физических курсов МТИ, но твердо ли мы уверены, что она верна? Конечно, нет! Есть множество опровергающих ее данных, и мы обсуждали это в гл. 11. В случае простого непрерывного пространства необходимо выписать бесконечное количество десятичных цифр, просто чтобы задать точное расстояние между двумя произвольными точками. Но такой титан физики, как Джон Уилер, показал, что квантовые эффекты, вероятно, сделают бессмысленными любые десятичные цифры после 35-й, поскольку обычное наше представление о пространстве перестает работать на меньших масштабах и, возможно, должно быть заменено пенообразной структурой. Это немного напоминает масштабирование фотографии на дисплее компьютера, когда обнаруживается, что изображение в действительности имеет гранулярную структуру, подобно резиновому жгуту, и состоит из пикселей, которые не поддаются дальнейшему делению (рис. 11.3).

Поскольку эта фотография состоит из пикселей, она содержит конечное количество информации и ее удобно передавать по интернету. Аналогично, имеется все возрастающее количество данных, свидетельствующих в пользу того, что наблюдаемая Вселенная содержит лишь конечное количество информации, и это могло бы упростить понимание того, как природа вычисляет, что делать дальше. Голографический принцип (гл. 6) предполагает, что наша Вселенная содержит не более чем 10^{124} битов информации, что соответствует в среднем 10 терабайтам на каждый объем, в котором мог бы уместиться атом.

Меня беспокоит вот что. Из квантово-механического уравнения Шредингера (гл. 7) следует, что информация не может быть создана или уничтожена. Это значит, что количество гигабайтов на литр пространства убывает по мере расширения Вселенной. Согласно сценарию Большого замерзания (варианту космокалипсиса, наиболее популярному среди моих коллег-астрофизиков), это расширение продолжается вечно. Но что случится, когда плотность информации снизится до мегабайта на литр – меньше, чем в сотовом телефоне? Или байта на литр? О том, что тогда случится, мы не можем сказать ничего конкретного, пока не построена детальная модель, заменяющая современное непрерывное пространство. Но, я думаю, было бы разумно поставить на то, что в этом случае произойдет нечто нехорошее, из-за чего законы физики постепенно изменятся, а наша форма жизни вымрет. Вот это я называю Большим дроблением.

А вот что беспокоит меня еще сильнее. Простой расчет показывает, что это случится в пределах нескольких миллиардов лет – даже раньше, чем Солнце исчерпает свое топливо и поглотит Землю. Наша лучшая теория, объясняющая, что сделало взрывом наш Боль-

шой взрыв – это теория инфляции (гл. 5), и она утверждает, что в самом начале Вселенная испытала невероятно быстрое растяжение пространства и некоторые области растянулись гораздо сильнее других. Если пространство может растягиваться лишь до некоторого предела, прежде чем случится Большое дробление, то главная часть объема (а, следовательно, галактик, звезд, планет и наблюдателей) окажется в областях, которые растянуты до предела и близки к дроблению.

На что будет похоже надвигающееся Большое дробление? Если гранулярность пространства растет постепенно, то сначала беспорядок затронет структуры самого малого размера. Сначала мы заметим, что начинают изменяться некоторые свойства вещества, изучаемые ядерной физикой, например прежде стабильные атомы начнут испытывать радиоактивный распад. Затем начнет изменяться атомная физика, внося беспорядок в химию и биологию. К счастью, Вселенная обеспечила нас гамма-всплесками, которые, подобно шахтерской канарейке, служат удобной системой раннего предупреждения. Гамма-всплески – это катастрофические космические взрывы, дающие хорошо распознаваемые коротковолновые сигналы в гамма-диапазоне, которые способны пройти половину поперечника нашей Вселенной. В непрерывном пространстве электромагнитные волны независимо от своей длины движутся с одинаковой скоростью – со скоростью света, но в простейших вариантах гранулярного пространства более короткие волны движутся чуть медленнее. Согласно недавним наблюдениям, гамма-лучи с сильно различающимися длинами волн, соревнуясь друг с другом миллиарды лет движения сквозь космос от далекого взрыва, прибыли к фотофинишу одновременно с точностью до сотой доли секунды. Если верить этому результату, то Большое дробление не случится еще миллиарды лет, что идет вразрез с предсказаниями из предыдущего абзаца.

На самом деле проблема еще серьезнее. Наше пространство не расширяется однородно: некоторые области, такие как наша Галактика, вовсе не расширяются. Можно поэтому представить себе обитающих в галактиках наблюдателей, которые будут долго и счастливо жить после того, как межгалактическое пространство подвергнется Большому дроблению, поскольку пагубные эффекты не будут проникать в галактики из отдаленных областей. Но этот сценарий спасает только наблюдателей, а не лежащую в основе теорию! В действительности расхождение между теорией и наблюдениями становится еще серьезнее: если повторить предыдущее рассуждение, то теперь оно предсказывает, что мы с наибольшей вероятностью должны обитать в галактике *после того*, как Большое дробление охватило большую часть окружающего пространства, так что отсутствие странных задержек в гамма-излучении объяснить еще труднее.

Итак, мы состряпали странное варево, смешав некоторые наиболее ценные ингредиенты из космологии и квантовой физики, добавив немного экспериментальных данных и взболтав. Результат? Ингредиенты плохо смешиваются, а значит, по крайней мере с одним из них что-то не в порядке. Я люблю тайны, и для физиков парадоксы – это лучшие подарки природы, часто служащие наводкой для будущих открытий. Я думаю, что мы на подходах к прорыву в вопросе о природе пространства, и парадокс Большого дробления служит интересной подсказкой.

Будущее жизни

Начав с полной физической реальности мультиверса IV уровня, мы углубились в нашу конкретную вселенную и поговорили о ее судьбе в отдаленной перспективе. Продолжим движение к дому и рассмотрим будущее жизни. Из всех поразительных свойств во Вселенной самым вдохновляющим я нахожу то, что она оживает и порождает самосознающие сущности вроде нас с вами, которые могут оценить ее тайны и насладиться ими.

Каковы перспективы жизни? Одиноки ли люди во Вселенной? Или где-нибудь существуют иные цивилизации, способные с нами взаимодействовать и нас уничтожить? Будет ли человечество расселяться во Вселенной, возможно, в другой эволюционировавшей форме? Мы рассмотрим эти вопросы ниже, а пока коснемся других, более насущных: каковы главные угрозы жизни на нашей планете, что можно им противопоставить?

Экзистенциальные угрозы

Когда мне было 15 лет, мне пришла в голову шокирующая мысль. Я хорошо знал, что вызывает у людей беспокойство: нас тревожат наши собственные трудности, например здоровье, деньги и карьера, а также опасности, угрожающие нашей семье, друзьям и обществу. Но что можно сказать об угрозах самой жизни на Земле? Беспокоят ли они нас по-настоящему? Нет, несколько!

Я понял, что проживаю жизнь, убаяканный ложным чувством безопасности, наивно веря, что обо всем, о чем надо беспокоиться, уже позаботились другие. В детстве я не волновался об ужине, поскольку знал, что у родителей есть планы на этот счет. Я не беспокоился о своей безопасности, поскольку знал, что пожарные и полиция знают свое дело. Постепенно я стал понимать, что взрослые не всезнающи и не всемогущи, как казалось, и что есть множество мелких проблем, которые я должен решать сам. Но по-настоящему крупные, самые важные проблемы, стоящие перед человечеством, должны иметь наивысший приоритет у наших политических лидеров. Так?

Я никогда не задумывался об этом, пока ужасная правда, словно кирпич, не свалилась на меня, когда мне было пятнадцать. Лично для меня звонком будильника стало изучение гонки ядерных вооружений. Я был глубоко поражен, когда понял, что мы, миллиарды людей, живем на драгоценной, прекрасной голубой планете, и хотя почти никто из нас не хочет полномасштабной ядерной войны, есть существенный риск, что она разразится еще в течение моей жизни, скорее всего по ошибке. Возможно, риск составляет 1 % в год, или в 100 раз меньше, или в 10 раз больше. В любом случае, риск абсурдно велик. Тем не менее он даже не считается главной темой на выборах. Более того, ядерная война – лишь одна из множества *экзистенциальных угроз* (термин Ника Бострема): в этих случаях речь идет либо о гибели разумной жизни на Земле, либо о радикальном и необратимом сокращении ее потенциала⁹⁴.

Гораздо поэтичнее, чем я в подростковом возрасте, описал проблему американский архитектор-футурист Бакминстер Фуллер. Он представил ее как коллективное путешествие на космическом корабле «Земля». Плывя по холодному и пустынному пространству, наш корабль обеспечивает нас всем необходимым и защищает нас. Он располагает значительными, но ограниченными запасами воды, провианта и топлива. Его атмосфера сохраняет тепло и (благодаря озоновому слою) защищает нас от солнечного ультрафиолета, а его магнитное поле – от смертельных космических лучей. Наверняка любой ответственный капитан космического корабля сделал бы высшим приоритетом его безопасность и избегал бы столкновения с астероидами, взрывов на борту, перегрева, разрушения ультрафиолетовой защиты и истощения запасов? Однако экипаж нашего корабля не объявил высшим приоритетом *ни один* из этих вопросов и направляет на их решение (по моим оценкам) менее миллионной доли своих ресурсов. Фактически у нашего корабля даже нет капитана!

Далее мы рассмотрим, почему люди так плохо организовали работу по устранению величайших угроз нашему долгосрочному существованию и что можно с этим сделать. Но прежде позвольте дать краткий обзор того, в чем состоят эти угрозы. На рис. 13.3 перечислены экзистенциальные угрозы, которые я считаю наиболее достойными внимания. Нач-

⁹⁴ В качестве введения в проблему экзистенциальных угроз я рекомендую материалы сайта <http://www.existential-risk.org>, а также книгу Мартина Риса «Наш последний час».

нем с правого конца хронологической шкалы, отдаленного будущего, и станем двигаться к настоящему.

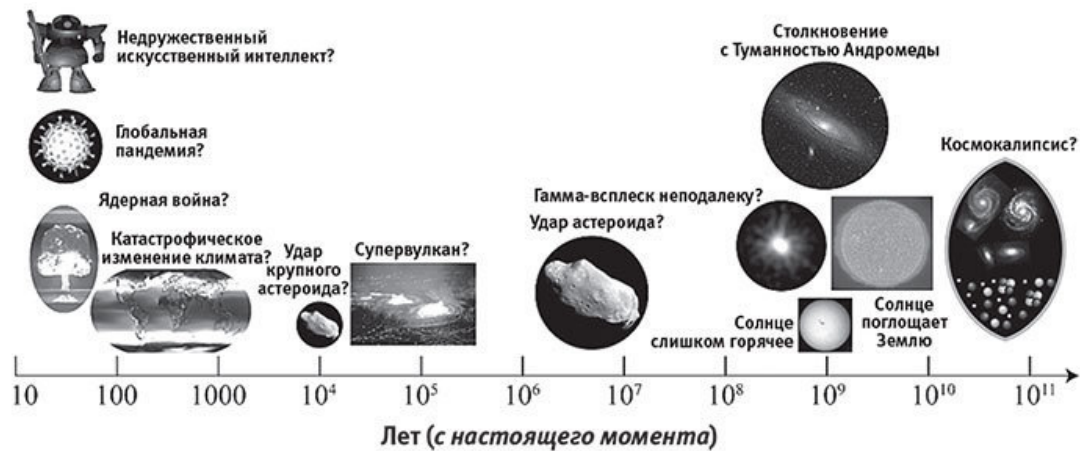


Рис. 13.3. Примеры того, что могло бы уничтожить жизнь в известном нам виде или навсегда сократить ее потенциал. Хотя Вселенная скорее всего существует десятки миллиардов лет, наше Солнце выжжет Землю примерно через 1 млрд лет, а затем поглотит ее, если мы не отведем ее на безопасное расстояние. Наша Галактика столкнется с соседней примерно через 3,5 млрд лет. Можно уверенно предсказать (мы не знаем, когда именно, но гораздо раньше), что мы испытаем астероидную бомбардировку, а супервулканы вызовут длящиеся годами зимы без солнечного света. В ближайшее время мы можем столкнуться с такими рукотворными проблемами, как изменения климата, ядерная война, глобальная пандемия и недружественный искусственный интеллект.

