



АЛЕКС ВИЛЕНКИН

МИР МНОГИХ МИРОВ

Физики в поисках иных
вселенных

СЕРИЯ Э | Л | Е | М | Е | Н | Т | Ы

ALEX VILENKIN

MANY WORLDS IN ONE

The Search for Other Universes



Сергей Давыдов

ДИНАСТИЯ

Алекс Виленкин

МИР МНОГИХ МИРОВ

Физики в поисках
параллельных вселенных

*Перевод с английского
Александра Сергеева*



издательство **астрель**

УДК 524
ББК 22.632
В44

Издание осуществлено при поддержке
Фонда некоммерческих программ Дмитрия Зимина "Династия"

Художественное оформление и макет Андрея Бондаренко

Виленкин, А.

В44 Мир многих миров: Физики в поисках параллельных вселенных / Алекс Виленкин; пер. с англ. А. СЕРГЕЕВА. — М.: АСТ : Астрель : CORPUS, 2010. — 303, [1] с. — (ЭЛЕМЕНТЫ)

Все мы живем в остатках огромного взрыва, случившегося около 14 миллиардов лет тому назад и положившего начало нашей Вселенной. Однако что предшествовало этому грандиозному событию? И какова вероятность того, что помимо нашего мира где-то существуют другие? В своей популярно написанной книге физик, профессор университета Тафтс (США) Алекс Виленкин знакомит читателя с последними научными достижениями в сфере космологии и излагает собственную теорию, доказывающую возможность — и, более того, вероятность — существования бесчисленных параллельных вселенных. Выводы из его гипотезы ошеломляют: за границами нашего мира раскинулось множество других миров, похожих на наш или принципиально иных, населенных невообразимыми созданиями или существами, неотличимыми от людей. Идеи Виленкина оказались настолько ясными, убедительными и в то же время революционными, что в одночасье превратили скромного кабинетного ученого в звезду популярных ток-шоу, а его книгу — в международный бестселлер, получивший колоссальный общественный резонанс.

УДК 524
ББК 22.632

ISBN 978-5-271-25401-7 (ООО "Издательство Астрель")

- © 2006 by Alex Vilenkin all rights reserved
- © Фонд Дмитрия Зимина "Династия", издание на русском языке, 2009
- © А.Сергеев, перевод на русский язык, 2009
- © А.Бондаренко, художественное оформление, макет, 2009
- © ООО "Издательство Астрель", 2009
- Издательство CORPUS ®



Фонд Дмитрия Зимина

Династия

Фонд некоммерческих программ

“Династия”

основан в 2002 году

Дмитрием Борисовичем Зиминим,
почетным президентом компании “Вымпелком”.

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

В рамках программы по популяризации науки
Фондом запущено несколько проектов.

В их числе — сайт elementy.ru, ставший одним
из ведущих в русскоязычном Интернете

тематических ресурсов,

а также проект “Библиотека “Династии” —
издание современных научно-популярных книг,
тщательно отобранных экспертами-учеными.

Книга, которую вы держите в руках,
выпущена в рамках этого проекта.

Более подробную информацию о Фонде “Династия”
вы найдете по адресу

www.dynastyfdn.ru.

Алине

Пролог	11
--------------	----

Часть I. Сотворение мира

Глава 1. Что взорвалось, как взорвалось и что послужило причиной взрыва	17
Глава 2. Взлет и падение отталкивающей гравитации	22
Глава 3. Творение и его недостатки	33
Глава 4. Современная история сотворения мира	44
Глава 5. Инфляционная Вселенная	66
Глава 6. Слишком хорошо, чтобы быть ошибкой	78

Часть II. Вечная инфляция

Глава 7. Антигравитационный камень	101
Глава 8. Вечная инфляция	105
Глава 9. Говорящие небеса	119
Глава 10. Бесконечные острова	126

Глава 11. Да здравствует король!	138
--	-----

Часть III. Принцип заурядности

Глава 12. Проблема космологической постоянной	161
---	-----

Глава 13. Антропные владения	169
------------------------------------	-----

Глава 14. Заурядность, возведенная в принцип	185
--	-----

Глава 15. Теория Всего	201
------------------------------	-----

Часть IV. До начала

Глава 16. Было ли у Вселенной начало?	221
---	-----

Глава 17. Сотворение вселенных из ничего	233
--	-----

Глава 18. Конец света	254
-----------------------------	-----

Глава 19. Огонь в уравнениях	261
------------------------------------	-----

Эпилог	270
--------------	-----

Примечания	271
------------------	-----

Именной и предметно-тематический указатель	293
---	-----

Пролог

Поразительный успех этой книги стал для всех сюрпризом. Ее автор Александр Виленкин, скромный, даже застенчивый профессор физики, неожиданно стал знаменитым. Его участие в ток-шоу расписано на полгода вперед, ему пришлось нанять четырех телохранителей и скрываться от папарацци в неизвестном месте. Его сенсационный бестселлер “Мир множества миров” описывает новую космологическую теорию, согласно которой любая возможная цепочка событий, сколь бы причудливой она ни была, уже случилась где-то во Вселенной — и не однажды, а бесконечное число раз!

Следствия новой теории ошеломляют. Если ваша любимая футбольная команды не победила в чемпионате, не отчаивайтесь: она одержала победу на бесчисленном множестве других земель. На самом деле существует бесконечное число земель, где ваша команда побеждала все годы без исключения! Если ваше неудовольствие распространяется дальше футбола и вам окончательно надоело все на свете, книга Виленкина и тут может вам кое-что предложить. Согласно новой теории,

большинство мест во Вселенной совершенно не похожи на нашу Землю и даже подчиняются другим законам физики.

Самый спорный момент в этой книге — это утверждение, согласно которому каждый из нас имеет бесконечное число идентичных клонов, живущих на бесчисленных землях, разбросанных по Вселенной. Многих эта идея лишила сна. Люди чувствуют, что на их уникальность совершено посягательство, и вот посещаемость психоаналитиков удвоилась, а продажи этой книги взлетели до небес. Опираясь на свою теорию, Виленкин также предсказал, что на некоторых землях его книга будет иметь феноменальный успех. Но справедливости ради он признал, что на бесконечном числе других ее ждет полный провал...



Мы живем в остатках колоссального взрыва. Это грандиозное событие случилось около 14 миллиардов лет назад. Все пространство превратилось в горячий быстро расширяющийся огненный шар из вещества и излучения. По мере расширения он остывал, его свечение постепенно слабело, а Вселенная медленно погружалась во тьму. Миллиард лет прошел без особых событий. Но постепенно благодаря гравитации сформировались галактики, и мириады звезд затопили Вселенную своим светом. Планеты, окружающие вокруг некоторых звезд, стали домом для разумных существ. Некоторые существа стали космологами и поняли, что Вселенная началась с Большого взрыва.

По сравнению с историками и следователями у космологов есть большое преимущество: они видят, что в действительности происходило в прошлом. Свету далеких галактик требуются миллиарды лет, чтобы достичь телескопов на Земле, так что мы наблюдаем галактики такими, какими они были в их юности — тогда, когда зародился их свет. Микроволновые детекторы регистрируют слабое послесвечение огненного шара, несущее

изображение Вселенной в еще более раннюю эпоху, предшествовавшую образованию галактик. Мы видим, как перед нами разворачивается история Вселенной.

Но у этого замечательного видения есть свои пределы. И хотя мы можем проследить историю космоса до моментов, менее чем на секунду отстоящих от Большого взрыва, сам он остается окруженным тайной. Чем вызвано это загадочное событие? Был ли он истинным началом Вселенной? Если нет, то что тогда было раньше? Существует также фундаментальный предел того, что мы можем видеть в пространстве. Наш горизонт определяется максимальным расстоянием, которое мог пройти свет после Большого взрыва. Источники, находящиеся дальше горизонта, не могут наблюдаться просто потому, что их свет еще не успел достичь Земли. Нам остается лишь гадать, на что похожа остальная часть Вселенной. Одинакова ли она повсюду, или ее отдаленные области могут радикально отличаться от нашего космического окружения? Простирается ли Вселенная до бесконечности или замкнута на себя, подобно поверхности Земли?

Это самые фундаментальные вопросы о Вселенной. Но можем ли мы хотя бы надеяться когда-нибудь получить на них ответы? Если я скажу, что Вселенная неожиданно кончается сразу за горизонтом или что там она заполнена водой и населена разумными золотыми рыбками, сможет ли кто-нибудь доказать, что я не прав? Космологи поэтому концентрируются в основном на наблюдаемой части Вселенной, оставляя философам и теологам рассуждения о том, что лежит за ее пределами. Но если нашим поискам в самом деле суждено закончиться на горизонте, не есть ли это величайшее разочарование? Мы можем открыть множество новых галактик и картировать всю видимую Вселенную подобно тому, как мы картировали поверхность Земли. Но до каких пределов? Картирование нашей Галактики может служить практическим целям, поскольку когда-нибудь в будущем мы, вероятно, захотим ее колонизировать. Но галактики в мил-

лиардах световых лет от нас вряд ли ждет колонизация. По крайней мере, не в ближайшие несколько миллиардов лет. Конечно, притягательность космологии не в ее практической полезности. Наше восхищение космосом той же природы, что и чувства, вызванные древними мифами о творении. Оно коренится в желании понять происхождение и судьбу Вселенной, ее устройство и место человека во всеобщем порядке вещей.

Космологи, которые принимают вызов этих предельных космических вопросов, теряют свое преимущество перед следователями. Чтобы строить умозаключения о временах и местах, которые невозможно наблюдать, они могут полагаться лишь на косвенные улики, используя измерения, сделанные в доступной части Вселенной. Это ограничение значительно затрудняет предъявление доказательств, которые находились бы “за пределами разумных сомнений”. Но благодаря замечательному прогрессу космологии в последние годы у нас теперь есть такие ответы на предельные космические вопросы, которым с определенным основанием можно доверять.

Картина мира, порожденная этими новыми достижениями, не может не вызывать удивления. Если перефразировать Нильса Бора, она даже может оказаться достаточно безумной, чтобы быть истинной. Она неожиданным образом соединяет некоторые, казалось бы, взаимоисключающие свойства: Вселенная одновременно бесконечна и конечна, развивается и неизменна, вечна и имеет начало. Теория также предсказывает, что в некоторых отдаленных областях есть планеты в точности такие же, как наша Земля, с такими же очертаниями континентов, на которых живут точно такие же существа — наши клоны. И кое-кто из них, возможно, держит в руках экземпляры этой же самой книги — книги о новой картине мира, ее возникновении, а также о поразительных, странных и порой тревожных выводах из нее.

Часть I **Сотворение** **мира**

ГЛАВА 1

Что взорвалось, как взорвалось и что послужило причиной взрыва

С точки зрения инфляционной космологии следует признать, что Вселенная досталась нам задаром.

Алан Гут

Как-то раз в самый обычный зимний день 1980 года, около полудня, я сидел в тесно набитой гарвардской аудитории, слушая самый поразительный доклад из всех, что мне довелось посетить за много лет. Молодой физик из Стэнфорда Алан Гут рассказывал о новой теории происхождения Вселенной. Раньше я не встречался с Гутом, но знал о том, как неожиданно этот прежде никому не известный ученый вдруг стал знаменитостью. Всего месяцем раньше он принадлежал к кочевому племени “постдоков” — молодых исследователей, перебивающихся временными контрактами в надежде однажды отличиться и осесть на постоянной работе в каком-нибудь университете. Для Гута все складывалось не лучшим образом: в свои 32 года он был уже немного староват для этого молодого племени, и поток контрактных предложений уже начинал потихоньку пересыхать. Вот тогда-то его и осенила удачная мысль, переменявшая все вокруг.

Гут оказался невысоким подвижным молодым человеком, за долгие годы “постдоковских” скитаний ничуть не утратившим мальчишеского энтузиазма. Он сразу дал понять, что не пытается опровергнуть теорию Большого взрыва. В этом не было нужды. Позиции этой теории были очень сильны, а свидетельства в ее пользу — очень убедительны.