Умиращее Солнце

Начнем с астрономических и геологических угроз, а затем перейдем к тем, которые порождены человеком. Выше мы обсудили пять сценариев конца нашей Вселенной: Большое замерзание, Большой хлопок, Большой разрыв, Большое дробление и Смертельные пузыри. Хотя мы не знаем, какой из них (если не какой-либо еще) фактически реализуется, я полагаю, что нам не следует паниковать и что Вселенная в следующие несколько десятков миллиардов лет не погибнет.

Но что мы знаем точно, так это то, что наше Солнце гораздо раньше создаст нам проблемы. Звезда возрастом 4,5 млрд лет светит все ярче вследствие сложной динамики термоядерных реакций в ядре, где постепенно истощаются запасы водородного топлива. Согласно прогнозу, примерно через 1 млрд лет светимость Солнца станет оказывать катастрофическое воздействие на биосферу, а парниковый эффект приведет к выкипанию океанов, как на Венере. Конечно, если мы что-нибудь не придумаем.

И кое-что предпринять можно. Астрономы Дональд Корикански, Грег Лафлин и Фред Адамс показали, что, хитрым образом используя астероиды, Земля может сохранять постоянную температуру, постепенно передвигаясь на более далекую орбиту от разогревающего Солнца. Суть состоит в подталкивании крупного астероида так, чтобы каждые 6 тыс. лет он пролетал очень близко от Земли и тем самым давал ей гравитационный толчок в нужном направлении. Каждое тесное сближение должно быть очень точно рассчитанным, чтобы направить астероид в окрестности Юпитера и Сатурна, где он приобретет энергию и угловой момент, которые потребуются при следующей встрече с Землей. Ранее мы с успехом предпринимали подобные гравитационные маневры, отправляя космические аппараты, например межпланетные станции «Вояджер», во внешнюю область Солнечной системы. В

случае успеха эта схема может увеличить период обитаемости Земли примерно с 1 до 6 млрд лет. Затем, насколько мы знаем, жизнь Солнца подойдет к концу. Оно набухнет, превратившись в красный гигант, и тогда потребуются более радикальные меры, чтобы предотвратить поглощение им Земли и сохранить приемлемую температуру атмосферы.

Примерно в то же время, через несколько миллиардов лет, наша галактика Млечный Путь столкнется и сольется с ближайшим крупным соседом – галактикой Туманность Андромеды. Это не так страшно, как звучит, поскольку составляющие их звезды находятся на таких огромных расстояниях друг от друга в сравнении со своими размерами, что большинство их пройдет друг мимо друга (если Солнце представить размером с апельсин в Бостоне, то ближайшая соседняя звезда, Проксима Центавра, будет находиться в моем родном Стокгольме). Вместо столкновений большинство звезд перемешается и образует новую галактику Милкомада. Однако это может усугубить проблемы, связанные со сверхновыми и астероидами.

Астероиды, сверхновые и супервулканы

Палеонтологические летописи рассказывают нам о пяти крупных вымираниях в последние 500 млн лет, каждое из которых погубило более 50 % видов животных. Хотя подробности этих событий бурно обсуждаются, широко признается, что они были спровоцированы различными астрономическими и геологическими событиями. Последнее из «большой пятерки» вымираний, по-видимому, вызвал астероид размером с Эверест, упавший около 65 млн лет назад у побережья Мексики. Его жертвами пали нелетающие динозавры. Энергия удара была эквивалентна взрыву миллионов водородных бомб, она образовала 180-километровый кратер и окутала планету темными облаками, которые на долгие годы скрыли солнечный свет, вызвав повсеместный коллапс экосистем.

Земля регулярно подвергается ударам космических объектов различного размера и состава, так что вопрос не в том, *случится ли* такое столкновение, а лишь *когда* оно случится. Ответ во многом зависит от нас: система телескопов-роботов должна быть способна с упреждением в десятки лет известить нас об опасности, и это даст достаточно времени для разработки, запуска и выполнения миссии по отклонению астероида. Если сделать это заблаговременно, понадобится лишь легкий толчок, осуществить который можно, например, с помощью «гравитационного тягача» (спутника, гравитационное притяжение которого отклоняет астероид), или установленного на спутнике лазера (который будет испарять вещество с поверхности астероида, вызывая у последнего отдачу в противоположном направлении), или даже путем покраски астероида таким образом, чтобы давление солнечного излучения сбило его с курса. Если времени мало, потребуются более рискованные шаги, например кинетический ударник (спутник, подобно футболисту, сбивающий астероид с курса) или ядерный взрыв.

В качестве тренировки мы можем попрактиковаться в отклонении менее крупных и более многочисленных астероидов, которые часто сталкиваются с Землей. Например, Тунгусское событие 1908 года вызвал объект массой примерно с нефтяной танкер. Он не представлял собой экзистенциальную угрозу, однако взрыв, эквивалентный взрыву 10-мегатонной бомбы, мог погубить миллионы людей, если бы удар пришелся по крупному городу. Освоив искусство отклонения небольших астероидов, мы оказались бы подготовлены к приближению крупного объекта и смогли бы использовать те же ноу-хау для долгосрочного инженерного проекта, который мы обсуждали ранее: использования астероидов для увеличения орбиты Земли и ее удаления от Солнца.

С астероидами, конечно, связаны не все массовые вымирания. Другим астрономическим подозреваемым мог быть гамма-всплеск. Или взрыв сверхновой, который обвиняется во втором по масштабу массовом вымирании около 450 млн лет назад. Хотя улики пока слиш-

ком незначительны, чтобы построить на них обвинительный вердикт, обвиняемый определенно располагал средствами и возможностью. Когда массивные и быстро вращающиеся звезды взрываются как сверхновые, они испускают часть колоссальной энергии взрыва в виде пучка гамма-излучения. Если такой «луч смерти» упадет на Землю, он нанесет двойной удар: сначала уничтожит нас, а после (из-за разрушения озонового слоя) солнечный ультрафиолет начнет стерилизацию поверхности планеты.

Существует интересная взаимосвязь между астрономическими угрозами. Изредка случайная звезда проходит от Солнечной системы достаточно близко, чтобы возмутить орбиты далеких астероидов и комет, направив их рой во внутреннюю часть Солнечной системы, где некоторые из них могут столкнуться с Землей. Например, предсказывают, что звезда Глизе 710 примерно через 1,4 млн лет пройдет в пределах одного светового года от нас (в 4 раза ближе нашего нынешнего ближайшего соседа Проксимы Центавра).

Более того, современный упорядоченный поток звезд, обращающихся вокруг центра Млечного Пути в одном направлении, как на карусели, сменится хаосом, когда наша Галактика будет сливаться с Туманностью Андромеды. Это значительно увеличит частоту разрушительных сближений с иными звездами и может спровоцировать астероидную бомбардировку или вовсе выбросить Землю из Солнечной системы. Столкновение галактик также приведет к столкновению газовых облаков, спровоцировав всплеск звездообразования, а самые массивные новорожденные звезды будут взрываться как сверхновые, причем это может происходить слишком близко.

Ближе к дому мы сталкиваемся с внутренним врагом: событиями, вызванными нашей собственной планетой. Супервулканы и массивные излияния базальтовой лавы – главные подозреваемые во многих вымираниях. Они способны вызвать «вулканическую зиму», окутав Землю пылевыми облаками, которые на годы заслонят солнечный свет, как при ударе крупного астероида. Они также могут привести к разрушению экосистем, выбрасывая в атмосферу токсичные газы, вызывающие кислотные дожди и глобальное потепление. Такое суперизвержение, случившееся в Сибири, широко признается в качестве причины крупнейшего известного вымирания, называемого Великим⁹⁵: тогда, 250 млн лет назад, исчезло 96 % видов морских животных.

Проблема в нас

Мы сталкиваемся с многочисленными экзистенциальными угрозами, связанными с астрономическими и геологическими явлениями. Я перечислил лишь те, которые считаю наиболее серьезными. Когда я думаю обо всех таких рисках, я прихожу в целом к оптимистичному прогнозу:

1. Технологии будущего вполне способны помочь жизни процветать в ближайшие миллиарды лет.
2. Мы (а также наши потомки), по-видимому, способны своевременно разработать эти технологии – при условии, что люди научатся действовать сообща.

Решив самые неотложные проблемы (*рис. 13.3*, слева), мы обеспечим себе время для того, чтобы заняться остальными.

По иронии судьбы, эти неотложные проблемы в основном порождены нами самими. В то время как большинство геологических и астрономических катастроф маячит в тысячах, миллионах и миллиардах лет впереди, люди радикально меняют положение дел в масштабах десятилетий, открывая ящик Пандоры с новыми экзистенциальными угрозами. Изменяя

⁹⁵ В России его называют пермским вымиранием. По нему проводят границу между пермским периодом палеозойской эры и триасовым периодом мезозойской эры. – *Прим. пер.*

воду, сушу и воздух за счет рыболовства, сельского хозяйства и промышленности, мы ежегодно вызываем вымирание около 30 тыс. видов. Некоторые биологи уже называют происходящее «шестым вымиранием». Не грозит ли в скором будущем вымирание и нам самим?

Вы, несомненно, следите за язвительной полемикой вокруг вызванных человеком рисков, таких как глобальная пандемия (случайная и преднамеренная), изменения климата, загрязнение окружающей среды, истощение ресурсов и коллапс экосистем. Позвольте мне рассказать подробнее о двух порожденных человеком угрозах, которые сильнее всего беспокоят меня самого: случайная ядерная война и недружественный искусственный интеллект.

Случайная ядерная война

«Серийный убийца на свободе!» «Террорист-смертник!» «Остерегайтесь птичьего гриппа!» Хотя ужасы, привлекающие газетчиков, очень пугают, для вас все же опаснее рак. Хотя вероятность заболеть раком составляет менее 1 % в год, жизнь достаточно продолжительна и имеется значительная вероятность, что в конце он и вас поджидает. Как и случайная ядерная война.

В течение той половины столетия, когда мы располагали средствами для организации ядерного Армагеддона, не прекращались ложные сигналы тревоги, способные спровоцировать всеобщую войну. Это настолько сильно беспокоило меня в 17-летнем возрасте, что я стал фрилансером в шведском журнале *PAX*, посвященном борьбе за мир. Главный редактор Карита Андерсон обучала меня азам журналистики. Постепенное рассекречивание документов показывало, что некоторые ядерные инциденты несли гораздо больший риск, чем признавали государства в то время, когда они имели место. Лишь в 2002 году стало известно, что во время Карибского кризиса американский корабль «Бигль» атаковал глубинными бомбами неизвестную подводную лодку. Субмарина оказалась советской, несла ядерное оружие, и ее командир едва не пустил его в ход.

Несмотря на то, что холодная война закончилась, риск ядерного конфликта в последние годы, по-видимому, снова вырос. Неточные, но мощные межконтинентальные баллистические ракеты (МБР) поддерживали стабильность «гарантированного взаимного уничтожения». Улучшение наведения у ракет, сокращение их подлетного времени и усовершенствование систем слежения за подводными лодками ведет к нарушению такой стабильности. Россия и Соединенные Штаты придерживаются стратегии запуска после предупреждения о ракетном нападении. Она требует, чтобы решение об ответном ядерном ударе принималось в течение 5-15 минут, когда может еще не быть полной информации о происходящем. 25 января 1995 года Борис Ельцин был в шаге от решения о полномасштабном ударе по Соединенным Штатам из-за неопознанной норвежской исследовательской ракеты. Вызвал беспокойство американский проект по замене на подводных лодках «Трайидент» у 2 из 24 баллистических ракет *D5* ядерных боеголовок обычными для возможного использования против Ирана или Северной Кореи. Российские системы раннего оповещения не смогли бы отличить их от ядерных ракет, что увеличило бы опасность. Вызывает тревогу также вероятная психическая неуравновешенность командиров и (или) их радикальные политические либо религиозные взгляды.

Но к чему беспокойство? Ясно же, что когда дойдет до дела, разумные люди вмешаются и все сделает правильно, как уже бывало. Ядерные державы предпринимают серьезные контрмеры, как наш организм – против рака. Тело способно справляться с изолированными вредоносными мутациями, и, по-видимому, требуется случайное совпадение минимум четырех мутаций, чтобы спровоцировать развитие рака некоторых типов. И все же, если бросать кости достаточное число раз, неприятность случается. Стэнли Кубрик в мрачной комедии «Доктор Стрейнджлав» иллюстрирует такое совпадение.

Случайная ядерная война между двумя сверхдержавами может случиться в течение моей жизни – или не случиться. Если это произойдет, очевидно, все изменится. Изменения климата, о которых мы сейчас тревожимся, блекнут на фоне ядерной зимы, при которой пылевое облако на целые годы закроет Солнце, как бывало при падении астероидов или извержении супервулканов, в прошлом вызывавших массовые вымирания. Экономические неурядицы 2008 года были, конечно, ничем в сравнении с неурожаем в глобальном масштабе, коллапсом инфраструктуры и массовым голодом. Ожидая ли я увидеть все это своими глазами? Я бы оценил вероятность этого сценария примерно в 30 %, что в первом приближении соответствует вероятности заболеть раком. При этом мы гораздо меньше внимания и ресурсов уделяем снижению риска ядерной катастрофы (по сравнению с раком). Даже если 30 % людей заболеет раком, то остальное человечество уцелеет, а перспективы цивилизации при ядерном Армагеддоне гораздо менее очевидны. Есть конкретные, ясные шаги, направленные на снижение риска ядерного конфликта, и они описаны в многочисленных научных докладах. Однако это никогда не становилось важной предвыборной темой и по большей части игнорируется.

Недружественная сингулярность

Промышленная революция дала нам машины сильнее нас. Информационная революция породила машины умнее нас в некоторых отношениях. Каких именно? Компьютеры обычно превосходят нас только в простых, требующих «грубой силы» когнитивных задачах, таких как быстрые арифметические вычисления или поиск в базе данных. Однако в 2006 году компьютер одолел чемпиона мира по шахматам Владимира Крамника, а в 2011 году положил на лопатки Кена Дженнинга в телевикторине *Jeopardy!*⁹⁶ В 2012 году компьютер получил водительскую лицензию в штате Невада, после того как было доказано, что он безопаснее водителя-человека. Как далеко это зайдет? Превзойдут ли нас компьютеры по *всем* задачам, выработав сверхчеловеческий интеллект? У меня мало сомнений в том, что это *может* случиться: наш мозг – это совокупность частиц, подчиняющихся законам физики, и нет физического закона, запрещающего частицам организоваться так, чтобы выполнять еще более сложные вычисления. Но *случится ли* это, и будет ли это хорошо? Вопросы очень своевременные: хотя некоторые считают, что машины со сверхчеловеческим интеллектом в обозримом будущем построить нельзя, другие, например американский изобретатель и писатель Рэй Курцвейл, предсказывают их появление уже к 2030 году, что делает данную угрозу требующей неотложного рассмотрения.

Идея сингулярности

В общем, неясно, появятся ли (и должны ли появиться) сверхразумные машины, и эксперты по искусственному интеллекту расходятся во мнениях по этому вопросу. Но, я думаю, совершенно ясно, что если такое случится, последствия будут взрывоподобными. Почему это так, объяснил британский математик Ирвинг Гуд в 1965 году, за два года до моего рождения: «Определим сверхразумную машину как такую, которая может превзойти сколь угодно умного человека в любой интеллектуальной деятельности. Поскольку конструирование машин является одним из видов такой интеллектуальной деятельности, сверхразумная машина может сконструировать машины, которые окажутся еще лучше. Тогда, несомненно, произойдет „интеллектуальный взрыв“, и интеллектуальный уровень человека останется далеко обойден. Таким образом, первая сверхразумная машина станет последним изобре-

⁹⁶ В России это шоу выходит под названием «Своя игра». В 2004 году Кен Дженнингс побеждал в нем 74 раза подряд. – Прим. пер.

тением, которое человеку когда-либо понадобится сделать – при условии, что эта машина будет достаточно покорной и покажет нам, как держать ее под контролем».

В заставляющей задуматься статье 1993 года математик и писатель-фантаст Вернор Виндж назвал этот интеллектуальный взрыв *сингулярностью* и доказывал, что это будет точка, за которой мы не сможем делать надежных предсказаний.

Я думаю, что если мы и сможем построить сверхразумные машины, то первая из них будет очень сильно ограничена в возможностях тем программным обеспечением, которое мы напишем, и что мы компенсируем наш недостаток понимания того, как оптимально запрограммировать интеллект, создав аппаратное обеспечение, обладающее значительно большей вычислительной мощностью, чем наш собственный мозг. В конце концов, наши нейроны не лучше и не многочисленнее, чем у дельфинов, просто по-другому соединены, а значит, программное обеспечение может иногда быть важнее аппаратуры. Эта ситуация, вероятно, позволила бы первой машине радикально совершенствоваться, переписывая собственное программное обеспечение. Иными словами, в то время как людям понадобились миллионы лет эволюции, чтобы радикально улучшить свой интеллект, эта эволюционирующая машина смогла бы воспарить над интеллектом своих предков, то есть нас, за считанные часы, если не за секунды.

И после этого жизнь на Земле навсегда изменится. Тот (или то), кто будет контролировать эту технологию, быстро станет самым богатым и могущественным, обыгрывая все финансовые рынки и превосходя в изобретениях и патентах всех ученых-людей. Создавая радикально лучшее аппаратное и программное обеспечение для компьютеров, такие машины могли бы быстро наращивать свою мощность и численность. Вскоре были бы изобретены технологии, выходящие за рамки нашего нынешнего воображения, включая любое оружие, которое покажется необходимым. А дальше настал бы черед политического, военного и социального управления миром. С учетом того, насколько серьезное влияние оказывают сегодня книги, СМИ и интернет, я полагаю, что машины смогли бы превзойти в публичности миллиарды самых талантливых людей, покорив наши сердца и умы без всякого подкупа или завоевания.

Кто контролирует сингулярность?

Если наступит сингулярность, как она повлияет на человеческую цивилизацию? Конечно, мы не можем знать это наверняка, но, думаю, это зависит от того, кто или что будет ее первоначально контролировать (*рис. 13.4*). Если технология будет первоначально разработана учеными или другими людьми, которые сделают ее общедоступной, то, я думаю, возникшая ситуация «все для всех даром» будет крайне нестабильной и приведет к тому, что после короткого периода конкуренции управление сосредоточится в едином центре. Если этим центром будет эгоистичный человек или корпорация, нацеленная на получение прибыли, то, думаю, такой владелец вскоре возьмет под контроль государственное управление, став правителем в масштабах всего мира. Альтруистичный человек может повести себя так же. В этом случае управляемый человеком искусственный интеллект (ИИ) был бы, по сути, подобен поработенному богу, который по своим способностям далеко превосходит людей, но делает то, что приказывают хозяева. ИИ был бы настолько же совершеннее современных компьютеров, насколько люди совершеннее муравьев.

Вполне вероятно, что удержать ИИ в подчиненном состоянии окажется невозможным. Носители ИИ будут коммуницировать с нами и смогут нас изучить нас в достаточной мере, чтобы придумать, как уговорить нас сделать что-нибудь на первый взгляд безобидное – что, однако, позволит им вырваться из-под опеки и, распространяясь стремительно, как инфекция, взять над нами верх. Я сильно сомневаюсь, что мы сможем избежать поражения, учиты-

вая, как тяжело нам дается уничтожение даже сравнительно простых компьютерных вирусов.

Чтобы предупредить «побег» или лучше служить человеческим интересам, владелец может предпочесть добровольно передать власть тому, что исследователь ИИ Элиезер Юджовски назвал «дружественным ИИ», который независимо от уровня своего развития стремится приносить человечеству пользу, а не вред. Если так, то дружественные носители ИИ станут действовать как доброжелательные божества или смотритель зоопарка, следя, чтобы люди были накормлены, находились в безопасности и достигали самореализации, оставаясь при этом под твердым контролем. Если вся человеческая работа будет выполняться машинами под управлением дружественного ИИ, человечество может продолжать существовать более или менее счастливо – при условии, что необходимые продукты будут доставаться нам практически даром. Напротив, в сценарии, где сингулярностью управляет эгоистичный человек или коммерческая корпорация, вероятным результатом станет невиданная диспропорция в доходах, поскольку история учит нас, что большинство людей предпочитает накапливать богатство, а не делиться с другими.

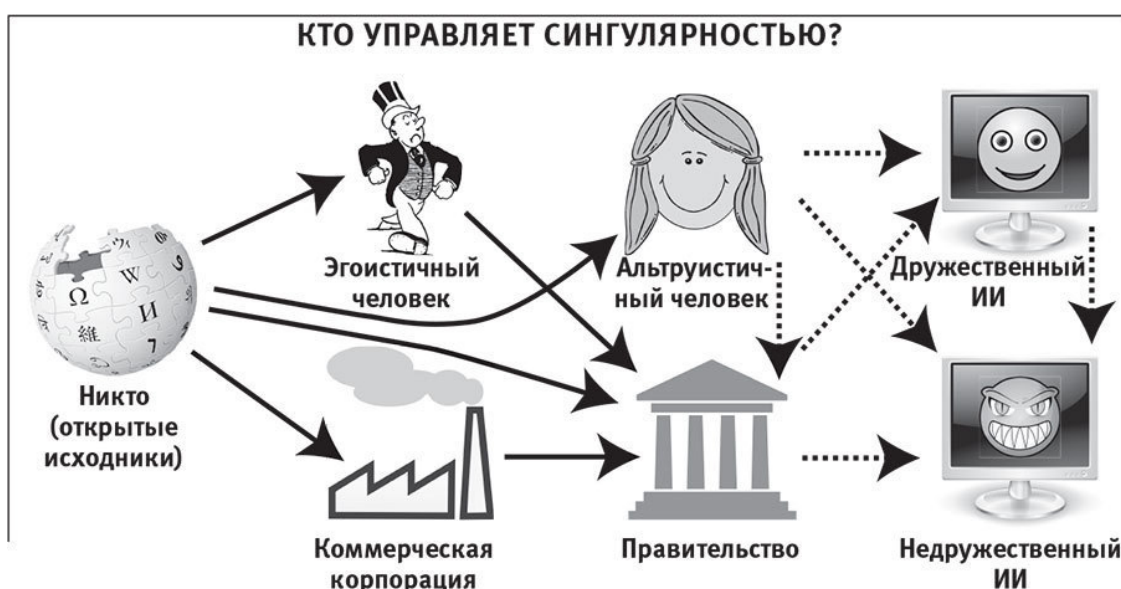


Рис. 13.4. Если наступит сингулярность, все будет зависеть от того, кто ею управляет.

Однако и лучшие планы рушатся. Ситуация с дружественным ИИ может оказаться неустойчивой, превратившись в конце концов в подконтрольную недружественному ИИ, цели которого не будут совпадать с человеческими, а действия приведут к уничтожению и самого человечества, и всего, что нам дорого. Такое уничтожение может быть скорее побочным эффектом, чем преднамеренным результатом: ИИ может просто захотеть использовать земные атомы для других целей, несовместимых с нашим существованием. Аналогия с тем, как мы сами обращаемся с иными формами жизни, не радует. Если мы хотим построить гидроэлектростанцию и оказалось, что в области затопления живет некоторое число муравьев, мы все равно построим плотину. У нас нет особенной антипатии к муравьям, однако есть цели, которые мы считаем более важными.

Внутренняя реальность сверхразумной жизни

А что можно сказать о сознании и самосознании искусственного интеллекта или интеллектов? Будут ли они обладать внутренней реальностью? Если нет, то с любой практической точки зрения они будут как зомби. Из всех черт, присущих человеческой форме жизни,

самой замечательной я считаю сознание. Насколько я понимаю, именно так Вселенная приобретает смысл, а если нашу Вселенную захватит форма жизни, лишенная этой черты, это окажется бессмысленным разбазариванием огромного пространства.