Самый сильный аргумент — это расширение Вселенной, открытое в 1929 году Эдвином Хабблом. Он обнаружил, что далекие галактики стремительно разлетаются от нас. Если проследить движение галактик назад во времени, то в некоторый момент в прошлом все они сливаются вместе, что и говорит о взрывном возникновении Вселенной.

Другим важным подтверждением Большого взрыва служит *космическое микроволновое излучение*. Космос заполнен электромагнитными волнами примерно той же частоты, что в обычных микроволновых печах. Интенсивность этого излучения снижается по мере расширения Вселенной, так что мы сейчас наблюдаем лишь слабый отсвет раскаленного первичного огненного шара.

Теория Большого взрыва служит космологам для изучения того, как этот огненный шар расширялся и остывал, как возникали атомные ядра и как из бесформенных газовых облаков возникали грандиозные спирали галактик. Результаты этих исследований прекрасно согласовывались с астрономическими наблюдениями, и это практически не оставляло сомнений в том, что теория развивается в правильном направлении. Однако она описывала только последствия Большого взрыва и ничего не говорила о нем самом — выражаясь словами самого Гута, “что “взорвалось”, как “взорвалось” и что послужило причиной “взрыва”!

Вдобавок ко всему при ближайшем рассмотрении Большой взрыв выглядит весьма странно. Вообразите себе булавку, стоящую на острие: малейший толчок — и она упадет. Так же

и с Большим взрывом. Окружающий нас огромный мир, полный галактик, образуется только при том условии, что энергия первичного взрыва выверена с немыслимой точностью. Ничтожное отклонение приводит к космологической катастрофе: либо огненный шар коллапсирует под действием собственного тяготения, либо Вселенная оказывается почти пустой.

Космология Большого взрыва просто постулирует, что огненный шар обладал требуемыми свойствами. Среди физиков преобладало мнение, согласно которому наука может описать, как развивалась Вселенная из заданной начальной конфигурации, но попытки разобраться, почему все началось именно с этого конкретного состояния, выходят за рамки физики. Вопросы, связанные с этим начальным состоянием, считались “философией”, что на языке физиков означает напрасную трату времени. Впрочем, это мнение не делало Большой взрыв менее загадочным.

И вот теперь Гут рассказывал нам о том, что завесу тайны, окружающую Большой взрыв, можно приподнять. Новая теория могла раскрыть его природу и объяснить, почему первичный огненный шар был так тонко настроен. Аудитория затихла. Все были заинтригованы.

Новая теория давала Большому взрыву необыкновенно простое объяснение: Вселенная раздувалась отталкивающим тяготением! Ключевую роль в теории играла гипотетическая сверхплотная материя с крайне необычными свойствами. Самым необычным среди них было то, что она порождала мощное отталкивающее гравитационное поле. Гут предположил, что в ранней Вселенной было некоторое количество такой материи. Много ему не требовалось: достаточно было крошечного кусочка.

Внутреннее гравитационное отталкивание заставило бы этот кусочек очень быстро расширяться. Если бы он состоял из обычного вещества, его плотность падала бы с расширением,



Рис. 1.1. Кусочек гравитационно отталкивающей материи.

но странная антигравитационная материя ведет себя совсем по-другому: ее второе ключевое свойство состоит в неизменной плотности, так что ее общая масса пропорциональна объему, который она занимает. По мере роста размеров кусочка его масса увеличивается, так что его отталкивающая гравитация становится все сильнее и он все быстрее расширяется. Короткий период такого ускоренного расширения, которое Гут назвал инфляцией, может увеличить крошечный исходный кусочек до чудовищных размеров, превосходящих всю наблюдаемую сегодня Вселенную.

Поразительный рост массы в ходе инфляции может на первый взгляд показаться нарушением самого фундаментального закона природы — принципа сохранения энергии. Согласно знаменитой формуле Эйнштейна $E = mc^2$ энергия пропорциональна массе. (Здесь E — энергия, m — масса, а c — скорость света.) Выходит, энергия раздувающегося куска материи должна вырасти в колоссальное число раз, тогда как закон сохранения энергии требует, чтобы она оставалась постоянной. Этот парадокс исчезает, если учесть вклад в энергию, который дает гравитация. Уже давно известно, что гравитационная энергия всегда отрицательна. Раньше это казалось не столь уж важным, но

теперь приобрело поистине космическое значение. В то время как положительная энергия материи растет, его компенсирует растущая отрицательная гравитационная энергия. Полная энергия остается постоянной, как и требует закон сохранения.

Чтобы обеспечить период инфляции завершением, Гут ввел условие, что гравитационно отталкивающаяся материя должна быть нестабильной. При распаде ее энергия порождает горячий огненный шар элементарных частиц. Он продолжает по инерции расширяться, но теперь уже состоит из обычной материи, его гравитация становится притягивающей, и расширение постепенно замедляется. Момент распада антигравитационной материи отмечает конец инфляции и в данной теории играет роль Большого взрыва.

Красота этой идеи заключалась в том, что одним махом инфляция объясняла, почему Вселенная столь велика, почему она расширяется и почему вначале она была такой горячей. Необъятная расширяющаяся Вселенная появилась практически из ничего. Все, что было нужно, — это микроскопический кусочек гравитационно отталкивающего материала. Гут честно признавал, что не знает, откуда взялся этот кусочек, но отрицать его достижения было трудно. “Часто говорят, что нельзя получить нечто из ничего, — говорил он, — но в конечном счете Вселенная могла достаться нам даром”.

Все это предполагает, что гравитационно отталкивающая материя действительно существует. В ней не было недостатка у авторов научно-фантастических романов, которые применяли ее во всевозможных летательных аппаратах — от боевых машин до антигравитационных ботинок. Но могут ли профессиональные физики всерьез рассматривать возможность отталкивающей силы гравитации? Могут, конечно. И первым сделал это не кто иной, как Альберт Эйнштейн.

ГЛАВА 2

Взлет и падение отталкивающей гравитации

“Мы оседлали гравитацию!” —
выпалил Профессор и повалился на пол.
Из НАУЧНО-ФАНАСТИЧЕСКОГО РОМАНА

ТКАНЬ ПРОСТРАНСТВА И ВРЕМЕНИ

Эйнштейн создал две поразительно красивые теории, которые навсегда изменили наши представления о пространстве, времени и гравитации. Первая из них, получившая название специальной теории относительности, была опубликована в 1905 году, когда Эйнштейну было 26 лет и по всем параметрам он мог считаться неудачником. Его крайняя независимость и неаккуратное посещение занятий не снискали ему симпатий профессуры Цюрихского Политехникума, где он получил свой диплом. Когда пришло время искать работу, все выпускники его группы были приняты в Политехникум ассистентами, а Эйнштейну не удалось получить никакой научной должности. Он был счастлив, заняв благодаря содействию бывшего одноклассника место клерка в патентном бюро. К плюсам этой ра-

боты надо отнести то, что она была небезынтересна и оставляла массу времени для исследований и других интеллектуальных занятий. Эйнштейн проводил вечера, обсуждая свои мысли о физике с друзьями, куря трубку или читая Спинозу и Платона. Он также играл струнные квинтеты в необычной компании из юриста, переплетчика, школьного учителя и тюремного охранника. Никто из них не подозревал, что их вторая скрипка знает нечто поразительное о природе пространства и времени.

Свою специальную теорию относительности Эйнштейн создал меньше чем за шесть недель чрезвычайно интенсивной работы. Из нее следовало, что интервалы пространства и времени сами по себе не имеют абсолютного смысла, но зависят от состояния движения наблюдателя, который их измеряет. Если два наблюдателя движутся друг относительно друга, каждый из них обнаружит, что часы второго тикают медленнее, чем его собственные. Одновременность тоже относительна. События, которые одновременны для одного наблюдателя, для другого могут происходить в разное время. В повседневной жизни мы не замечаем таких эффектов, поскольку при обычных скоростях они совершенно ничтожны. Но если относительное движение наблюдателей происходит с околосветовой скоростью, результаты их измерений могут очень сильно различаться. Но все же существует одна вещь, по поводу которой все наблюдатели сойдутся между собой: свет всегда распространяется с одной и той же скоростью — примерно 300 000 километров в секунду.

Скорость света — это абсолютный предел скорости во Вселенной. Когда вы прикладываете силу к физическому объекту, он ускоряется. Его скорость растет, и если вы будете продолжать прикладывать силу, он в конце концов подойдет к скорости света. Эйнштейн показал, что по мере приближения к ней для ускорения требовалось бы все больше и больше энергии, так что предела достичь невозможно.

Пожалуй, наиболее известное следствие специальной теории относительности выражено формулой Эйнштейна $E = mc^2$. Если нагреть предмет, его тепловая энергия возрастет, а значит, его вес тоже должен увеличиться. Это может навести на мысль, что перед взвешиванием лучше принять холодный душ. Но такая хитрость, скорее всего, уменьшит наш вес не больше чем на несколько миллионных долей грамма. Если пользоваться привычными единицами измерения, такими как метры и секунды, коэффициент c^2 для перевода энергии в массу оказывается очень большим, и, чтобы существенно изменить массу макроскопического тела, требуется громадное количество энергии. Физики часто пользуются другой системой единиц, в которой $c = 1$, так что энергия просто равна массе и может измеряться в килограммах¹. Как правило, я буду следовать этой традиции, не делая различий между энергией и массой.

Слово “специальная” в названии теории относительности указывает на то, что она применима только к особым условиям, когда влияние гравитации незначительно. Это ограничение сняла вторая теория Эйнштейна — общая теория относительности, которая по сути является теорией гравитации.



Общая теория относительности выросла из простого наблюдения: движение тел под действием гравитации не зависит от их массы, формы и любых других свойств при условии, что всеми силами, кроме тяготения, можно пренебречь. Это было обнаружено еще Галилеем, который убедительно обосновал этот тезис в своих знаменитых “Диалогах”. В то время вслед за Аристотелем принято было считать, что более тяжелые тела па-

¹ К примеру, время можно измерять в годах, а расстояние — в световых годах. (Световой год — это расстояние, проходимое светом за год.) Тогда скорость света $c = 1$.

дают быстрее. Действительно, арбуз падает быстрее перышка, но Галилей понял, что различие возникает только из-за сопротивления воздуха. По легенде, он сбрасывал камни разного веса с наклонной Пизанской башни, желая удостовериться, что они достигнут земли одновременно. Однако в действительности он экспериментировал с мраморными шарами, скатывая их по наклонной плоскости, и обнаружил, что движение не зависит от массы. Он также предложил теоретическое доказательство того, что Аристотель не может быть прав. Предположим, говорит Галилей, что тяжелый камень падает быстрее, чем легкий. Представьте теперь, что они соединены друг с другом очень легкой струной. Как это повлияет на падение тяжелого камня? С одной стороны, отстающий легкий камень должен заставить более тяжелый падать несколько медленнее, чем прежде. С другой стороны, два камня, рассматриваемые вместе, массивнее тяжелого камня, а значит, должны падать быстрее. Это противоречие показывает, что аристотелевская теория непоследовательна.

Эйнштейн много размышлял над этим странным видом движения, полностью независимым от самого движущегося объекта. Оно напоминало ему движение по инерции: в отсутствие действующих на него сил тело движется по прямой с постоянной скоростью независимо от того, из чего оно сделано. В сущности, движение тела в пространстве и времени — это свойство самих пространства и времени.

И тут оказались очень полезны идеи профессора Германа Минковского, чьи лекции по математике Эйнштейн не слишком ценил в годы учебы. Сам Минковский считал Эйнштейна лентяем и не ждал от него чего-то стоящего. К чести Минковского следует отметить, что он быстро изменил свое мнение после знакомства со статьей Эйнштейна 1905 года.

Минковский понял, что математические выкладки специальной теории относительности становятся проще и красивее,

если рассматривать пространство и время не отдельно, а как единую сущность, называемую *пространством-временем*. Точки в пространстве-времени — это *события*. Поэтому оно имеет четыре измерения. Имея перед собой пространство-время целиком, вы знали бы все о прошлом, настоящем и будущем Вселенной. История каждой частицы представляется линией в пространстве-времени, которая указывает положение частицы в каждый момент времени. Это так называемая *мировая линия* частицы. (Георгий Гамов, один из создателей космологии Большого взрыва, назвал автобиографию “Моя мировая линия”.)

Равномерное движение частиц в отсутствие гравитации представляется прямыми линиями в пространстве-времени. Но гравитация заставляет частицы отклоняться от этих простых траекторий, так что мировые линии перестают быть прямыми. Это привело Эйнштейна к поистине удивительной гипотезе, что даже отклоняющиеся частицы с искривленными мировыми линиями могут по-прежнему следовать самому прямому возможному пути в пространстве-времени, но само оно должно быть искривлено вблизи массивных тел. Тогда гравитация — не что иное, как кривизна пространства-времени!

Искажение геометрии пространства-времени массивным телом можно проиллюстрировать на примере тяжелого пред-

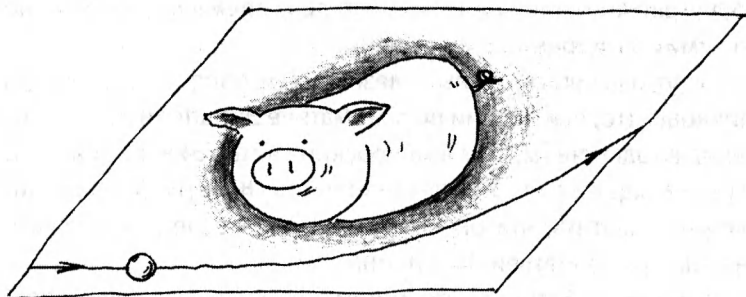


Рис. 2.1. Массивное тело вызывает искривление пространства.

мета, лежащего на горизонтально натянутом резиновом листе (рис. 2.1). Поверхность резины искривляется вблизи предмета подобно тому, как пространство-время искривляется вокруг гравитирующего тела. Если вы попытаетесь сыграть в бильярд на этом резиновом листе, то обнаружите, что шары отклоняются на искривленной поверхности, особенно когда проходят вблизи больших масс. Эта аналогия не идеальна: она иллюстрирует только искривление пространства, а не пространства-времени, но позволяет уловить суть идеи.

Больше трех лет поистине героических усилий потребовалось Эйнштейну, чтобы облечь эти идеи в математическую форму. Уравнения новой теории, которую он назвал общей теорией относительности, связывают геометрию пространства-времени и материальное наполнение Вселенной. В случае медленных движений и не очень сильных гравитационных полей эта теория повторяла закон тяготения Ньютона, согласно которому тяготение обратно пропорционально квадрату расстояния. Была также небольшая поправка к этому закону, совершенно ничтожная для движения всех планет, кроме самого близкого к Солнцу Меркурия. Эта поправка вызывала медленную прецессию, то есть смещение его орбиты. Астрономические наблюдения действительно показывали едва заметную прецессию, которая в ньютоновской теории оставалась необъясненной, но находилась в идеальном согласии с вычислениями Эйнштейна. Именно это дало ему уверенность в том, что теория верна. “Я несколько дней был вне себя от восторга”, — писал он своему другу Паулю Эренфестуⁱⁱ.

Возможно, самая замечательная черта общей теории относительности — то, как мало она требует экспериментальных предпосылок. Ключевой факт, который Эйнштейн положил в основу своей теории, — то, что движение тел под действием гравитации не зависит от их массы, — был известен уже Галилею. На этой скромной основе он построил теорию, которая

мета, лежащего на горизонтально натянутом резиновом листе (рис. 2.1). Поверхность резины искривляется вблизи предмета подобно тому, как пространство-время искривляется вокруг гравитирующего тела. Если вы попытаетесь сыграть в бильярд на этом резиновом листе, то обнаружите, что шары отклоняются на искривленной поверхности, особенно когда проходят вблизи больших масс. Эта аналогия не идеальна: она иллюстрирует только искривление пространства, а не пространства-времени, но позволяет уловить суть идеи.

Больше трех лет поистине героических усилий потребовалось Эйнштейну, чтобы облечь эти идеи в математическую форму. Уравнения новой теории, которую он назвал общей теорией относительности, связывают геометрию пространства-времени и материальное наполнение Вселенной. В случае медленных движений и не очень сильных гравитационных полей эта теория повторяла закон тяготения Ньютона, согласно которому тяготение обратно пропорционально квадрату расстояния. Была также небольшая поправка к этому закону, совершенно ничтожная для движения всех планет, кроме самого близкого к Солнцу Меркурия. Эта поправка вызывала медленную прецессию, то есть смещение его орбиты. Астрономические наблюдения действительно показывали едва заметную прецессию, которая в ньютоновской теории оставалась необъясненной, но находилась в идеальном согласии с вычислениями Эйнштейна. Именно это дало ему уверенность в том, что теория верна. “Я несколько дней был вне себя от восторга”, — писал он своему другу Паулю Эренфестуⁱⁱ.

Возможно, самая замечательная черта общей теории относительности — то, как мало она требует экспериментальных предпосылок. Ключевой факт, который Эйнштейн положил в основу своей теории, — то, что движение тел под действием гравитации не зависит от их массы, — был известен уже Галилею. На этой скромной основе он построил теорию, которая

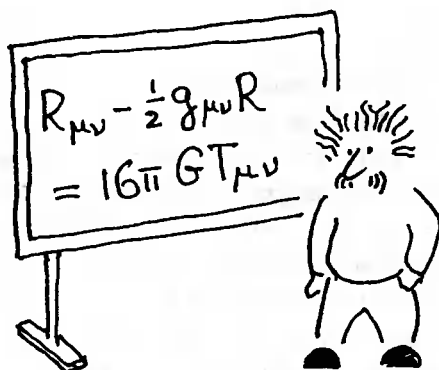


Рис. 2.2. Уравнения Эйнштейна.

в соответствующем предельном случае воспроизводила закон всемирного тяготения Ньютона и объясняла отклонение от этого закона. Если задуматься, закон Ньютона в известном смысле произволен. Он постулирует, что сила притяжения двух тел обратно пропорциональна второй степени расстояния между ними, но не говорит почему. С равным успехом там могла быть степень 4 или 2,03. В противоположность этому общая теория относительности не оставляет свободы выбора. Представление гравитации как кривизны пространства-времени с неизбежностью ведет к уравнениям Эйнштейна, а из них вытекает закон обратных квадратов. В этом смысле теория относительности не описывает, а *объясняет* гравитацию. Логика теории была столь убедительна, а ее математическая структура столь красива, что Эйнштейн чувствовал: она просто обязана быть верной. Обращаясь к своему старшему коллеге Арнольду Зоммерфельду, он писал: “Вы будете убеждены в правильности общей теории относительности, как только изучите ее. Так что я не собираюсь защищать ее ни единым словом”ⁱⁱⁱ.

ТЯГОТЕНИЕ ПУСТОГО ПРОСТРАНСТВА

Когда общая теория гравитации была готова, Эйнштейн немедленно применил ее ко всей Вселенной. Его не интересовали тривиальные подробности вроде положения конкретных звезд или планет. Вместо этого он стремился найти решение своих уравнений, которое в общих чертах описало бы строение всей Вселенной как единого целого.

В то время о распределении вещества во Вселенной мало что было известно, поэтому Эйнштейну пришлось делать определенные допущения. Он выдвинул простейшее предположение о том, что материя распределена в космосе в среднем однородно. При этом, конечно, существуют локальные отклонения от однородности, где концентрация звезд немного выше или ниже средней. Но в достаточно больших масштабах, согласно предположению Эйнштейна, Вселенная с хорошей точностью может считаться совершенно однородной. Это подразумевает, что наше положение в космосе ни в малейшей степени не является выделенным: все места во Вселенной более или менее одинаковы. Эйнштейн также предположил, что Вселенная в среднем изотропна, то есть из любой точки она выглядит примерно одинаково во всех направлениях.

И наконец, Эйнштейн предположил, что в среднем свойства Вселенной не меняются во времени. Иными словами, Вселенная статична. Хотя у Эйнштейна было мало наблюдательных подтверждений этого тезиса, картина вечной неизменной Вселенной выглядела очень привлекательно.

Охарактеризовав искомую модель Вселенной, Эйнштейн мог теперь попытаться найти решение своих уравнений, которое описывало бы мир с желаемыми характеристиками. Однако ему не потребовалось много времени для того, чтобы выяснить: теория не допускает подобных решений. Причина была очень проста: массы, распределенные по Вселенной, отказы-

вались оставаться в покое, а вместо этого “хотели” упасть одна на другую под действием своего гравитационного притяжения.

Это обстоятельство сильно озадачивало и сбивало с толку Эйнштейна. После года упорной работы он решил, что уравнения общей теории относительности следует модифицировать так, чтобы они допускали существование статического мира.

Эйнштейн знал, что, не нарушая физических принципов теории, в его уравнения можно включить дополнительный член. Эффект этого нового члена состоит в наделении пустого пространства, то есть вакуума, ненулевой энергией натяжения. Каждый кубический сантиметр пустого пространства получает фиксированное количество энергии (а значит, и массу). Эйнштейн назвал эту постоянную плотность энергии вакуума *космологической постоянной*¹.

Математическая структура уравнений Эйнштейна диктует, что натяжение вакуума в точности равно его плотности энергии и потому определяется той же постоянной. Натяжение вакуума аналогично растяжению резиновой ленты, которая сжимается, если ее отпустить. Натяжение противоположно давлению, которое заставляет предметы расширяться подобно тому, как шарик раздувается под давлением сжатого воздуха. То есть натяжение действует как отрицательное давление.

Если вакуум обладает энергией и натяжением, то как получается, что они не оказывают никакого влияния на нас? Почему мы не видим, что пустое пространство сжимается из-за собственного натяжения? Все дело в том, что не так-то просто заметить *постоянную* энергию или натяжение. Если увеличить давление в воздушном шарике, он раздуется. Но если на такую же величину увеличить давление воздуха вокруг него, то никакого эффекта не будет. Энергия вакуума неуловима, поскольку

1 Фактически Эйнштейн не дал никакого физического объяснения новому члену. Его современная интерпретация как энергии вакуума и давления была предложена позднее бельгийским физиком Жоржем Леметром.

ее невозможно извлечь. Нельзя сжечь вакуум, нельзя использовать его для работы автомобиля или фена: его энергия задана космологической постоянной и не может уменьшаться. Выходит, что энергия и натяжение вакуума необнаружимы — за исключением их гравитационного воздействия.

Как оказалось, гравитация вакуума скрывала большой сюрприз. Согласно общей теории относительности, давление и натяжение дают вклад в силу тяготения массивных тел. Если вы сжимаете предмет, его тяготение усиливается, если растягиваете — ослабевает. Обычно этот эффект очень мал, но если удастся растягивать предмет, не разрушая его, то в принципе можно ослабить его тяготение вплоть до полной нейтрализации или даже отталкивания. Именно это имеет место в случае вакуума. Отталкивающая гравитация натяжения вакуума значительно превосходит гравитационное притяжение его же массы, что в целом приводит к отталкиванию.

Это в точности то самое, что требовалось Эйнштейну для разрешения его проблемы. Он мог подобрать значение космологической постоянной так, чтобы притягивающая гравитация материи находилась в равновесии с отталкивающей гравитацией вакуума, давая в итоге статическую вселенную. Из своих уравнений он вывел, что баланс достигается, когда космологическая постоянная равна половине плотности энергии вещества.

Поразительным следствием модифицированных уравнений было то, что пространство статической вселенной должно быть искривленным и замыкаться само на себя подобно поверхности сферы. Космический корабль, движущийся прямо вперед в такой замкнутой вселенной, в конце концов вернулся бы в исходную точку. Это замкнутое пространство называется трехмерной сферой. Ее объем конечен, хотя у нее нет границы.