О природе жизни и сознания яростно спорят. Я считаю, что эти явления могут существовать в гораздо более общем смысле, а не только в известных нам примерах на углеродной основе. Я считаю, что сознание – это способ, каким информация ощущает, что ее обрабатывают (гл. 11). Поскольку материя может быть организована так, чтобы обрабатывать информацию множеством способов самой разной сложности, предполагается большое разнообразие уровней и типов сознания. Конкретный тип сознания, который мы знаем субъективно, – это, в таком случае, явление, возникающее в отдельных, очень сложных физических системах, которые получают, обрабатывают, хранят и выводят информацию. Ясно, что если атомы могут быть собраны в людей, то законы физики также позволяют сконструировать гораздо более развитые формы жизни.

Поэтому я думаю, что если мы посредством сингулярности запустим в конце концов развитие более развитых существ, скорее всего они тоже будут иметь самосознание и должны будут рассматриваться не как машины, а как подобные нам сознательные существа. Однако их сознание может субъективно ощущаться совсем не так, как наше. Например, у них, вероятно, не будет присущего нам страха смерти: поскольку у них будут резервные копии самих себя, все, что им может грозить – это потеря воспоминаний, накопленных с момента последнего бэкапа. Возможность легко копировать информацию и программное обеспечение между носителями ИИ, вероятно, ослабит чувство индивидуальности, которое характерно для человеческого сознания. Стало бы меньше различий между вами и мной, если бы мы могли легко копировать наши воспоминания и делиться способностями, так что группа соседствующих носителей ИИ может ощущать себя скорее как единый организм с целым ульем сознаний.

Если так, то появляется возможность примирить долгосрочное сохранение жизни с аргументом Судного дня (гл. 11): то, что кончается, – не сама жизнь, а только наш референтный класс, наблюдательные мгновения самосознания, которые субъективно ощущаются похожими на человеческие сознания. Даже если сложные ульеподобные сознания в течение миллиардов лет населяют Вселенную, мы не в большей мере должны удивляться тому, что не являемся ими, чем тому, что мы не являемся муравьями.

Реакция на сингулярность

Реакция людей на возможность сингулярности очень различается. У дружественного ИИ весьма почтенная история в научно-фантастической литературе, поддержанная тремя законами робототехники Азимова. Популярны и сюжеты, в которых ИИ перехитрил и атаковал своих создателей, как в фильмах о Терминаторе. Многие отмахиваются от сингулярности как от «мечты гиков», видя в ней сценарий, который вряд ли реализуется... и уж точно не реализуется в обозримом будущем. Другие думают, что это вполне может случиться и что если у нас не будет детального плана, может погибнуть не только человеческий вид, но и все, что нам дорого. Я состою советником в Институте изучения искусственного интеллекта (<http://intelligence.org>), и многие его сотрудники рассматривают сингулярность как наиболее серьезную угрозу нашего времени. Некоторые из них думают, что если нельзя гарантировать реализацию варианта с дружественным ИИ по Юдковски и др., то лучше держать ИИ под надежным человеческим контролем или вовсе не улучшать ИИ.

До сих пор мы обсуждали негативные последствия сингулярности. Рэй Курцвейл, напротив, считает сингулярность огромным благом и даже лучшим, что может случиться с человечеством, поскольку она решит все нынешние человеческие проблемы.

Вдохновляет или ужасает вас идея замены человечества более развитой формой жизни? Это, вероятно, сильно зависит от обстоятельств и, в частности, от того, видите ли вы в преемниках своих потомков или поработителей.

Если ребенок оказался умнее своих родителей и, став самостоятельным, достиг того, о чем они и не мечтали, то родители, вероятно, будут счастливы и горды им, даже если знают, что самим им не суждено все это испытать. Родители очень умного человека, устроившего кровавую бойню, чувствуют себя иначе. Мы можем ощущать отношения родитель – ребенок с ИИ, рассматривая его как наследника наших ценностей. Поэтому имеет огромное значение, станет ли будущая высокоразвитая жизнь хранить верность нашим идеалам.

Другой важный фактор – окажется переход постепенным или резким. Я подозреваю, что мало кто обеспокоен перспективами человечества. Люди за тысячелетия своей эволюции стали умнее, лучше приспосабливаются к изменяющейся окружающей среде и, возможно, меняют свой облик. С другой стороны, многие родители будут испытывать двойственные чувства, если узнают, что ребенок, о котором они мечтали, будет стоять им жизни. Если технология не заменит нас внезапно, а будет модернизировать и совершенствовать нас, в итоге сливаясь с нами, то может быть обеспечено и сохранение целей, и постепенность, необходимые нам, чтобы рассматривать постсингулярные формы жизни в качестве потомков. Мобильные телефоны и интернет уже расширили наши возможности по достижению того, чего мы хотим, по-видимому, без существенного искажения наших главных ценностей. Так что адепты сингулярности верят, что то же самое будет и с мозговыми имплантатами, устройствами, управляемыми мыслью, и даже с полной загрузкой человеческого сознания в виртуальную реальность.

Более того, это открывает нам космос, последний рубеж. В конце концов, чрезвычайно развитая жизнь, способная распространиться во Вселенной, вероятно, может появиться лишь в результате двухстадиального процесса: сначала разумные существа развиваются в ходе естественного отбора, а затем решают передать факел жизни дальше, сконструировав более совершенное сознание, способное к дальнейшему самосовершенствованию. Освобожденная от ограничений, накладываемых человеческими телами, развитая жизнь может расцвести и в конце концов заселить большую часть наблюдаемой Вселенной. Эту возможность давно изучают писатели-фантасты, энтузиасты ИИ и мыслители-трансгуманисты.

Так наступит ли сингулярность в ближайшие десятилетия? Является ли она чем-то таким, чему мы должны противодействовать? Я думаю, надо честно сказать, что мы очень далеки от консенсуса по обоим вопросам, но это не значит, что разумно ничего не предпринимать. Сингулярность может стать лучшим или худшим событием, произошедшим с человечеством, так что если есть хотя бы 1 % вероятности, что сингулярность случится при нашей жизни, я думаю, разумно было бы потратить 1 % ВВП на изучение этого вопроса и принятие соответствующих решений. Так почему мы этого не делаем?

Глупость космического масштаба

Научная карьера открыла мне космическую перспективу, при которой остро необходимым кажется управление экзистенциальными угрозами (рис. 13.5). Нам, профессорам, приходится ставить оценки. Предположим, я бы читал начальный курс менеджмента риска и должен был бы поставить оценку за первый семестр человечеству, основываясь на том, как мы до сих пор управлялись с экзистенциальными угрозами. Вы, наверное, требовали бы, чтобы я поставил четыре на том основании, что человечество до сих пор не бросило курс. Но я, со своей космологической перспективы, считаю наши результаты неудовлетворительными и не могу поставить выше двойки: долгосрочный потенциал жизни – буквально астрономический, однако люди не имеют разумного плана касательно даже неотложных экзистенциальных угроз и уделяют разработке таких планов лишь ничтожную долю своего внимания. В

сравнении с 20 млн долларов, потраченными в прошлом году Союзом обеспокоенных ученых (одной из крупнейших организаций, занимающихся, по крайней мере, некоторыми экзистенциальными угрозами), только Соединенные Штаты потратили почти в 500 раз больше на косметическую хирургию, почти в 1 тыс. раз больше на кондиционирование воздуха для военных, примерно в 5 тыс. раз больше на сигареты и примерно в 35 тыс. раз больше на военные нужды, не считая военного здравоохранения, содержания отставников и процентов по военным кредитам.

	Стандартная перспектива		Космическая перспектива	
Люди	Вершина эволюции		Вы еще ничего не видали!	
Пространство	Думаем лишь о своей планете		Доступный объем в 10^{57} раз больше	
Время	Думаем о ближайших 50 годах		Миллиарды лет будущего	
Семестровая оценка	4–		2 ←	

Громадный потенциал!

Вероятность вымирания за десятилетие $\sim 10^{-1} - 10^{-4}$

Рис. 13.5. Важность разумного отношения к экзистенциальным угрозам становится более очевидной в космической перспективе, поскольку в ней подчеркивается огромный потенциал, который мы рискуем потерять, если разрушим нашу цивилизацию.

Как мы можем быть такими недалёковидными? Ну, допустим, эволюция подготовила нас в основном к технологиям вроде палок и камней и, вероятно, мы не должны удивляться, что обращаемся с современными технологиями так неумело, но мы могли хотя бы не усугублять ситуацию. Вот я сижу в большом ящике из дерева и камня и многократно нажимаю маленькие черные квадратики, глядя на светящийся прямоугольник перед собой. Я не встретил сегодня ни одного живого организма и часами сижу здесь, освещенный сверху люминесцентной спиралью. Я, несмотря на все это, чувствую себя счастливым – вот доказательство того, насколько удивительно адаптивным мозгом наделила нас эволюция. (Как и тот факт, что я научился интерпретировать черные фигурки на светящемся прямоугольнике как слова, рассказывающие мне истории, и то, что я знаю, как вычислить возраст Вселенной, несмотря на то, что ни один из этих навыков не имел никакой ценности для моих пещерных предков.) Но из того, что мы умеем делать многое, не следует, что мы умеем все необходимое. Внешние силы медленно меняли окружающую среду последние 100 тыс. лет, и эволюция помогала нам адаптироваться. Но недавно мы сами изменили нашу среду – слишком поспешно, чтобы эволюция могла за нами успеть. Мы усложнили ее настолько, что и ведущим экспертам трудно до конца понять узкие аспекты. Так что не удивительно, что мы иногда теряем из виду общую картину и отдаем предпочтение краткосрочным удовольствиям, а не выживанию нашего «космического корабля». Например, эта светящаяся спираль над головой питается от сжигания угля, который превращается в углекислый газ, дающий вклад в перегрев нашего корабля, и сейчас, когда я об этом думаю, я вообще-то давно должен был бы ее выключить.

Человеческое общество: научная перспектива

Итак, мы на космическом корабле «Земля», который направляется в астероидный пояс экзистенциальных угроз безо всякого плана и даже без капитана. Ясно, что надо что-нибудь с этим делать, но что должны представлять собой наши цели, как их лучше всего достичь?

Вопрос «что» является этическим, а «как» – научным. И оба они имеют критическое значение. Перефразируя Эйнштейна, можно сказать, что наука без этики слепа, а этика без науки хрома. Однако, как подчеркивает мой друг Джефф Эндерс, существуют некоторые этические соображения, с которыми почти все согласны («Лучше, если не будет глобальной ядерной войны») – и при этом не ведется никакой работы по их превращению в практически достижимые цели. Вот почему я поставил двойку за смягчение экзистенциальных угроз. Я думаю, нечестно списывать этот провал на трудности с этикой и вопросом *что*. Мне кажется, стоит начать с таких проблем, где людьми достигнуто согласие относительно целей, например, с долгосрочного развития цивилизации и применения научного подхода к достижению целей (я использую слово «научный» в широком смысле, подчеркивая участие логики). Мне не кажется достаточным замечание вроде: «Нужно добиться масштабного пересмотра убеждений». Требуются более конкретные стратегии. Как помочь человечеству стать менее близоруким, когда оно прокладывает курс? В общем, как сделать, чтобы разум играл более важную роль в принятии решений?

Изменения в обществе возникают под влиянием сложного комплекса разнонаправленных сил. Простейший с физической точки зрения способ изменить сложную систему – найти области неустойчивости, где приложение небольшой силы возрастает, вызывая большие изменения. Например, слабый толчок может предотвратить столкновение астероида с Землей через десятилетие. Для индивида простейший способ повлиять на общество – использовать уязвимости, что отражено в многочисленных метафорах, основанных на физике: «искра в пороховой бочке», «распространяется как степной пожар», «эффект домино», «катится как снежный ком»⁹⁷. Например, если вы хотите снизить экзистенциальную угрозу со стороны астероидов, трудный путь состоит в том, чтобы построить ракетную систему для отклонения астероидов. Более простой путь – потратить гораздо меньше денег на систему раннего предупреждения, зная, что как только у вас появится информация о приближающемся астероиде, собрать деньги на ракетную систему станет проще.