Эйнштейн описал свою замкнутую модель Вселенной в статье, опубликованной в 1917 году. Он признавал, что у него нет

наблюдательных подтверждений ненулевого значения космологической постоянной. Единственной целью ее введения было спасение статической картины мира. Более десяти лет спустя, когда расширение Вселенной было уже открыто, Эйнштейн сожалел, что вообще выдвинул эту идею, и называл ее величайшей ошибкой в своей жизни^{iv}. После этого неудачного дебюта отталкивающая гравитация почти на полвека исчезает из мейнстрима физических исследований, но лишь для того, чтобы позднее вернуться с новыми силами.

ГЛАВА 3

Творение и его недостатки

Как ученый я просто не верю,
что Вселенная началась со взрыва.
СЭР АРТУР ЭДДИНГТОН

ВСЕЛЕННЫЕ ФРИДМАНА

В начале 1920-х годов вряд ли кто-то мог предположить, что замерзающий и голодный Петроград станет одним из тех мест, где случится очередной прорыв в космологии. Занятия в Петроградском университете едва возобновились после шестилетнего перерыва, вызванного войной и революцией. В холодной аудитории молодой профессор в очках читал лекции группе студентов, закутанных в шинели и меховые шапки. Профессора звали Александр Фридман. Лекции его были подготовлены тщательнейшим образом и подчеркнута строги в математическом плане. В своем курсе Фридман затрагивал широкий круг тем: от математики и метеорологии — основных областей его специализации — до по-

следнего увлечения молодого ученого — общей теории относительности.

Он восхищался теорией Эйнштейна и погрузился в ее изучение со свойственным ему энтузиазмом. “Я неуч, — часто говорил он. — Я ничего не знаю. Я буду еще меньше спать и не позволю себе никаких отвлечений, поскольку вся эта так называемая жизнь — лишь бесполезная растрата времени”¹. Он словно бы знал, что у него в запасе всего несколько лет, а сделать предстоит еще много.

В совершенстве освоив математику общей теории относительности, Фридман сконцентрировался на проблеме, которую считал центральной, — строении Вселенной в целом. Из статей Эйнштейна он знал, что без космологической постоянной теория не имеет статических решений, но хотел выяснить, какие варианты решений все же возможны. И тут был совершен радикальный шаг, обессмертивший его имя. Вслед за Эйнштейном Фридман предположил, что Вселенная однородна, изотропна и замкнута, то есть имеет геометрию трехмерной сферы. Но он отбросил статическую парадигму и позволил Вселенной двигаться. Радиус сферы и плотность вещества могли теперь изменяться во времени. Отказавшись от требования статичности, Фридман обнаружил, что уравнения Эйнштейна имеют решение. Они описывают сферическую вселенную, которая начинается с точки, расширяется до некоторого максимального размера, а потом вновь сжимается в точку. В начальный момент, который мы теперь называем Большим взрывом, все вещество Вселенной упаковано в единственную точку, в которой плотность вещества бесконечна. Она убывает, пока Вселенная расширяется, и растет, пока та сжимается обратно, чтобы опять стать бесконечной в момент “большого схлопывания”, когда Вселенная вновь становится точкой.

Большой взрыв и “большое схлопывание” отмечают начало и конец Вселенной. Из-за исчезающе малого размера и бес-

Время →

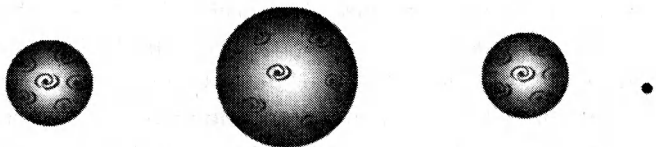


Рис. 3.1. Расширяющаяся и вновь сжимающаяся Вселенная.

конечной плотности материи математические величины, фигурирующие в уравнениях Эйнштейна, становятся неопределенными, а пространство-время не может продолжаться за этими точками. Такие точки называют *сингулярностями пространства-времени*.

Двумерную сферическую вселенную можно представлять расширяющимся и сжимающимся воздушным шаром (рис. 3.1). Закорючки на его поверхности изображают галактики, и по мере расширения шара расстояния между ними будут расти. Таким образом, наблюдатель в любой галактике видит, что остальные галактики разбегаются. Расширение постепенно замедляется гравитацией и в конце концов останавливается, сменяясь сжатием. На фазе сжатия расстояния между галактиками будут убывать, и все наблюдатели увидят, что галактики приближаются к ним.

Не имеет большого смысла спрашивать, куда расширяется Вселенная. Мы изображаем вселенную воздушного шара расширяющейся в окружающее пространство, но это не имеет никакого значения для ее обитателей. Они привязаны к поверхности шара и не представляют себе третьего, радиального измерения. Подобным образом для наблюдателя в замкнутой вселенной трехмерное сферическое пространство — это все существующее пространство, и вне его ничего нет.

Вскоре после публикации этих результатов Фридман открыл другой класс решений с иной геометрией. Вместо искривления “на себя” пространство в этих решениях в определенном смысле искривляется “от себя”, что приводит к бесконечным (открытым) вселенным. Двумерным аналогом этого типа пространства является поверхность седла (рис. 3.2).

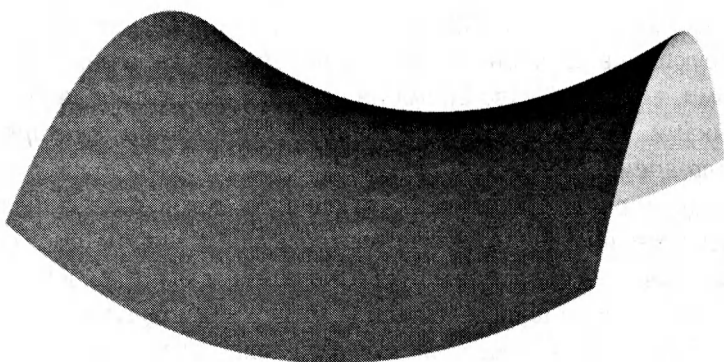


Рис. 3.2. Двумерный аналог открытой вселенной.

И вновь Фридман обнаруживает, что расстояние, разделяющее любую пару галактик в открытой вселенной, растёт, начиная с нулевого значения в сингулярности. Сначала расширение замедляется, но в данном случае гравитация недостаточно сильна, чтобы обратить его вспять, и со временем галактики приближаются к постоянной скорости удаления.

На границе между открытыми и закрытыми моделями находится вселенная с плоской, евклидовой геометриейⁱⁱ. Она хоть и расширяется без ограничений, но делает это как будто на пределе, так что скорость расширения становится со временем все меньше и меньше.

Замечательная особенность решений Фридмана состоит в том, что они устанавливают простую связь между геометрией Вселенной и ее конечной судьбой. Если Вселенная замкнутая, она должна вновь сколлапсировать, а если открытая или плоская, то будет расширяться вечно¹. В своих статьях Фридман не отдавал предпочтения ни одной из моделей.

К сожалению, Фридман не увидел, как его работа стала основанием современной космологии. Он умер от брюшного тифа в 1925 году в возрасте 37 лет. И хотя его статьи были опубликованы в ведущем немецком физическом журнале, на них почти не обратили вниманияⁱⁱⁱ. Они были извлечены из небытия лишь в 1930-х годах, вслед за открытием Хабблом расширения Вселенной².

МОМЕНТ ТВОРЕНИЯ

Что бы ни говорили решения Фридмана о будущем Вселенной, самая неожиданная и интригующая их особенность — наличие начальной сингулярности, Большого взрыва, где перестает работать математика общей теории относительности. В сингулярности вещество сжимается до бесконечной плотности, и становится невозможно распространить решение на более ранние моменты времени. Таким образом, если воспринимать все буквально, Большой взрыв должен рассматриваться как начало Вселенной. Было ли это сотворением мира? Возможно ли, чтобы целая Вселенная началась с единственного события, случившегося конечное время назад?

¹ Простая связь между геометрией и судьбой Вселенной сохраняется, только если считать нулевой плотность энергии вакуума (космологическую постоянную). Подробнее об этом в главе 18.

² Модель расширяющейся Вселенной была переоткрыта в 1927 году Жоржем Леметром. Как и работа Фридмана, статья Леметра оставалась совершенно неизвестной вплоть до открытия Хаббла.

Для большинства физиков это было чересчур. Такой одномоментный старт Вселенной выглядел как божественное вмешательство, которому, по их мнению, не должно быть места в физической теории. Но хотя для многих ученых “начало мира” было — и в большой мере остается — источником дискомфорта, оно дает и некоторые преимущества. Оно помогает избавиться от возмутительных парадоксов, которыми полна картина статической, вечной и неизменной Вселенной.

Для начала, вечность Вселенной, по-видимому, противоречит одному из самых фундаментальных законов природы — второму началу термодинамики. Этот закон гласит, что физические системы эволюционируют от более упорядоченных состояний к менее упорядоченным. Если тщательно разложить бумаги по стопкам на столе, и в окно неожиданно дунет порыв ветра, листы будут беспорядочно разбросаны по полу. Но вы никогда не увидите, чтобы ветер поднял бумаги с пола и сложил их аккуратными стопками на столе. Такое спонтанное уменьшение беспорядка не является принципиально невозможным, но оно настолько маловероятно, что увидеть подобное никогда не удастся.

Математически степень беспорядка характеризуется величиной, называемой *энтропией*, а второе начало термодинамики говорит, что энтропия изолированной системы может только возрастать. Неуклонное возрастание беспорядка ведет в конце концов к состоянию максимально возможной энтропии, которое называется *тепловым равновесием*. В этом состоянии вся энергия упорядоченного движения превращается в тепло, и по всей системе устанавливается одинаковая температура.

На космические следствия второго начала термодинамики впервые указал немецкий физик Герман фон Гельмгольц в середине XIX века. Он отметил, что вся Вселенная может рассматриваться как изолированная система (поскольку по отноше-

нию к Вселенной не существует ничего внешнего). А раз так, то к Вселенной как к целому применимо второе начало термодинамики, и она должна неотвратно приближаться к “тепловой смерти” — состоянию термодинамического равновесия. В этом состоянии звезды умрут и будут иметь одинаковую температуру с окружающей средой, а все движения, кроме беспорядочной тепловой толкотни молекул, остановятся.

Еще одно следствие второго начала термодинамики состоит в том, что если Вселенная вечна, то она должна была уже достичь термодинамического равновесия. И раз мы не находимся в состоянии максимальной энтропии, значит, Вселенная не могла существовать всегда^{iv}.

Гельмгольц не акцентировал этот второй вывод, а больше говорил о той части, которая касалась “смерти” (надо сказать, что такие настроения во многом поддерживались апокалиптической прозой конца XIX — начала XX века). Однако другие физики, в том числе такие титаны, как Людвиг Больцман¹, хорошо понимали эту проблему. Больцман видел выход в статистической природе второго начала. Даже если Вселенная действительно находится в состоянии максимального беспорядка, он может неожиданно чисто случайно уменьшиться. Такие события, называемые тепловыми флуктуациями, достаточно обычны в масштабе нескольких сотен молекул, но становятся все более невероятными по мере увеличения масштабов. Больцман предположил, что все наблюдаемое вокруг нас — это гигантская тепловая флуктуация в совершенно беспорядочной Вселенной. Вероятность возникновения такой флуктуации невыразимо мала. Однако даже невероятные вещи иногда случаются, если ждать достаточно долго, и они обязательно произойдут, если у вас в распоряжении бесконечное количе-

¹ Больцман установил связь между энтропией и беспорядком, прояснив тем самым смысл второго начала термодинамики.

ство времени. Жизнь и наблюдатели могут существовать только в упорядоченных частях Вселенной, и это объясняет, почему нам повезло наблюдать столь неправдоподобно редкое событие^у.

Трудность больцмановского решения состоит в том, что упорядоченная часть Вселенной выглядит чрезмерно большой. Для существования наблюдателя хватило бы превращения хаоса в порядок на масштабах, близких к размерам Солнечной системы. Это было бы намного более вероятно, чем флуктуация размером в миллиарды световых лет, необходимая для существования наблюдаемой нами Вселенной.

Другая проблема, имеющая более длинную предысторию, возникает, если предположить, что Вселенная бесконечна, а звезды более или менее однородно распределены по всему ее пространству. В этом случае, в каком бы направлении мы ни взглянули на небо, луч зрения в конце концов неизбежно должен упираться в звезду. А значит, все небо должно постоянно и ослепительно светиться. Встает простой вопрос: почему ночью темно? Иоганн Кеплер в 1610 году первым обратил внимание на эту проблему и пришел к заключению, что Вселенная не может быть бесконечной.

Как проблема энтропии, так и парадокс ночного неба естественным образом разрешаются, если возраст Вселенной конечен. Если она возникла лишь определенное время назад и изначально пребывала в высокоупорядоченном состоянии (с низкой энтропией), тогда сегодня мы наблюдаем деградацию от этого состояния к хаосу и не должны удивляться, что состояние максимальной энтропии еще не достигнуто. Парадокс ночного неба разрешается, поскольку во Вселенной конечного возраста свету очень далеких звезд еще не хватило времени, чтобы дойти до нас. Мы можем наблюдать лишь звезды, находящиеся в пределах радиуса *горизонта*, равного расстоянию, пройденному светом за время, равное возрасту Все-

ленной. Ясно, что число звезд в пределах этого радиуса конечно, даже если вся Вселенная бесконечна.

После таких аргументов как может хоть кто-то верить, что Вселенная существовала вечно? Но дело, конечно, в том, что идея возникновения космоса конечное время назад тоже порождает проблемы, способные поставить в тупик. Если Вселенная появилась в некоторый момент в прошлом, то чем определялись начальные условия Большого взрыва? Почему Вселенная началась с однородного и изотропного состояния? Ведь она могла возникнуть в любом другом. Должны ли мы приписать этот выбор Творцу? Неудивительно, что физики не торопились бросаться в объятия космологии Большого взрыва и предприняли множество попыток увильнуть от разрешения “проблемы начала”.

ПРИНИМАЯ НЕИЗБЕЖНОЕ

Поначалу некоторые специалисты считали сингулярность Большого взрыва чисто формальным следствием предположений о строгой однородности и изотропности, которые Фридман использовал для решения уравнений Эйнштейна. Если в коллапсирующей Вселенной все галактики приближаются к нам по радиальным траекториям, то неудивительно, что они столкнутся в одном большом схлопывании. Но если движение галактик будет хоть немного отличаться от радиального, можно предположить, что они пронесутся друг мимо друга и начнут снова разлетаться. В таком случае сингулярности удастся избежать, а вслед за сжатием последует новое расширение. Была надежда, что таким способом удастся построить осциллирующую модель Вселенной без начала с чередующимися периодами расширения и сжатия.

Оказалось, однако, что притягивающая природа гравитации делает такой сценарий невозможным. Британские физики

Роджер Пенроуз и Стивен Хокинг, тогда еще аспиранты, доказали серию теорем, показывающих, что в очень широком диапазоне условий космологической сингулярности избежать нельзя. Основные предположения, использованные в этих доказательствах, состоят в том, что общая теория относительности Эйнштейна верна и что материя во всей Вселенной обладает положительными плотностью энергии и давлением. (Более строго: давление не должно столь существенно уходить в отрицательные значения, чтобы гравитация становилась отталкивающей.) Таким образом, пока мы держимся в рамках общей теории относительности и не предполагаем существования экзотической гравитационно отталкивающей материи, сингулярность будет при нас, а вопрос о начальных условиях останется неразрешенным.

Самой известной попыткой избежать этой проблемы была, без сомнений, теория стационарного состояния, выдвинутая в 1948 году в Кембриджском университете британским астрофизиком Фредом Хойлом и двумя австрийскими эмигрантами Германом Бонди и Томасом Голдом. Они настаивали, что в своих общих чертах Вселенная всегда остается неизменной, так что во всех местах и во все времена она выглядит более или менее одинаково. Может показаться, что этот взгляд находится в резком противоречии с расширением Вселенной: если расстояния между галактиками растут, как Вселенная может оставаться неизменной? Чтобы компенсировать расширение, Хойл с друзьями постулировали, что вещество постоянно создается из вакуума. Это вещество заполняет пустоты, открывающиеся между удаляющимися галактиками, так что на их месте могут формироваться новые. Кембриджские физики признавали, что у них нет подтверждений спонтанного рождения материи, однако требуемый темп ее возникновения был столь низким — всего несколько атомов на кубический сантиметр в столетие, — что нет и наблюдений, свидетельствующих против него. Защи-

щая свою теорию, они ссылались на то, что непрерывное возникновение материи, по их мнению, было ничуть не более сомнительным, чем одномоментное рождение всей материи в Большом взрыве. Кстати, сам термин “Большой взрыв” был придуман именно Хойлом, когда он высмеивал конкурирующую теорию в популярном ток-шоу на радио “Би-Би-Си”.

Впрочем, и теория стационарного состояния вскоре столкнулась с серьезными трудностями. Самые далекие галактики видны такими, какими они были миллиарды лет назад, поскольку столько времени нужно свету, чтобы добраться до нас. Если верна теория стационарного состояния и Вселенная в то время была такой же, как сегодня, тогда далекие галактики должны быть более или менее похожи на те, что наблюдаются в наших окрестностях. Однако по мере накопления данных становится все более очевидно, что находящиеся вдалеке галактики в действительности совсем другие и показывают отчетливые признаки своей молодости. Они меньше, имеют неправильные формы и населены очень яркими короткоживущими звездами. Многие из них являются мощными источниками радиоволн, что гораздо реже встречается среди близких к нам галактик^{iv}. По-видимому, нет никакой возможности объяснить эти наблюдения в рамках теории стационарного состояния.

Шерлок Холмс любил говорить: “Отбросьте все невозможное; то, что останется, и будет ответом, каким бы невероятным он ни казался”^{vii}. По мере того как перспективы теории стационарного состояния становились все более туманными и за отсутствием в поле зрения других жизнеспособных альтернатив, представления стали меняться. Физики постепенно склонялись к картине эволюционирующей Вселенной, начавшейся со взрыва.

ГЛАВА 4

Современная история сотворения мира

Элементы были приготовлены быстрее,
чем готовится утка с жареной картошкой.

ГЕОРГИЙ ГАМОВ

ТУННЕЛИРОВАНИЕ СКВОЗЬ ЖЕЛЕЗНЫЙ ЗАНАВЕС

Идея первичного огненного шара родилась в голове Георгия Гамова, очень колоритного физика российского происхождения, с которым мы еще не раз встретимся на этих страницах. Его коллега Леон Розенфельд (Leon Rosenfeld) писал, что это был “славянский гигант с огненной шевелюрой, очень ярко говорящий по-немецки; в действительности он был ярок во всем, даже в своей физике”¹. Еще аспирантом Гамов прослушал фридмановский курс лекций по общей теории относительности в 1923—1924 годах в Петрограде, так что знал о расширяющейся вселенной, можно сказать, из первых рук. Он хотел вести исследования в области космологии под руководством Фридмана, однако неожиданная смерть последнего не позво-

лила этим планам реализоваться. В итоге Гамову пришлось писать диссертацию по динамике маятника — теме, которую он называл “в высшей степени унылой”ⁱⁱ.

В 1928 году с подачи своего прежнего профессора Ореста Хвольсона Гамов получил стипендию и провел лето в Германии, в Геттингенском университете. Это было время, когда полным ходом шла разработка квантовой механики, и Геттинген являлся одним из ведущих центров этих исследований. Физики пытались ухватить суть новой теории и внести вклад в ее стремительное развитие. Дискуссии, начинавшиеся днем в семинарских аудиториях, продолжались вечерами на улицах и в кафе, и было трудно не заразиться этой волнующей атмосферой открытия. Гамов решил исследовать, что может сказать квантовая механика о строении атомных ядер, и очень быстро получил первые результаты. Он использовал так называемый *туннельный* эффект — проникновение квантовой частицы через барьер — для объяснения радиоактивного распада ядер. Его теория прекрасно согласовывалась с экспериментальными данными.

Когда в конце лета пришло время возвращаться в Петроград (уже ставший Ленинградом), Гамов решил сделать остановку в Дании и посетить легендарного Нильса Бора, одного из основоположников квантовой теории. Рассказ о работе по радиоактивности (которая еще не была опубликована) произвел на Бора такое впечатление, что он предложил Гамову место научного сотрудника в своем институте в Копенгагене. Конечно, приглашение было с восторгом принято, и Гамов продолжил работу в области ядерной физики, став вскоре признанным авторитетом.

В 1930 году Гамова пригласили сделать большой доклад на конгрессе по атомному ядру в Риме. Он уже готовился пересечь Европу на своем маленьком мотоцикле, когда выяснил в советском посольстве, что его паспорт не подлежит продлению

и ему придется вернуться в Советский Союз, прежде чем ехать куда-либо еще. Прибыв в Ленинград, Гамов сразу понял, что дела плохи. Сталинский режим закручивал в стране гайки. Наука и искусство должны были соответствовать официальной марксистской идеологии, и всякий, кого обвиняли в “буржуазных” идеалистических взглядах, подвергался жестоким преследованиям. Квантовая механика и теория относительности Эйнштейна были объявлены ненаучными и противоречащими марксизму-ленинизму. Когда Гамов упомянул о квантовой физике на публичной лекции, сотрудник органов прервал его выступление и распустил аудиторию. Гамова предупредили, чтобы он не повторял таких ошибок. Еще до этого инцидента ему было велено забыть о зарубежных поездках и не утруждать себя обращениями за паспортом. Железный занавес плотно закрылся. Гамов понял со всей ясностью: он должен любой ценой вырваться из Советского Союза.

Вместе со своей женой Любой, которая вышла за него вскоре после возвращения в Ленинград, он готовился к побегу. План состоял в том, чтобы пересечь Черное море и добраться в Турцию из Крыма. Идея эта кажется ребяческой, но они намеревались проделать это на байдарке. У Гамовых был недельный запас провизии и простой навигационный план: грести прямо на юг. Однако Черное море не зря называют черным. Ранним утром, затемно, когда двое искателей приключений отправились в путь, оно было идеально спокойным, но к вечеру ветер усилился, и поднялась волна. Ночью им с колоссальным трудом удавалось удерживать лодку на плаву. Признав свое поражение, они теперь стремились просто добраться до берега, и когда на следующий день им это удалось, чувствовали себя счастливыми.

Когда летом 1933 года Гамову сообщили, что ему доверено представлять Советский Союз на престижном Сольвеевском конгрессе по ядерной физике в Брюсселе, это стало для учено-

го полной неожиданностью. Он был вне себя от восторга, но не понимал, как это получилось. Все объяснилось после прибытия на конгресс. Когда Гамов не появился в Риме, Нильс Бор беспокоился и стал разыскивать своего старого друга. Он попросил французского физика Поля Ланжевена, члена Французской коммунистической партии, использовать свои связи, чтобы организовать приезд Гамова на Сольвеевский конгресс. Однако Гамов был потрясен, когда узнал, что Бор лично поручился Ланжевену за Гамова, пообещав, что тот вернется в Советский Союз! В тот вечер за ужином Гамов оказался за столом рядом с Марией Кюри, знаменитой первооткрывательницей радия и плутония, и рассказал ей о невыносимой ситуации, в которую попал. Мадам Кюри близко знала Ланжевена (ходили слухи, что даже очень близко); она сказала, что поговорит с ним. После бессонной ночи и дня тревожного ожидания Гамов узнал от нее, что вопрос улажен и он может не возвращаться. На следующий год он получил пост профессора в университете Джорджа Вашингтона в Соединенных Штатах.

ПЕРВИЧНЫЙ ОГНЕННЫЙ ШАР

Гамов понимал, что ранняя Вселенная была не только сверхплотной, но также и очень горячей. Причина в том, что газы разогреваются, когда их сжимают, и охлаждаются при расширении. (Велосипедисты говорят, что им это хорошо известно: когда шины накачивают воздухом, они становятся теплыми.)