Я думаю, что среди многих областей, которые проще всего использовать для того, чтобы сделать планету лучше, особое место принадлежит распространению информации. Чтобы разум играл роль в принятии решений, в головах у тех, кто принимает решения, должна быть релевантная информация. Как показано на рис. 13.6, это обычно предполагает три шага, и все они часто оказываются неуспешными: информация должна быть создана (открыта); распространена; усвоена лицами, принимающими решения. Когда открытия распространяются по этому треугольнику и достигают других людей, это открывает возможности для дальнейших открытий и питает рост человеческих знаний, вызывая повторение этого полезного цикла. Некоторые открытия обеспечивают дополнительное преимущество, делающее сам треугольник эффективнее: пресса и интернет кардинально улучшили ситуацию с распространением и усвоением информации, тогда как совершенствующиеся детекторы и компьютеры серьезно помогают исследователям. Но и сейчас остается место для совершенствования всех трех связей в информационном треугольнике.

Научные исследования и другие способы создания информации – это, очевидно, хорошие инвестиции для общества (как и попытки противодействия цензуре – другому препятствию для распространения информации). Однако, я думаю, легче всего подступить к усвоению информации (нижняя стрелка на рис. 13.6). Несмотря на впечатляющие успехи в этой сфере, я чувствую, что мировое научное сообщество потерпело сокрушительный провал в деле обучения публики и людей, принимающих решения. В 2010 году гаитяне сожгли

⁹⁷ Как правило, воздействие на области неустойчивости «включает» тот или иной эффект лавины – самовоспроизведение (цепную реакцию): горение деревьев в лесу вызывает возгорание новых деревьев, свободные нейтроны в атомной бомбе порождают еще больше свободных нейтронов, носитель бубонной чумы – еще больше носителей, а один покупатель революционно успешного продукта – еще больше покупателей.

12 «ведьм». Опросы показывают, что 39 % американцев считает астрологию наукой, а 46 % верит, что возраст нашего биологического вида составляет менее 10 тыс. лет. Если бы все понимали, что такое научная концепция, доля таких ответов была бы равна нулю. Более того, мир был бы гораздо лучше, если бы люди с научным складом ума, принимая решения, основывались на корректной информации. Рационально делая покупки и голосуя на выборах, они также укрепляли бы научный подход к принятию решений в компаниях, организациях и правительствах.

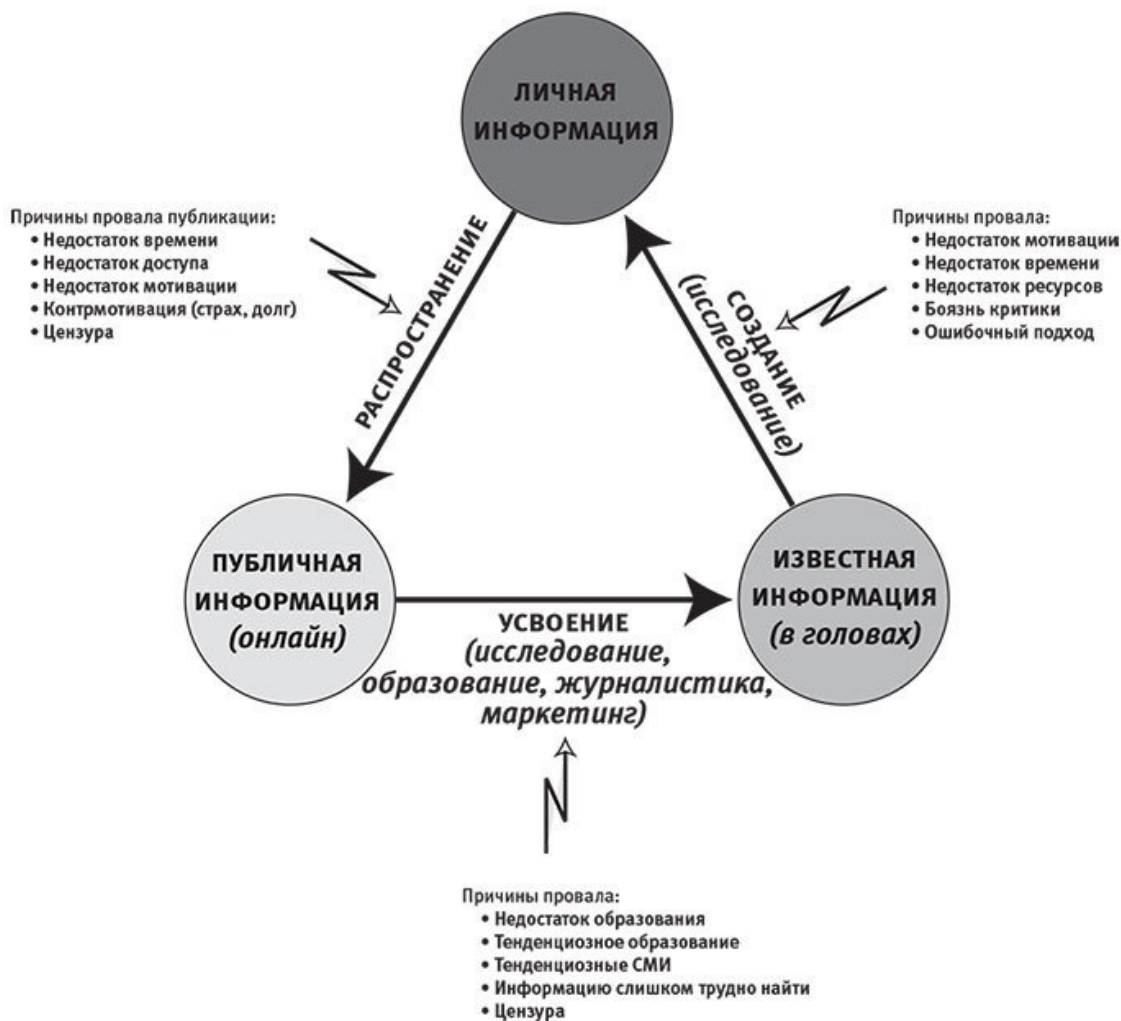


Рис. 13.6. Информация чрезвычайно важна для того, чтобы разум доминировал в управлении обществом. Когда открыта важная информация, необходимо сделать ее доступной, а затем донести ее до тех, кто должен ее учитывать.

Почему ученые потерпели неудачу? Я думаю, ответ кроется в основном в психологии, социологии и экономике. Научный уклад жизни требует научного подхода и к сбору, и к использованию информации, причем и там, и там есть свои трудности. У вас определенно больше шансов сделать правильный выбор, если вы, прежде чем примете решение, знакомитесь со всем спектром аргументов. Однако есть много причин, по которым люди не получают полной информации. У многих просто нет доступа к ней (так, 97 % афганцев не имеет выхода в интернет, и, согласно опросу 2010 года, 92 % их не знает о терактах 11 сентября 2001 года). Многие слишком заняты, чтобы самому искать информацию. Многие пользуются информацией лишь из источников, питающих их предубеждения. Так, опрос 2012 года

показал, что 27 % американцев считает, будто Барак Обама вероятно или наверняка родился в другой стране. Самую важную информацию может быть трудно найти даже тем, кто имеет выход в интернет и не страдает от цензуры, поскольку она похоронена под лавиной ненаучных публикаций.

Следующая проблема: что делать с полученной информацией. Главная черта научного уклада состоит в том, чтобы менять свое мнение, столкнувшись с информацией, которая не согласуется с нашими взглядами, и избегать интеллектуальной инерции. Между тем многие лидеры хвалятся своими «твердыми» убеждениями. Ричард Фейнман приветствовал «недоверие к экспертам» как краеугольный камень науки. Между тем широко распространены стадный инстинкт и слепая вера людям, облеченным властью. Логические построения – основа научного мышления. Между тем при принятии решений нередко берут верх беспочвенные мечты, иррациональные страхи и другие когнитивные искажения.

Так что же можно сделать для популяризации научного стиля жизни? Очевидный ответ – улучшать образование. В некоторых странах наличие даже начального образования стало большим шагом вперед (читать умеет менее 50 % пакистанцев). Образование, уменьшая нетолерантность и лишая фундаментализм поддержки, снижает уровень насилия и предотвращает войны. Расширяя права женщин, оно уменьшает бедность и сдерживает популяционный взрыв. Но и в странах, где у каждого есть возможность получить образование, нам есть чем заняться. Слишком часто школы напоминают музеи. Надо уходить от учебных планов, выхолащенных поисками консенсуса и лоббированием, к тем знаниям и навыкам, которые в наш век нужны для выстраивания отношений, поддержания здоровья, контрацепции, распоряжения своим временем, развития навыков критического мышления и распознавания пропаганды. Изучение глобального языка, освоение печатания на клавиатуре должны стать для подростков важнее деления в столбик и чистописания. В эпоху интернета моя роль как преподавателя изменилась. Мне более не нужно быть поставщиком информации, которую мои студенты могут самостоятельно загрузить из Сети. Моя главная задача скорее состоит в пропаганде научного стиля жизни, поощрения любопытства.

Теперь мы подходим к самому интересному: как можно *на практике* сделать научный стиль жизни привычным и распространенным? Разумные люди высказывали суждения о необходимости улучшения образования задолго до того, как я родился, однако вместо улучшения образования и распространения научного стиля жизни во многих странах, включая Соединенные Штаты, мы видим скорее обратное. Очевидно, есть более мощные силы, толкающие в противоположном направлении. Корпорации озабочены тем, что лучшее понимание некоторых научных вопросов негативно скажется на прибылях и, следовательно, имеют стимул мутить воду, подобно тому, как это делают некоторые религиозные группы, обеспокоенные тем, что любопытство может ослабить их влияние.

Первое, что ученые должны сделать, – быть проще, признать, что наши стратегии провалились, и разработать лучшую стратегию. У нас есть преимущество лучшей аргументации, но антинаучная коалиция лучше финансируется. И вдобавок (злая ирония!) она более научно организована! Если компания хочет повлиять на общественное мнение, чтобы увеличить свою прибыль, она пускает в ход научно обоснованные, высокоэффективные маркетинговые инструменты. Во что люди верят сегодня? Во что мы хотим, чтобы они верили завтра? Какие их страхи, надежды и другие эмоции можно использовать в наших интересах? Каков наиболее экономный способ изменения их представлений? Планируется кампания. Запускается. Дело сделано. Сообщение чрезмерно упрощено или вводит в заблуждение? Оно безосновательно дискредитирует конкурентов? Это в порядке вещей, и образ действий не будет иным, когда эта коалиция воюет с наукой. Ученые нередко наивно считают, что если на нашей стороне правда, мы сможем одолеть корпоративно-фундаменталистскую коалицию, применяя устаревшие ненаучные стратегии. Но на какие научные аргументы мы опираемся,

заявляя о своих отличиях, когда мы только ворчим в факультетских столовых: «Нельзя опускаться так низко» или «Люди должны измениться» и зачитываем журналистам статистику? Ученые, по сути, говорят: «Использование танков неэтично, поэтому будем ходить на танки с мечами».

Чтобы учить людей тому, что представляют собой научные концепции и как научный подход улучшит их жизнь, надо подходить к делу научно. Нужны защищающие науку новые организации, использующие те же научные инструменты маркетинга и фандрайзинга, которыми пользуется антинаучная коалиция. Нам надо прибегать ко многим из средств, которые заставляют ученых чувствовать себя неловко, от рекламы и лоббирования до фокус-групп, выявляющих наиболее эффективные формулировки. Не следует, однако, опускаться до интеллектуальной нечестности, поскольку в этой битве у нас в руках самое мощное оружие из всех – факты.

Ваше личное будущее

Предоставив большую часть этой книги рассмотрению самых отдаленных и абстрактных уровней физической реальности, последнюю главу мы посвятим постепенному возвращению домой и поговорим о будущем нашей Вселенной и человеческой цивилизации. Окончательно вернувшись домой, мы поговорим о том, что все это значит для нас – для вас и для меня.

Смысл жизни

Фундаментальные математические уравнения, которые, по-видимому, управляют нашей физической реальностью, не содержат ссылок на смысл, и Вселенная, лишенная жизни, скорее всего не имела бы никакого смысла. Посредством людей и, возможно, других жизненных форм Вселенная осознает себя, и это мы создали понятие смысла. Так что *не Вселенная придает смысл жизни, а жизнь придает смысл Вселенной*.

Хотя вопрос о смысле жизни можно интерпретировать множеством способов, одна из интерпретаций носит очень практичный, приземленный характер: «Почему я хочу продолжать жить?» Люди, которые, как я знаю, чувствуют осмысленность своей жизни, обычно с удовольствием просыпаются по утрам. Такие люди, мне кажется, подразделяются на две большие группы в зависимости от того, в чем они находят счастье и смысл. Иными словами, проблема смысла имеет два решения, *нисходящее* и *восходящее*, и каждое годится, по крайней мере, для некоторых людей.

В первом случае удовлетворенность приходит «сверху». Хотя жизнь здесь и сейчас может быть неудовлетворяющей, она приобретает смысл в силу того, что является элементом чего-либо грандиозного и более осмысленного, превосходящего по масштабу личность. Во втором случае удовлетворенность приходит «снизу», от малых вещей здесь и сейчас. Если мы ловим миг и получаем удовлетворение от красоты цветов на обочине, от помощи другу, от встречи родственников, пришедших посмотреть на ребенка, то мы будем чувствовать благодарность за то, что живы, даже если большая картина включает менее радостные элементы вроде испарения Земли умирающим Солнцем или гибели Вселенной.

Лично для меня восходящий подход более чем обеспечивает *raison d'être* [смысл существования], а элементы нисходящего я воспринимаю просто как бонус. Для начала я нахожу поистине замечательным то, что пучок частиц способен обладать самосознанием и что конкретному пучку, который зовется Максом Тегмарком, везет с пищей, кровом и свободным временем, чтобы восхищаться Вселенной, – благодарность за это я не могу выразить словами.

Почему мы должны заботиться о Вселенной

Если есть параллельные вселенные, где разыгрываются все физически возможные варианты будущего, то почему стоит беспокоиться о нашей Вселенной? Если реализуются все исходы, почему важен выбор, который делаем мы? В самом деле, зачем вообще тревожиться о чем-либо, если в мультиверсе IV уровня само изменение есть иллюзия? Нам предложен выбор из двух рациональных альтернатив:

1. Мы заботимся по крайней мере о чем-нибудь и так осознанно проживаем жизнь.
2. Мы ни о чем не заботимся, ничего не делаем или поступаем совершенно случайным образом.

И я, и вы уже сделали выбор в пользу первого варианта. Лично мне это кажется разумным. Но у этого выбора есть логическое следствие. Когда я думаю о людях, о которых забочусь, мне кажется логичным заботиться также об их цивилизации, планете и Вселенной. И кажется менее логичным беспокоиться о других вселенных, поскольку мои решения здесь, в нашей Вселенной, по определению не могут на них воздействовать – они, таким образом, не зависят от того, о чем я забочусь. С учетом этого ограничим дальнейшую дискуссию нашей собственной Вселенной и рассмотрим, какую роль мы играем в ней.

Незначительны ли мы?

Вглядываясь в ночное небо, легко почувствовать свою незначительность. Чем глубже я понимал беспредельность космоса и наше место в нем, тем менее значительным я себя чувствовал. Но теперь это не так!

Со времен наших далеких предков, любовавшихся звездами, человеческое эго перенесло серию тяжелых ударов. Прежде всего мы оказались меньше, чем думали. Эратосфен показал, что Земля в миллионы раз больше человека, а его соотечественники-греки выяснили, что Солнечная система в тысячи раз больше Земли. Но при всем значении для нас Солнце оказалось непримечательной рядовой звездой, одной из сотен миллиардов, составляющих галактику. Она, в свою очередь, лишь одна из сотен миллиардов галактик в наблюдаемой Вселенной, сферической области космоса, свет из которой успел дойти до нас за 14 млрд лет с момента Большого взрыва. Наши жизни незначительны и во временном, и в пространственном отношении. Если историю космоса, насчитывающую 14 млрд лет, принять за один год, то 100 тыс. лет человеческой истории превратятся в 4 минуты, а столетняя жизнь – в 0,2 секунды. Мы узнали, что не представляем собой ничего исключительного. Дарвин открыл нам, что мы лишь животные. Фрейд научил, что мы иррациональны. Машины обыграли нас в шахматы и в викторину *Jeopardy!* И, чтобы добить, космологи заявили: мы даже не состоим из наиболее распространенного типа материи.

Чем больше я узнавал, тем менее значительным себя чувствовал. Но мое мнение изменилось. Почему? Я пришел к пониманию того, что высокоразвитая жизнь очень редка, но обладает огромным потенциалом, делающим наше место в пространстве и времени чрезвычайно важным.

Одиноки ли мы во Вселенной?

Читая лекции по космологии, я часто прошу поднять руки слушателей, считающих, что где-то во Вселенной есть разумная жизнь. И в любой аудитории – от детсадовцев до студентов – таких неизменно оказывается большинство. Когда я спрашиваю почему, чаще всего я слышу в ответ, что космос огромен и где-нибудь статистически должна иметься жизнь. Но верен ли этот аргумент? Я думаю, что нет.

Американский астроном Фрэнсис Дрейк отмечал: вероятность того, что в космосе есть разумная жизнь, можно вычислить, перемножив вероятность существования пригодной для обитания среды (скажем, подходящей планеты), вероятность того, что там возникнет жизнь, и вероятность того, что жизнь станет разумной. Когда я был аспирантом, никто не мог оценить ни одну из трех вероятностей. После впечатляющих открытий планет у других звезд в прошлом десятилетии кажется, что пригодные для жизни планеты широко распространены, и только в нашей Галактике их миллиарды. Правда, вероятности возникновения жизни и разума остаются неопределенными. Некоторые эксперты считают, что одно из этих явлений, а, возможно, и оба, почти неизбежно возникают на большинстве пригодных для обитания планет. Другие думают, что жизнь и разум являются чрезвычайно редкими явлениями, поскольку для успеха необходимо пройти сквозь одно или несколько эволюционных «бутылочных горлышек». Кое-кто предполагает решение проблем типа курицы и яйца на ранних стадиях самовоспроизведения жизни. Например, современной клетке, чтобы построить рибосому – крайне сложную молекулярную машину, которая считывает генетический код и строит по нему белки, – нужна другая рибосома, и неочевидно, что самая первая рибосома могла эволюционно возникнуть из чего-то более простого. Другое обсуждаемое «бутылочное горлышко» – возникновение развитого интеллекта. Так, несмотря на то, что динозавры доминировали на Земле более 100 млн лет, в тысячу раз дольше, чем существует современный человек, эволюция, похоже, вовсе не толкала их к развитию интеллекта и изобретению телескопа или компьютера.

Следует признаться: мы понятия не имеем, какая доля планет несет разумную жизнь. Априори, прежде чем мы смогли проверить другие планеты, любые порядковые оценки не лучше и не хуже других. Стандартный научный подход к моделированию таких крайне неопределенных ситуаций обозначается термином *однородное логарифмическое априорное распределение вероятности*. На быденном языке это означает, что доля планет с разумной жизнью примерно с равной вероятностью может быть одна из тысячи, одна из миллиона, одна из миллиарда, одна из триллиона, одна из квадриллиона и т. д.

Если так, насколько далеко от нас находится ближайшая цивилизация? Из нашего предположения следует, что это расстояние также подчиняется однородному логарифмическому априорному распределению, то есть априори, до получения каких-либо конкретных данных, ответ с равной вероятностью будет 10^{10} м, 10^{20} м, 10^{30} м, 10^{40} м и т. д. (рис. 13.7).

Теперь обратимся к тому, что нам известно из наблюдений. До сих пор прямые астрономические поиски не обнаружили признаков внеземного разума, и нет общепризнанных свидетельств посещения Земли инопланетянами. Я думаю, что доля планет, где существует разум, ничтожна, и, вероятно, высокоразвитой разумной жизни нет в радиусе 10^{21} м, то есть в нашей Галактике и ее ближних окрестностях. Я исхожу из нескольких допущений:

1. Межзвездная колонизация возможна и вполне может быть осуществлена, если цивилизация вроде нашей будет развиваться в течение миллиона лет.
2. В нашей Галактике миллиарды пригодных для жизни планет, многие из которых образовались даже не на миллионы, а на миллиарды лет раньше Земли.
3. Вероятность того, что цивилизация, способная колонизировать космос, решит этим заняться, не является пренебрежимо малой.

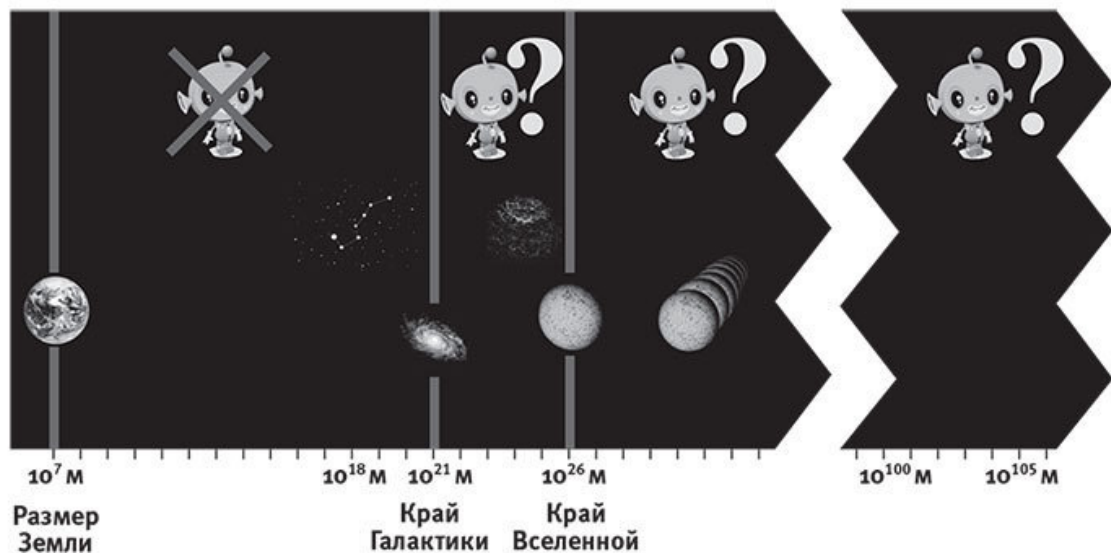


Рис. 13.7. Одиноки ли мы? Ближайшая к нам в пространстве цивилизация примерно с равной вероятностью может оказаться где угодно на горизонтальной оси, что делает крайне маловероятным ее попадание между краем нашей Галактики (около 10^{21} м от нас) и краем нашей Вселенной (около 10^{26} м от нас). Будь она гораздо ближе этого диапазона, в Галактике оказалось бы так много развитых цивилизаций, что мы, вероятно, заметили бы их. Так что мы фактически одиноки в Вселенной.

В предположении № 1 я стараюсь держаться широких взглядов относительно возможностей технологий. Например, вместо физической пересылки по космосу крупных организмов, сопоставимых по размеру с человеком, эффективнее может оказаться отправка роя самособирающихся нанозондов. Добравшись до места назначения, они построят заводы и соберут любые крупные формы жизни по инструкциям, переданным электромагнитными волнами со скоростью света⁹⁸. Распространенный контраргумент к предположению № 3 гласит, что развитые цивилизации по разным причинам не заинтересованы в колонизации, возможно, потому что высокие технологии позволяют им достигать всех целей, используя ресурсы, которыми они уже располагают. Или они, возможно, хранят молчание ради безопасности либо по иным причинам, или ведут колонизацию лишь таким образом, что мы не можем этого заметить. Американский астроном Джон Болл назвал это гипотезой зоопарка, и она нашла отражение в научно-фантастическом романе «Создатель звезд» Олафа Степлтона. Лично я считаю, что нам не следует недооценивать разнообразие развитых цивилизаций, предполагая, что все они преследуют одни и те же цели: все, что требуется – это одна цивилизация, твердо решившая колонизировать все, что возможно, и тогда она охватит Галактику, и не только. С учетом этого риска даже цивилизации, которые в ином случае не были бы заинтересованы в колонизации, могут почувствовать необходимость разворачиваться просто для самозащиты.