Чтобы понять, почему расширение вызывает остывание, рассмотрим газ, заключенный в большой ящик. Молекулы газа можно представить в виде маленьких шариков, которые отскакивают от стенок ящика. Вообразите теперь, что эти стенки раздвигаются. Как повлияет их удаление на молекулы? Если вы на тренировке бросите теннисный мяч в стену, он отлетит к вам

с той же скоростью. Но представьте на мгновение, что стена от вас удаляется. Скорость мяча относительно стены будет тогда меньше, и он отскочит назад медленней, чем вы его бросили. Аналогично и молекулы в расширяющемся ящике будут замедляться при каждом отскоке от стены. Температура пропорциональна средней энергии молекул, и, следовательно, в ходе этого процесса она будет убывать. Конечно, в расширяющейся Вселенной нет движущихся стен, но частицы отскакивают друг от друга, и это точно так же влияет на температуру. Увеличиваясь, Вселенная становится все холоднее и холоднее. А значит, чем дальше мы отступаем в прошлое, тем горячее она должна быть, если же продолжить экстраполяцию до самой сингулярности, Вселенная становится бесконечно горячей.

При температурах свыше нескольких сотен градусов Кельвина¹ связи, удерживающие атомы в молекулах, уже не способны противостоять теплу, и молекулы распадаются. Дальнейшее повышение температуры ведет к постепенному разрушению атомов. Сначала, около 3000 градусов Кельвина, электроны отрываются от атомных ядерⁱⁱⁱ, затем, примерно при миллиарде градусов, ядра распадаются на протоны и нейтроны (совместительно называемые нуклонами), и, наконец, с приближением к триллиону градусов нуклоны разбиваются на свои элементарные составляющие, называемые *кварками*.

Помимо частиц материи, из которых состоят атомы, первичный огненный шар содержал также огромное количество квантов излучения — фотонов. Фотоны — это пакеты электрической и магнитной энергии; из них состоит обычный видимый свет. Движущиеся заряженные частицы испускают и поглощают фотоны, поэтому довольно быстро устанавливается равновесие,

1 В шкале Кельвина, часто применяемой физиками, температуры измеряются в единицах стоградусной шкалы начиная от абсолютного нуля (–273 градуса Цельсия). Для очень высоких температур, о которых здесь идет речь, разница между шкалами Цельсия и Кельвина несущественна.

при котором фотоны поглощаются в том же темпе, что и излучаются. Чем выше температура, тем больше плотность энергии фотонов в равновесии. Кажется, что рецепт горячего космического супа выглядит очень просто: раздробите все на самые мелкие части, перемешайте и не скупясь приправьте фотонами. Однако есть в нем и кое-что еще.

Чем дальше мы продвигаемся назад во времени, тем энергичнее становятся частицы, тем теснее им и тем чаще они сталкиваются друг с другом. Чтобы понять состав огненного шара, надо знать, что случается при таких высокоэнергичных соударениях. Сталкивать элементарные частицы — любимое занятие ученых, специализирующихся на физике высоких энергий. Для этого строятся колоссальные агрегаты, называемые ускорителями, где частицы разгоняют до чудовищных энергий, позволяют им врезаться друг в друга и смотрят, что получится. Это гораздо увлекательнее, чем наблюдать за столкновением бильярдных шаров, поскольку частицы при столкновении часто меняют свой тип, как если бы красный и синий шары при столкновении превращались в желтый и зеленый. Количество частиц также подвержено изменениям: две исходные частицы могут породить фейерверк из десятков новых, разлетающихся из точки столкновения. Подобные события повсеместно происходили в первые мгновения после Большого взрыва.

В таких столкновениях нельзя точно предсказать, что должно случиться. Существует множество возможных исходов, и физики, используя квантовую теорию, вычисляют их вероятности. Но это все, что можно сделать: в квантовом мире нет места определенности. Диапазон возможного ограничивается лишь несколькими *законами сохранения*, которые строго соблюдаются. Например, законы сохранения энергии и электрического заряда требуют, чтобы полная энергия и суммарный заряд до и после столкновения были одинаковыми. Таким образом, любой процесс, не запрещенный законами сохранения, разре-

шен и будет происходить с ненулевой вероятностью. В ранней Вселенной частицы безостановочно сталкиваются друг с другом, и огненный шар наполняется всеми типами частиц, какие только могут быть созданы в этих столкновениях.

Для каждого типа частиц есть античастицы с такой же массой и противоположным электрическим зарядом. Частицы и античастицы часто рождаются парами. Например, два фотона с энергиями больше той, что соответствует массе электрона (по формуле $E = mc^2$), могут столкнуться и превратиться в электрон и его античастицу, называемую позитроном. Обратный процесс называется аннигиляцией пары: электрон и позитрон сталкиваются и превращаются в два фотона.

При температурах свыше 10 миллиардов градусов энергии частиц становятся достаточными для порождения электрон-позитронных пар. Как результат, огненный шар наполняется газом из электронов и позитронов, плотность которого примерно равна плотности фотонного газа. При еще более высоких температурах появляются все более тяжелые частицы. Физики занесли в свои реестры целый зоопарк различных частиц с массами, распределенными в весьма широком диапазоне. На верхнем конце этого диапазона располагаются W- и Z-частицы, которые в 300 000 раз массивнее электрона, и *топ-кварк*, у которого масса еще вдвое больше. Это самые тяжелые частицы, полученные к сегодняшнему дню на ускорителях. Они существуют в огненном шаре при температурах выше 3000 триллионов градусов. По мере приближения к этим температурам наши знания о частицах становятся все более приблизительными, а представления об устройстве первичного огненного шара — все менее и менее надежными.

Уравнения Фридмана можно использовать для определения температуры и плотности огненного шара в любой момент времени. Например, спустя одну секунду после Большо-

го взрыва температура составляет 10 миллиардов градусов, а плотность — около 1 тонны на кубический сантиметр. Чтобы не повторять каждый раз слова “после Большого взрыва”, я буду использовать сокращение ПБВ. Самая насыщенная событиями часть истории огненного шара, для которой характерна быстрая смена поколений экзотических частиц, приходится как раз на первую секунду его существования. W-, Z- и более тяжелые частицы широко распространены только в первую 0,0000000001 секунды ПБВ. Мюоны — частицы, похожие на электроны, но в 200 раз более тяжелые, — аннигилируют со своими античастицами около 0,0001 секунды. Примерно в то же время триплеты кварков соединяются вместе, образуя нуклоны. Последними аннигилируют электрон-позитронные пары. Они исчезают около 1 секунды ПБВ. Чтобы в наше время осталось некоторое количество электронов и нуклонов, в тот период должен иметь место небольшой избыток кварков по сравнению с антикварками и электронов по сравнению с позитронами^{iv}. По истечении первой секунды в составе космического супа остаются нуклоны, электроны и фотоны¹.

АЛХИМИЯ ГАМОВА

Частицы вроде кварков W и Z не были известны во времена Гамова, он не слышал даже об электрон-позитронных парах. Больше всего его интересовала история космоса после 1 секунды ПБВ. Еще в начале своей карьеры Гамов увлекся проблемой происхождения атомов. В природе обнаруживается 92 различных типа атомов, или химических элементов. Некоторые из них, такие как водород или гелий,

¹ Присутствуют также очень легкие слабо взаимодействующие частицы — нейтрино. Я их здесь не рассматриваю, поскольку они не важны для нашей истории.

распространены очень широко, тогда как другие, например золото или уран, встречаются крайне редко. Гамов хотел понять причину этого: чем определяется распространенность элементов?

Алхимики пытались получить золото из более распространенных элементов, но, как мы теперь знаем, есть весьма серьезные причины, не позволившие им достичь успеха. Чтобы превратить один элемент в другой, надо научиться изменять состав атомных ядер. Однако энергии частиц, необходимые для ядерных трансформаций, в миллионы раз больше тех, что связаны с химическими реакциями, и выходят далеко за пределы того, что было доступно алхимикам. Такие энергии достигаются в водородной бомбе, но ни в каких естественных процессах на Земле они не встречаются. Поэтому наблюдаемая нами сегодня распространенность элементов в точности такова, как и 4,6 миллиарда лет назад, в эпоху формирования Солнечной системы¹.

Вопрос о происхождении элементов естественным образом наводит на мысль о недрах звезд. Эти гигантские раскаленные газовые шары скрепляются силами гравитации. Наше Солнце состоит в основном из водорода — простейшего элемента, ядра которого представляют собой одиночные протоны. Температура в центральных областях Солнца превышает 10 миллионов градусов — этого достаточно для протекания ядерных реакций. Цепочка реакций преобразует водород в гелий с выделением энергии, которая питает наше светило. Теория ядерных реакций, происходящих в недрах Солнца, была разработана в конце 1930-х годов Гансом Бете, физиком немецкого происхождения, который позднее получил за эту ра-

1 Важное исключение составляют радиоактивные элементы, подобные урану, которые самопроизвольно распадаются на более легкие. Атом урана превращается в свинец в среднем за 4,5 миллиарда лет, из-за чего количество урана постепенно уменьшается. В действительности наши лучшие оценки возраста Земли получены путем измерения относительных количеств урана и свинца.

боту Нобелевскую премию. Однако для объяснения распространённости элементов его теория мало что давала. Производство гелия в звездах обеспечивает лишь малую долю от его огромного количества, наблюдаемого во Вселенной. Другой загадкой было присутствие дейтерия (тяжелого водорода), у которого очень хрупкие ядра. Они быстро разрушаются в горячих звездных недрах, и было трудно понять, откуда они вообще могли взяться.

Гамов придерживался мнения, что звезды попросту недостаточно горячи, чтобы стать той кухней, в которой готовились элементы, — он считал, что придумал идею получше: подходящей печью он считал саму Вселенную вскоре после Большого взрыва. Для изучения ядерных процессов в горячей ранней Вселенной Гамов обратился за помощью к двум молодым физикам — Ральфу Альферу и Роберту Херману. Они рассмотрели горячую смесь нуклонов, электронов и излучения, однородно заполняющую Вселенную. Когда температура падает до 1 миллиарда градусов, протоны и нейтроны могут соединяться, образуя ядра дейтерия (рис. 4.1). Последующие присоединения протонов и нейтронов быстро превращают дейтерий в гелий (ядра которого содержат по два протона и нейтрона). Однако на этом образование ядер фактически останавливается. Дело в том, что из-за некоторых особенностей ядерных сил стабильных ядер, состоящих из пяти нуклонов, не существует, а одновременное присоединение более чем одного нуклона крайне маловероятно. Это так называемый пятинуклонный провал. Расчеты показывают, что около 23% нуклонов входят в состав ядер гелия, а почти все остальные остаются в форме водорода. Образуется также небольшое количество дейтерия и лития^V.

Современный анализ, опирающийся на самые последние данные о ядерных реакциях и суперкомпьютерные модели, даёт точные значения распространённости элементов после того,

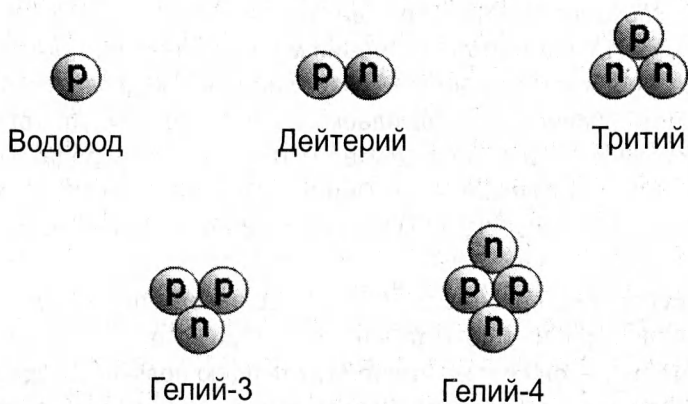


Рис. 4.1. Простейшие атомные ядра.
Протоны и нейтроны обозначаются соответственно *p* и *n*.

как они покинули космическое горнило. То, насколько хорошо результаты этих вычислений согласуются с астрономическими наблюдениями, весьма впечатляет. Астрономы могут определять химический состав далеких объектов, изучая спектр испущенного ими света. Теория горячего Большого взрыва твердо предсказывает, что ни одна галактика во Вселенной не должна содержать меньше двадцати трех процентов гелия: поскольку он производится в звездах, его первоначальная распространенность может только возрастать. И действительно, ни одной такой галактики до сих пор не обнаружено. Предсказанная распространенность дейтерия — чуть меньше одной десятичной, лития — менее одной миллиардной. Весьма примечательно, что столь сильно различающиеся значения подтверждаются наблюдениями. Можно было бы сказать, что 23% гелия — это просто счастливая догадка, но вероятность случайного совпадения целого набора чисел крайне низка.

Но как обстоят дела с тяжелыми элементами? Несмотря на все усилия, Гамов и его команда не смогли найти мост через

пятинуклонный провал. Тем временем по другую сторону Атлантики главный защитник модели стационарного состояния Фред Хойл разрабатывал альтернативную теорию происхождения элементов. Он знал, что звезды, которые подобно нашему Солнцу пережигают водород в гелий, недостаточно горячи для этой задачи. Но что происходит, когда звезда истощает свой водород? Тогда она больше не может противостоять собственной гравитации, ядро звезды начинает сжиматься, а его плотность и температура возрастают. После того как в центре температура достигает 100 миллионов градусов, открывается новый канал ядерных реакций: три ядра гелия сливаются и образуют ядро углерода. Когда весь гелий в центральной области израсходован, звезда сжимается дальше, пока температура не поднимется настолько, чтобы запустить реакции ядерного горения углерода. По мере развития этого процесса образуется слоистая структура, в которой более тяжелые элементы находятся ближе к центру (поскольку для их приготовления требуются более высокие температуры). В звездах, подобных Солнцу, этот процесс не заходит слишком далеко, но в более массивных светилах он продлевается весь путь вплоть до образования железа. За этой точкой топлива для ядерного горения не остается. Не поддерживаемая больше ядерными реакциями внутренняя часть ядра звезды коллапсирует, достигая невероятной плотности и температуры около 10 миллиардов градусов. Это приводит к гигантскому взрыву, называемому вспышкой сверхновой, при котором все внешние слои, содержащие наработанные элементы, выбрасываются в межзвездное пространство. Элементы тяжелее железа образуются во время коллапса и взрыва ядра. Обогащенный межзвездный газ служит сырьем для новых звезд и планетных систем. Получавшаяся по расчетам Хойла и его сотрудников распространенность тяжелых элементов хорошо согласовывалась с наблюдениями.

Хойл и Гамов разрабатывали свои идеи в 1940-х и 1950-х годах, и тогда их теории рассматривались как две конкурирующие модели происхождения элементов. Однако в итоге оказалось, что оба они были правы: легкие элементы образовались преимущественно в ранней Вселенной, а тяжелые — в звездах. Почти все известное вещество Вселенной находится в форме водорода и гелия, а на долю тяжелых элементов приходится менее 2%. Но они тем не менее исключительно важны для нашего существования: Земля, воздух и наши тела состоят в основном из тяжелых элементов. Как писал кембриджский астрофизик Мартин Рис, “Мы — звездная пыль, пыль давно умерших звезд”^{vi}.

КОСМИЧЕСКИЕ МИКРОВОЛНЫ

Процесс образования гелия начинается примерно через 3 минуты ПБВ и завершается менее чем за минуту. Вселенная продолжает расширяться в чудовищном темпе, а плотность и температура очень быстро падают. Но после насыщенных событиями первых минут темп космической драмы замедляется. С частицами вещества мало что происходит, наиболее значительные изменения касаются наполняющего огненный шар излучения.

На микроскопическом, квантовом уровне излучение состоит из фотонов, однако макроскопически его можно изображать состоящим из электромагнитных волн — колеблющихся узоров электрической и магнитной энергии. Волны разной частоты вызывают разные физические эффекты, и мы знаем их под разными названиями. Видимому свету соответствует лишь узкая полоска во всем электромагнитном спектре. Волны с более высокой частотой называют рентгеновским излучением, а еще более высокочастотные — гамма-лучами. Двигаясь по частотам вниз, мы встретим микроволны, а за ними радиоволны. Все они распространяются со скоростью света.

По мере убывания температуры огненного шара интенсивность излучения снижается, а его частота постепенно сдвигается от гамма-лучей через рентгеновский диапазон к видимому свету. Важное событие происходит примерно через 300 000 лет ПБВ, когда температура становится достаточно низкой, чтобы электроны и ядра могли объединяться в атомы. До этого электромагнитные волны часто рассеивались на заряженных электронах и ядрах. Однако с нейтральными атомами излучение взаимодействует очень слабо, так что после образования атомов волны начинают свободно распространяться по Вселенной, практически ни на чем не рассеиваясь. Другими словами, Вселенная вдруг становится прозрачной для света.

Что случится после этого с космическим излучением? Ничего особенного, кроме того, что частота электромагнитных волн и соответствующая ей температура продолжают убывать по мере расширения Вселенной. В момент образования нейтральных атомов температура излучения составляла 4000 градусов, немного ниже, чем на поверхности Солнца. Если бы мы оказались там и смогли выдержать столь нездоровые условия, то увидели бы Вселенную залитой ярко-оранжевым светом. К моменту 600 000 лет ПБВ мы заметили бы, что цвет сменился на красный. Около одного миллиона лет излучение смещается за пределы видимого диапазона, в инфракрасную часть спектра. Так что для нас Вселенная погрузилась бы в полную темноту. Частота волн продолжает медленно уменьшаться, и к настоящему времени, которое соответствует космическому возрасту около 14 миллиардов лет, она опускается до микроволнового диапазона.

Эту историю космического огненного шара изучали молодые сотрудники Гамова Альфер и Херман. Они проследили ее вплоть до настоящего времени и пришли к удивительному выводу: мы должны быть окружены морем микроволн с температурой около 5 градусов Кельвина.

Работа Альфера и Хермана была опубликована в 1948 году. Вы, верно, подумаете, что она побудила большое число наблюдателей заняться поиском космических микроволн. В самом деле, первичное излучение — это прямая улика, буквально дымящееся ружье Большого взрыва, и его открытие должно было иметь колоссальное значение. Вы можете подумать, что, когда это излучение было зарегистрировано, за его предсказание была присуждена Нобелевская премия. Увы, на самом деле события разворачивались иначе.

ДЫМЯЩЕЕСЯ РУЖЬЕ

Может показаться странным, но предсказание космического излучения полностью игнорировалось на протяжении двух десятилетий — до тех пор пока его случайно не открыли в 1965 году. Два радиоастронома Арно Пензиас и Роберт Вильсон, работая в Bell Telephone Laboratories в штате Нью-Джерси, регистрировали постоянный шум в своей высокочувствительной антенне. Шум характеризовался температурой около 3 градусов Кельвина и не зависел от времени суток и точки, куда была направлена антенна. В своей непреклонной решимости найти источник проблемы Пензиас и Вильсон тщательнейшим образом исключили все возможные помехи, которые им удалось придумать. Они даже выселили пару голубей, свивших гнездо в антенне, и удалили то, что Пензиас называл “белым диэлектрическим веществом”, которое они по себе оставили. Но ничто не помогло — источник шума по-прежнему оставался загадочным.

Между тем в полусотне километров от них, в Принстонском университете, группа физиков занималась сооружением собственного радиоприемного устройства. Руководил работой Роберт Дикке, выдающийся физик, одинаково хорошо владевший как теорией, так и экспериментом. Он понял, что от ран-

них горячих стадий в истории Вселенной должно остаться послесвечение, и спроектировал антенну для его поиска. Когда принстонская группа уже была готова начать свои измерения, ее сотрудникам стало известно о затруднениях Пензиаса и Вильсона. Сразу стало ясно, что надоедливый шум, который так настойчиво пытались устранить, как раз и является теми самыми космическими микроволнами, которые принстонцы еще только надеялись зарегистрировать!

Чрезвычайно интересен вопрос, почему космическое излучение было открыто случайно. Почему никто не прислушался к Альферу и Херману? Даже если в их статье что-то было упущено, почему потребовалось более 15 лет, чтобы кто-то другой пришел к тому же заключению? Ведь, в конце концов, это же было прямым следствием гамовской теории горячего Большого взрыва.

Одной из причин, похоже, было то, что физики попросту не верили в реальность ранней Вселенной. “Как часто бывает в физике, — писал нобелевский лауреат Стивен Вайнберг, — ошибка не в том, что мы слишком серьезно относимся к своим теориям, а в том, что не воспринимаем их достаточно серьезно”^{vii}. Не в пользу Георгия Гамова был, возможно, и его характер, слишком яркий для того, чтобы к его обладателю внимательно прислушивались в научном сообществе. Склонный к розыгрышам, сочинявший непечатные лимерики и часто сильно выпивавший в баре, он явно не был типичным физиком. Наконец, в середине 1950-х ни Гамов, ни Альфер с Херманом не занимались активно теорией Большого взрыва: Гамов все больше интересовался биологией и выступил с важнейшей догадкой о генетическом коде, в то время как Альфер с Херманом ушли из науки и занялись бизнесом. Нельзя не задуматься о том, что отсутствие признания их работы, вероятно, сыграло роль в этом решении. К середине 1960-х, когда Пензиас и Вильсон возились со своей антенной, работа группы Гамова была почти забыта.

Пензиас и Вильсон измерили интенсивность излучения на одной частоте (на которую была настроена их антенна), но теория предсказывала, что оно охватывает целый диапазон частот, а его интенсивность должна следовать простой формуле, выведенной Максом Планком еще на исходе XIX века. Это предсказание было блистательно подтверждено в 1990 году спутниковым экспериментом COBE (Cosmic Microwave Background Explorer — Исследователь космического микроволнового фона), выявившим соответствие с формулой Планка с погрешностью менее одной десятичной.

Открытие космического микроволнового излучения было, без сомнения, эпохальным событием для космологии. Этот доступный непосредственному измерению реликт первичного огненного шара придал ученым уверенности в том, что все это им не приснилось, что Вселенная действительно имела горячее начало около 14 миллиардов лет назад. Пензиас и Вильсон получили в 1978 году Нобелевскую премию “за открытие космического микроволнового излучения”. За его теоретическое предсказание никакой премии присуждено не было.

НЕСОВЕРШЕНСТВО ТВОРЕНИЯ

Если бы вначале Вселенная была совершенно однородной, она оставалась бы такой и в наши дни. Однородный разреженный газ, заполняющий Вселенную, становился бы все менее плотным, мир вечно оставался бы во тьме, а космическое излучение медленно сдвигалось бы в сторону все более низкочастотных радиоволн. Но одного взгляда на ночное небо достаточно, чтобы убедиться: наша Вселенная не столь безрадостна. Она залита сиянием звезд, которые разбросаны по космосу, образуя иерархию структур. Элементарные единицы этой структуры — галактики — содержат по-

рядка 100 миллиардов звезд. Галактики группируются в скопления, которые в свою очередь образуют сверхскопления, простирающиеся на несколько сотен миллионов световых лет¹ — всего в 100 раз меньше размеров наблюдаемой части Вселенной.

Космологи связывают происхождение всех этих величественных структур с крошечными неоднородностями, существовавшими в первичном огненном шаре. Они могли разрастись до размеров галактик вследствие так называемой гравитационной неустойчивости. Допустим, что в некоторой области пространства плотность чуть выше, чем в ее окружении. Тогда у нее будет более сильное тяготение, и она притянет больше вещества, чем соседние области. В результате контраст плотности будет увеличиваться, и первоначально почти однородное распределение вещества станет превращаться в сильно неоднородное. Космологи считают, что именно так образовались галактики, скопления и сверхскопления. Согласно этой теории, первые галактики сформировались примерно через миллиард лет ПБВ. Звездный свет залил Вселенную, и темная эпоха закончилась. Процесс формирования галактик завершился не так уж давно — когда возраст Вселенной был около 10 миллиардов лет (“всего” четыре миллиарда лет назад).