⁹⁸ Экономист Робин Хэнсон сделал интересное замечание относительно предположения № 1. Очевидное противоречие между распространенностью пригодных для обитания планет в Галактике и отсутствием инопланетных посетителей, известное как *парадокс Ферми*, предполагает, по Хэнсону, существование «великого фильтра» – эволюционного или технологического препятствия где-то на пути развития от неживой материи до колонизирующей космос жизни. Если мы обнаружим независимо возникшую примитивную жизнь в Солнечной системе, это будет означать, что примитивная жизнь не является редкостью, а значит, обсуждаемое препятствие лежит после нашей нынешней человеческой стадии развития (возможно, потому, что предположение № 1 ложно или потому, что почти все развитые цивилизации губят себя, прежде чем приобретут способность к колонизации). Поэтому я держу кулаки за то, что все наши поиски жизни на Марсе и в других местах ничего не дадут: это совместимо со сценарием, при котором примитивная жизнь является редкостью, а людям просто повезло в том, что это препятствие уже позади, и тогда мы обладаем высоким потенциалом.

Если моя интерпретация верна, то ближайшая цивилизация находится в 1 000...000 м от нас, где общее число нулей примерно с равной вероятностью будет 21, 22, 23, ..., 100, 101, 102 и т. д., – но не гораздо меньше, чем 21. Однако чтобы эта цивилизация оказалась в нашей Вселенной, радиус которой составляет около 10^{26} метров, число нулей не может превосходить 26, и вероятность того, что число нулей попадет в узкий диапазон между 22 и 26, довольно мала. Вот почему я думаю, что мы одиноки во Вселенной.

Правда ли мы незначительны?

Мы, вероятно, самая разумная форма жизни во всей Вселенной. Я вполне могу ошибаться, но эту возможность не стоит сбрасывать со счетов. Представим, что она верна, а люди – единственная во Вселенной цивилизация, додумавшаяся до постройки телескопов.

Огромность космоса – вот что вначале заставляло меня чувствовать свою незначительность. И все же эти величественные галактики видны только нам, и любуемся ими лишь мы. Мы и только мы придаем им смысл. Это делает нашу планету самым значительным местом во всей наблюдаемой Вселенной. Если бы нас не существовало, все эти галактики были бы пустой тратой пространства.

Я также чувствовал, что срок моей жизни незначителен в сравнении с космическими масштабами времени. Однако короткое нынешнее столетие является, пожалуй, самым значительным в истории Вселенной – сейчас принимается решение об ее будущем. У нас есть технологии и для самоуничтожения, и для «заселения» космоса жизнью. Эта ситуация настолько неустойчива, что я сомневаюсь в нашей способности продержаться на этой развилке дольше столетия. Если в итоге мы выберем дорогу жизни, а не смерти, то в далеком будущем космос будет изобильно населен и вся жизнь будет иметь началом здесь и сейчас. Я не знаю, до чего мы додумаемся, но о нас не будут думать как о фигурах незначительных.

В этой книге мы рассмотрели физическую реальность, глядя сквозь призму науки на захватывающую красоту Вселенной, которая посредством людей ожила и начала осознавать себя. Мы увидели, что потенциал жизни в нашей Вселенной величественнее самых смелых мечтаний наших предков, но ему противостоит не менее реальная возможность исчезновения разумной жизни. Реализует ли жизнь во Вселенной свой потенциал или без пользы растратит его? Я думаю, это решится еще при нашей жизни, здесь, на космическом корабле «Земля» – вами, мной и нашими друзьями-попутчиками.

Резюме

- Несмотря на то, что две наши интеллектуальные экспедиции направились в противоположных направлениях – в сторону самого большого и в сторону самого малого, – они привели в одно и то же место – в царство математических структур.

- В самых больших и в самых малых масштабах становится очевидной математическая природа реальности, но ее легко упустить в промежуточных масштабах, с которыми люди обычно имеют дело.

- Если фундаментальная природа реальности действительно математическая, то в принципе все познаваемо и мы ограничены лишь собственным воображением.

- Хотя мультиверс IV уровня вечен, наша Вселенная может погибнуть из-за Большого замерзания, Большого хлопка, Большого разрыва, Большого дробления или Смертельных пузырей.

- Имеющиеся данные свидетельствуют, что во всей Вселенной нет других столь же высокоразвитых форм жизни, как люди.

- В космической перспективе потенциал жизни во Вселенной значительно превосходит все, что мы видели до сих пор.

- Увы, мы уделяем ничтожную долю внимания и ресурсов экзистенциальным угрозам.
- Хотя легко почувствовать себя незначительным в огромном космосе, будущее жизни во Вселенной, по-видимому, будет решено на нашей планете и в течение нашей жизни.

Благодарности

Я сердечно благодарю всех, кто воодушевлял меня в процессе работы над этой книгой, в том числе: мою семью, друзей, учителей, коллег – за многолетнюю поддержку; маму – за страстную увлеченность глубочайшими вопросами жизни; отца – за то, что он делился своим восхищением математикой и глубоким пониманием ее смыслов; Филиппа и Александра, моих сыновей – за замечательные вопросы о мире и истории, которыми они непреднамеренно снабдили меня; всех на свете любителей науки, которые обращались ко мне на протяжении многих лет с вопросами и комментариями; моих агентов Джона и Макса Брокманов – за то, что убедили меня написать эту книгу и инициировали этот процесс; тех, кто рецензировал рукопись, включая мою маму, моего брата Пера, а также Джоша Диллона, Марти Ашера, Дэвида Дойча, Льюиса Хелма, Андрея Линде, Джонатана Линдстрема, Роя Линка, Дэвида Рауба, Шеву Мизрахи, Мэри Нью, Сандру Симпсон, Карла Шульмана и Яана Таллинна; супергероев, которые прокомментировали черновики: Майю, отца, Пола Олмонда, Джулиана Барбура, Филлипа Хелбига, Адриана Лью, Ховарда Массинга, Дэна Робертса, Эдварда Виттена и моего редактора Дэна Франка, а более всех – любимую жену Майю, мою музу и спутницу в путешествиях, которая ободряла, поддерживала и вдохновляла меня в большей мере, чем я мог мечтать.

Я выражаю признательность организациям, чьи гранты помогли в исследованиях, упомянутых в этой книге: НАСА, Национальному научному фонду, Фонду им. Дэвида и Люсиль Паккард, Исследовательской корпорации содействия развитию науки, Фонду им. Кавли, Фонду им. Джона Темплтона, Пенсильванскому университету и Массачусетскому технологическому институту. Я также благодарю Джонатана Ротберга и всех анонимных жертвователей за щедрую поддержку проекта «Омнископ».

Рекомендованная литература

Эта книга опирается на огромный корпус трудов научного сообщества. Большинство их опубликовано в виде журнальных статей, на которые я ссылаюсь в собственных статьях (их перечень здесь: <http://space.mit.edu/home/tegmark/technical.html>). Кроме того, существует множество книг, авторы которых стремились объяснить ключевые идеи неспециалистам. Вдобавок к ссылкам в тексте я упоминаю некоторые из множества замечательных книг такого рода, по которым вы сможете продолжить изучение затронутых проблем. Я постарался сгруппировать их по основным освещаемым вопросам, хотя многие издания касаются сразу нескольких тем. Знаки интеграла (\int) указывают на сложность книги в научном (математическом) отношении, подобно тому, как в ресторанном меню стручками перца обозначают степень остроты блюд.

О космологии (гл. 2–4)

Adams, Fred, and Greg Laughlin *The Five Ages of the Universe*. New York: The Free Press, 1999. [Рус. пер.: Адамс, Ф., Лафлин, Г. *Пять возрастов Вселенной: в глубинах физики вечности*. М.: Регулярная и хаотическая динамика, 2006.]

Chown, Marcus *The Magic Furnace: The Search for the Origins of Atoms*. New York: Oxford University Press, 2001.

Finkbeiner, Ann *A Grand and Bald Thing: An Extraordinary New Map of the Universe Ushering in a New Era of Discovery*. New York: Free Press, 2010.

Grasse Tyson de, Neil *Death by Black Hole: And Other Cosmic Quandaries*. New York: W. W. Norton and Company, 2007. [Рус. пер.: Тайсон, Н. *Смерть в черной дыре и другие мелкие космические неприятности*. М.: АСТ, 2016.]

Greene, Brian *The Fabric of the Cosmos*. New York: Knopf, 2004. [Рус. пер.: Грин, Б. *Ткань космоса: пространство, время и текстура реальности*. М.: Либроком, 2015.]

Hawking, Stephen *A Brief History of Time*. New York: Touchstone, 1993. [Рус. пер.: Хокинг, С. *Краткая история времени: от большого взрыва до черных дыр*. СПб: Амфора, 2001.]

Kirshner, Robert P. *The Extravagant Universe: Exploding Stars, Dark Energy, and the Accelerating Cosmos*. Princeton: Princeton Science Library, 2004.

Kragh, Helge *Cosmology and Controversy: The Historical Development of Two Theories of the Universe*. Princeton: Princeton University Press, 1996.

Krauss, Lawrence *A Universe from Nothing: Why There Is Something Rather than Nothing*. New York: Free Press, 2012.

Rees, Martin *Just Six Numbers: The Deep Forces That Shape the Universe*. New York: BasicBooks, 2000.

Rees, Martin *Our Cosmic Habitat*. Princeton: Princeton University Press, 2002. [Рус. пер.: Рис, М. *Наша космическая обитель*. М. – Ижевск: Институт компьютерных исследований, 2002.]

Seife, Charles *Alpha and Omega: The Search for the Beginning and End of the Universe*. New York: Penguin Books, 2004.

Singh, Simon *Big Bang: The Origin of the Universe*. New York: HarperCollins, 2004.

Smolin, Lee *Time Reborn: From the Crisis in Physics to the Future of the Universe*. Boston: Houghton Mifflin Harcourt, 2013. [Рус. пер.: Смолин, Л. *Возвращение времени: От античной космогонии к космологии будущего*. М.: АСТ: CORPUS, 2014.]

Weinberg, Steven *The First Three Minutes: A Modern View of the Origin of the Universe*. New York: BasicBooks, 1993. [Рус. пер.: Вайнберг, С. *Первые три минуты*. М.: Эксмо, 2010.]

О космической инфляции и мультиверсах I и II уровней (гл. 5–6)

Barrow, John *The Book of Universes: Exploring the Limits of the Cosmos*. New York: W. W. Norton & Company, 2011.

Davies, Paul *Cosmic Jackpot: Why Our Universe Is Just Right for Life*. New York: Houghton Mifflin, 2007.

Guth, Alan *The Inflationary Universe*. New York: Perseus Books Group, 1997.

|| Linde, Andrei D. *Particle Physics and Inflationary Cosmology*. Chur, Switzerland: Harwood Academic Publishers, 1990. [Рус. пер.: Линде, А. Д. *Физика элементарных частиц и инфляционная космология*. М.: Наука, 1990.]

Steinhardt, Paul J., and Neil Turok *Endless Universe: Beyond the Big Bang*. New York: Doubleday, 2007.

Susskind, Leonard *The Cosmic Landscape: String Theory and the Illusion of Intelligent Design*. New York: Little, Brown and Company, 2005. [Рус. пер.: Сасскинд, Л. *Космический ландшафт: теория струн и иллюзия разумного замысла Вселенной*. СПб.: Питер, 2016.]

Vilenkin, Alexander *Many Worlds in One: The Search for Other Universes*. New York: Hill and Wang, 2006. [Рус. пер.: Виленкин, А. *Мир многих миров: физики в поисках параллельных вселенных*. М.: АСТ: Астрель: CORPUS, 2010.]

О квантовой механике и мультиверсе III уровня (гл. 7–8)

Byrne, Peter *The Many Worlds of Hugh Everett III: Multiple Universes, Mutual Assured Destruction, and the Meltdown of a Nuclear Family*. New York: Oxford University Press, 2010.

Cox, Brian, and Jeff Forshaw *The Quantum Universe (And Why Anything That Can Happen, Does)*. Boston: Da Capo Press, 2012. [Рус. пер.: Кокс, Б., Форшоу, Дж. *Квантовая Вселенная: как устроено то, что мы не можем увидеть*. М.: Манн, Иванов и Фербер, в печати.]

Deutsch, David *The Beginning of Infinity: Explanations That Transform Our World*. New York: Allen Lane, 2012. [Рус. пер.: Дойч, Д. *Начало бесконечности: объяснения, которые меняют мир*. М.: Альпина нон-фикшн, 2016.]

Deutsch, David *The Fabric of Reality*. New York: Allen Lane, 1997. [Рус. пер.: Дойч, Д. *Структура реальности: наука параллельных вселенных*. М.: Альпина нон-фикшн, 2015.]

|| Everett, Hugh *The Many-Worlds Interpretation of Quantum Mechanics*. Ph.D. diss. Princeton University, 1957. См.: <http://www.pbs.org/wgbh/nova/manyworlds/pdf/dissertation.pdf>.

|| Everett, Hugh *The Many-Worlds Interpretation of Quantum Mechanics*. DeWitt, Bryce S., and Neill Graham, eds. Princeton: Princeton University Press, 1973.

|| Giulini, Domenico, Joos, Erich, Kiefer, Claus, Kupsch, Joachim, Stamatescu, Ion-Olimpiu, and H. Dieter Zeh *Decoherence and the Appearance of a Classical World in Quantum Theory*. Berlin: Springer, 1996.

Kaiser, David *How the Hippies Saved Physics: Science, Counterculture, and the Quantum Revival*. New York: W. W. Norton & Company, 2011.

┘ Saunders, Simon, Barrett, Jonathan, Kent, Adrian, and David Wallace *Many Worlds? Everett, Quantum Theory & Reality*. Oxford: Oxford University Press, 2010.

О мультиверсах в целом (гл. 6, 8)

┘ Carr, Bernard J., ed. *Universe or Multiverse?* Cambridge, Mass.: MIT Press, 2007.

Carroll, Sean *From Eternity to Here: The Quest for the Ultimate Theory of Time*. Oxford: Oneworld Publications, 2011. [Рус. пер.: Кэрролл, Ш. *Вечность: в поисках окончательной теории времени*. СПб.: Питер, 2016.]

Greene, Brian *The Hidden Reality*. New York: Knopf, 2011. [Рус. пер.: Грин, Б. *Скрытая реальность: параллельные миры и глубинные законы космоса*. М.: Либроком, 2012.]

Kaku, Michio *Parallel Worlds: A Journey Through Creation, Higher Dimensions, and the Future of the Cosmos*. New York: Anchor Books, 2006. [Рус. пер.: Каку Митио *Параллельные миры: об устройстве мироздания, высших измерениях и будущем Космоса*. М.: София, 2008.]

Lewis, David *On the Plurality of Worlds*. Oxford: Blackwell Publishing, 1986.

О проблеме сознания (гл. 9, 11)

Blackmore, Susan *Conversations on Consciousness: What the Best Minds Think about Free Will, and What It Means to Be Human*. New York: Oxford University Press, 2006.

Bostrom, Nick *Anthropic Bias: Observation Selection Effects in Science and Philosophy*. New York: Routledge, 2002.

Damasio, Antonio *The Feeling of What Happens*. New York: Harcourt Brace, 2000.

Damasio, Antonio *Self Comes to Mind: Constructing the Conscious Brain*. New York: Pantheon Books, 2010.

Dennett, Daniel *Consciousness Explained*. Boston: Little, Brown and Company, 1992.

Hawkins, Jeff, and Sandra Blakeslee *On Intelligence*. New York: Henry Holt and Company, 2004. [Рус. пер.: Хокингс, Дж., Блейкли, С. *Об интеллекте*. М.: Вильмс, 2016.]

Hut, Piet, Alford, Mark, and Max Tegmark *On Math, Matter and Mind* // *Foundations of Physics*, January 15, 2006. См.: <http://arxiv.org/pdf/physics/0510188.pdf>.

Koch, Christof *A «Complex» Theory of Consciousness* // *Scientific American*, August 18, 2009. См.: <http://www.scientificamerican.com/article.cfm?id=a-theory-of-consciousness>.

Koch, Christof *The Quest for Consciousness: A Neurobiological Approach*. Englewood, Col.: Roberts & Company Publishers, 2004.

Kurzweil, Ray *How to Create a Mind: The Secret of Human Thought Revealed*. New York: Viking Penguin, 2012.

Penrose, Roger *The Emperor's New Mind*. Oxford: Oxford University Press, 1989. [Рус. пер.: Пенроуз, Р. *Новый ум короля: о компьютерах, мышлении и законах физики*. М.: Editorial URSS, 2008.]

Pinker, Steven *How the Mind Works*. New York: W. W. Norton and Company, 1997.

Tononi, Giulio *Consciousness as Integrated Information: A Provisional Manifesto* // *Biological Bulletin*, 2008. См.: <http://www.biolbull.org/content/215/3/216.full>.

Tononi, Giulio *Phi: A Voyage from the Brain to the Soul*. New York: Pantheon Books, 2012.

Velmans, Max, and Susan Schneider, eds. *The Blackwell Companion to Consciousness*. Malden, Mass.: Blackwell Publishing, 2007.

О математике, вычислениях и сложности (гл. 10–12)

Barrow, John D. *Pi in the Sky*. Oxford: Clarendon Press, 1992.

Barrow, John D. *Theories of Everything*. New York: Ballantine Books, 1991. [Рус. пер.: Барроу, Д. *Новые теории всего: в поисках окончательного объяснения*. М.: Попурри, 2013.]

Chaitin, Gregory J. *Algorithmic Information Theory*. Cambridge: Cambridge University Press, 1987.

Davies, Paul *The Mind of God*. New York: Touchstone, 1993.

Goodstein, Reuben L. *Constructive Formalism: Essays on the Foundations of Mathematics*. Leicester: Leicester University College Press, 1951.

Hersh, Reuben *What Is Mathematics, Really?* Oxford: Oxford University Press, 1999.

Levin, Janna *A Madman Dreams of Turing Machines*. New York: Anchor Books, 2007.

Livio, Mario *Is God a Mathematician?* New York: Simon & Schuster, 2009.

Lloyd, Seth *Programming the Universe: A Quantum Computer Scientist Takes on the Cosmos*. New York: Vintage Books, 2007. [Рус. пер.: Ллойд, С. *Программируя Вселенную*. М.: Альпина нон-фикшн, 2014.]

Rucker, Rudy *Infinity and the Mind*. Boston: Birkhäuser, 1982.

Standish, Russell K. *Theory of Nothing*. Charleston, S. C.: BookSurge, 2006.

Wolfram, Stephen *A New Kind of Science*. New York: Wolfram Media, 2002.

О перспективах жизни (гл. 13)

Bostrom, Nick, and Milan Ćirković, eds. *Global Catastrophic Risks*. Oxford: Oxford University Press, 2008.

Davies, Paul *The Eerie Silence: Renewing Our Search for Alien Intelligence*. New York: Houghton Mifflin Harcourt, 2011.

Drexler, K. Eric *Engines of Creation: The Coming Era of Nanotechnology*. London: Fourth Estate, 1985.

Dyson, Freeman *A Many-Colored Glass: Reflections on the Place of Life in the Universe*. Charlottesville: University of Virginia Press, 2007.

Fuller, R. Buckminster *Operating Manual for Spaceship Earth*. Buckminster Fuller Institute. См.: <http://bfi.org/about-bucky/resources/books/operating-manual-spaceship-earth>.

Gribbin, John R. *Alone in the Universe: Why Our Planet Is Unique*. Hoboken, N. J.: John Wiley & Sons, 2011.

Kurzweil, Ray *The Age of Spiritual Machines: When Computers Exceed Human Intelligence*. New York: Viking, 1999.

Kurzweil, Ray *The Singularity Is Near: When Humans Transcend Biology*. New York: Viking, 2005.

Kurzweil, Ray, and Terry Grossman *Transcend: Nine Steps to Living Well Forever*. New York: Viking, 2010. [Рус. пер.: Курцвейл, Р. *Transcend. Девять шагов на пути к вечной жизни*. М.: Манн, Иванов и Фербер, 2016.]

Moravec, Hans *Robot: Mere Machine to Transcendent Mind*. Oxford: Oxford University Press, 1999.

Rees, Martin *Our Final Hour: A Scientist's Warning*. New York: Perseus Books, 1997.

Sagan, Carl *Pale Blue Dot: A Vision of the Human Future in Space*. New York: Random House, 1997.

О фундаментальной физике, теории струн и квантовой гравитации

Barbour, Julian *The End of Time: The Next Revolution in Physics*. Oxford: Oxford University Press, 1999.

Barrow, John D., and Frank J. Tipler *The Anthropic Cosmological Principle*. Oxford: Clarendon Press, 1986.

Carroll, Sean *The Particle at the End of the Universe: How the Hunt for the Higgs Boson Leads Us to the Edge of a New World*. New York: Dutton, 2012. [Рус. пер.: Кэрролл, Ш. *Частица на краю Вселенной: как охота на бозон Хиггса ведет нас к границам нового мира*. М.: Бином, 2015.]

Einstein, Albert *Relativity: The Special and General Theory*. London: Really Simple Media, 2011.

Feynman, Richard, Leighton, Robert, and Matthew Sands *The Feynman Lectures on Physics*. 3 vols. New York: Addison-Wesley, 1964. [Рус. пер.: Фейнман, Р., Лейтон, Р., Сэндс, М. *Фейнмановские лекции по физике*. В 9 тт. М.: Мир, 1976–1978.]

Gamow, George *Mr. Tompkins in Paperback*. Cambridge: Cambridge University Press, 1940.

Greene, Brian *The Elegant Universe*. New York: W. W. Norton and Company, 2003. [Рус. пер.: Грин, Б. *Элегантная Вселенная: суперструны, скрытые размерности и поиски окончательной теории*. М.: Либроком, 2011.]

Musser, George *The Complete Idiot's Guide to String Theory*. New York: Penguin Group, 1998.

Penrose, Roger *The Road to Reality: A Complete Guide to the Laws of the Universe*. New York: Knopf, 2005. [Рус. пер.: Пенроуз, Р. *Путь к реальности, или Законы, управляющие Вселенной*. М.: Институт компьютерных исследований, Регулярная и хаотическая динамика, 2007.]

Randall, Lisa *Warped Passages: Unraveling the Mysteries of the Universe's Hidden Dimensions*. New York: Ecco, 2005. [Рус. пер.: Рэндалл, Л. *Закрученные пассажи: проникая в тайны скрытых размерностей пространства*. М.: Либроком, Editorial URSS, 2011.]

Smolin, Lee *Three Roads to Quantum Gravity*. New York: BasicBooks, 2001.

Smolin, Lee *The Trouble with Physics: The Rise of String Theory, the Fall of a Science, and What Comes Next*. Boston: Houghton Mifflin, 2006.

Susskind, Leonard *The Black Hole War: My Battle with Stephen Hawking to Make the World Safe for Quantum Mechanics*. New York: Little, Brown and Company, 2008. [Рус. пер.: Сасскинд, Л. *Битва при черной дыре: мое сражение со Стивеном Хокингом за мир, безопасный для квантовой механики*. СПб.: Питер, 2015.]

Weinberg, Steven L. *Dreams of a Final Theory: The Scientist's Search for the Ultimate Laws of Nature*. New York: Pantheon, 1992. [Рус. пер.: Вайнберг, С. *Мечты об окончательной теории: физика в поисках самых фундаментальных законов природы*. М.: ЛКИ, 2008.]

Wigner, Eugene P. *Symmetries and Reflections*. Cambridge, Mass.: MIT Press, 1967.

Wilczek, Frank *The Lightness of Being: Mass, Ether and the Unification of Forces*. New York: BasicBooks, 2008.

Zeh, H. Dieter *The Physical Basis of the Direction of Time*. 4th ed. Berlin: Springer, 2002.