Можно подумать, что эта история обречена оставаться легендой, поскольку в те времена не было никого, кто мог бы ее подтвердить. Однако, как я уже подчеркивал, мы видим далекие объекты такими, какими они были много лет назад, когда был испущен регистрируемый нами сегодня свет. Так что, изучая более далекие галактики, мы уходим назад во времени. Время движения света от самых далеких галактик, доступных

¹ Световой год — это расстояние, проходимое светом за год. Оно составляет около 10 триллионов километров.

нашему наблюдению, составляет около 13 миллиардов лет, так что мы видим их в то время, когда Вселенной был всего один миллиард лет от роду. По сравнению с грандиозными спиральями, которые окружают нас сейчас, те галактики маленькие и неправильные, что служит признаком их молодости.

Еще более ранние эпохи в истории Вселенной можно наблюдать благодаря космическим микроволнам. Они распространяются без рассеяния почти 14 миллиардов лет с того времени, когда Вселенная стала прозрачной для излучения. Области, где эти волны испытали последнее рассеяние, удалены сейчас на расстояние 40 миллиардов световых лет¹. (А не 14 миллиардов, как можно было бы подумать, поскольку Вселенная продолжает расширяться.) Таким образом, микроволны приходят к нам с поверхности гигантской сферы радиусом 40 миллиардов световых лет; ее называют *поверхностью последнего*

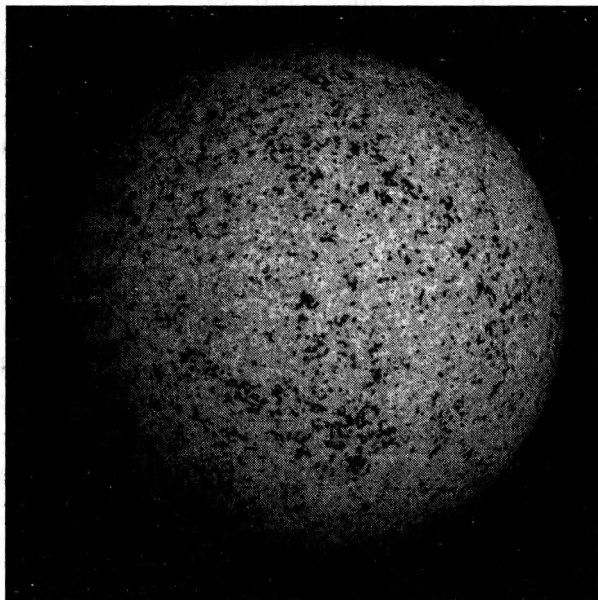


Рис. 4.2. Микроволновое небо, как его увидел спутник WMAP.

рассеяния. Излучение, испущенное из областей с чуть более высокой плотностью, должно было преодолеть более сильное тяготение и, приходя к нам, имеет чуть меньшую интенсивность. Как следствие, более плотные области выглядят на микроволновом небе более тусклыми. Составляя карту интенсивности излучения в разных направлениях неба, мы можем получить изображение Вселенной в эпоху последнего рассеяния, когда ей было всего 300 000 лет.

Впервые карту микроволнового неба построила команда эксперимента COBE в 1992 году. Более подробная карта, которую получил 10 лет спустя спутник WMAP², представлена на рисунке 4.2. Темные оттенки серого соответствуют более высокой интенсивности излучения, однако разница между светлыми и темными пятнами составляет всего несколько сотен тысяч. Это означает, что во время последнего рассеяния Вселенная была почти идеально однородной. Все восхитительные структуры, которые мы сегодня видим на небе, были закодированы в этой аморфной ряби почти однородного космического фона.

СОВРЕМЕННАЯ ИСТОРИЯ СОТВОРЕНИЯ МИРА

На рисунке 4.3 представлена история сотворения мира, которую мы до сих пор обсуждали. Эта история подтверждается многочисленными наблюдательными данными, и нет особых оснований сомневаться в том, что в целом она верна. Ее

¹ Мы говорим, что электромагнитная волна рассеивается, когда она поглощается и переизлучается заряженной частицей. Поэтому поверхность последнего рассеяния можно также описать как поверхность, с которой было испущено космическое излучение.

² Зонд WMAP (Wilkinson Microwave Anisotropy Probe — зонд им. Уилкинсона для изучения анизотропии микроволнового фона) получил название в честь Дэвида Уилкинсона из Принстонского университета, который выдвинул идею эксперимента и был главным его вдохновителем. К сожалению, он умер незадолго до запуска спутника.

детали продолжают уточняться, а некоторые важные вопросы еще остаются открытыми. Одна из важнейших неизвестных — природа темной материи, которая проявляет себя гравитационным притяжением галактик и скоплений. Имеются веские основания считать, что темная материя состоит не из нуклонов и электронов, а, скорее, из каких-то еще не открытых частиц. От масс и взаимодействия этих частиц зависят детали процесса формирования галактик, но не общая картина, очерченная на рисунке 4.3.

Поистине удивительно, что мы можем наблюдать Вселенную такой, какой она была 14 миллиардов лет назад, и точно описывать события, происходившие спустя долю секунды после Большого взрыва. Это подводит нас невероятно близко к моменту творения. Но что в действительности случилось в тот момент, как всегда, остается загадкой. На самом деле при более близком знакомстве Большой взрыв выглядит даже более странным, чем казался до сих пор.

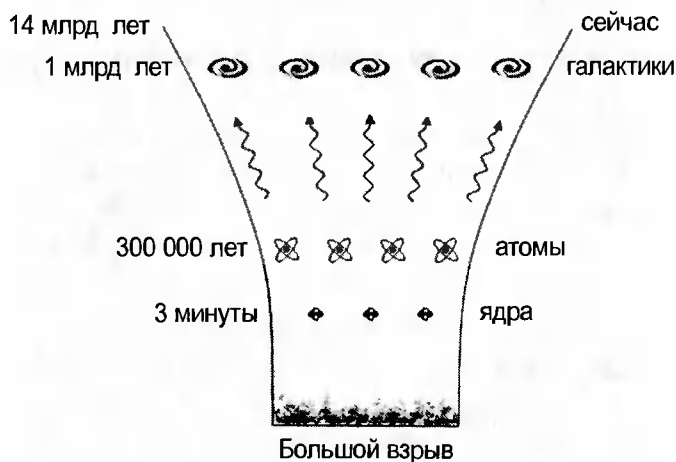


Рис. 4.3. Краткая история Вселенной.

ГЛАВА 5

Инфляционная Вселенная

Можно противостоять вторжению армии,
но не идеи, чье время пришло.

Виктор Гюго

КОСМИЧЕСКИЕ ПАЗЛЫ

Представим, что однажды мы получаем из далекой галактики радиogramму, гласящую: “Элвис жив”. Мы направляем антенну на другую галактику и с удивлением получаем точно такое же сообщение! Изрядно озадаченные, мы переводим антенну с одной галактики на другую, но отовсюду получаем все то же послание. Один из выводов, к которому мы придем, состоит в том, что мир полон фанатов Элвиса; другой — что все они общаются между собой. Ведь как иначе им удалось бы объявиться с одинаковыми сообщениями?

Как ни глупо это может показаться, но такой пример весьма схож с той ситуацией, в которой мы оказались, наблюдая Вселенную. Интенсивность микроволнового излучения, прихо-

дящего к нам со всех сторон в небе, в высшей степени постоянна, а значит, распределение плотности и температуры Вселенной в те времена, когда испускалось это излучение, были исключительно однородными. Из этого наблюдения вытекает наличие определенного взаимодействия между излучающими областями, которое приводит к выравниванию плотностей и температур. Парадокс, однако, в том, что для протекания подобных процессов с момента Большого взрыва прошло слишком мало времени.

Корень проблемы связан с неспособностью физических взаимодействий распространяться быстрее света. Со времени Большого взрыва электромагнитные волны удалились от мест, где они были испущены, на 40 миллиардов световых лет. Это расстояние называют *радиусом горизонта*. Оно ставит предел тому, как далеко мы можем видеть Вселенную, и задает максимальное расстояние, на котором могла быть установлена связь. Космическое излучение, которое мы наблюдаем, было испущено вскоре после Большого взрыва и приходит к нам с расстояний, примерно равных радиусу горизонта. Рассмотрим теперь излучение, приходящее с двух противоположных направлений на небе (рис. 5.1). Области, где было испущено это излучение, разделены сейчас удвоенным расстоянием до гори-

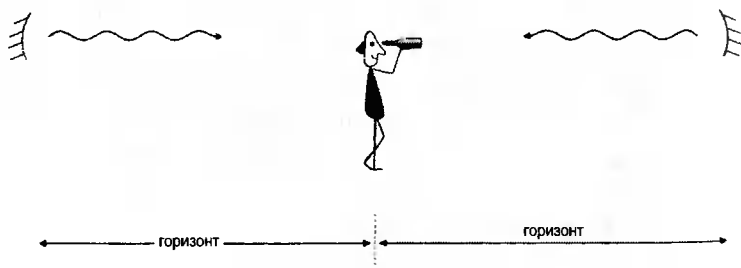


Рис. 5.1. Космическое излучение, приходящее с двух противоположных направлений на небе, испущено в областях, которые ныне разделены двойным расстоянием до горизонта.

зонта, а значит, они никак не могли взаимодействовать. Тем более — они не могли обмениваться теплом, чтобы уравновесить свою температуру.

В более ранние времена эти две области были ближе друг к другу, и может показаться, что это помогло бы им прийти в равновесие. Но в действительности раньше это было еще затруднительнее. Дело в том, что с удалением в прошлое радиус горизонта сокращается быстрее, чем расстояние между областями. В момент последнего рассеяния, когда испускалось излучение, наблюдаемая часть Вселенной была разбита на тысячи маленьких областей, которые не могли сообщаться друг с другом. Итак, мы приходим к выводу, что никакой физический процесс не мог сделать огненный шар однородным, если бы он не был таким с самого начала.

Эту загадочную особенность Большого взрыва часто называют *проблемой горизонта*. Единственное объяснение удивительной однородности плотности и температуры в ранней Вселенной состоит в том, что такой сделал новорожденную Вселенную Большой взрыв. Логически такое “объяснение” совершенно правомерно. Физические условия в сингулярности не определены, так что сразу после Большого взрыва можно постулировать любое физическое состояние. Однако очень трудно отделаться от чувства, что это совершенно ничего не объясняет.

Другая удивительная особенность Большого взрыва состоит в тонкой сбалансированности вспышки, заставившей разбежаться частицы, и силы притяжения, которая замедляет расширение. Если бы плотность материи во Вселенной была больше, ее гравитационного притяжения хватило бы, чтобы остановить расширение и в итоге заставить Вселенную вновь сколлапсировать. При немного меньшей плотности Вселенная расширяется бесконечно. Наблюдаемая плотность с точностью до нескольких процентов равна критической, отвечающей пограничной линии между этими двумя режимами. Это очень странно и требует объяснения.

Трудность связана с тем, что в ходе космической эволюции Вселенная удаляется от критической плотности. Если, например, мы начинаем со значения на один процент выше критического, то менее чем через минуту получим удвоенную критическую плотность, а уже через три с небольшим минуты вселенная вновь сожмется в точку. Аналогично, если начать с плотности, уступающей критической на один процент, то через год она станет в 300 000 раз ниже критической. Во вселенной с такой низкой плотностью никогда не образуются звезды и галактики; в ней не будет ничего, кроме крайне разреженного газа без каких-либо образований. Чтобы спустя 14 миллиардов лет — то есть при нынешнем возрасте Вселенной — ее плотность оставалась почти равной критической, начальное состояние должно быть выверено с хирургической точностью. Вычисления показывают, что она не должна отличаться больше чем на $1/100000000000000$ долю процента.

Все это тесно соотносится с вопросом о геометрии Вселенной. Благодаря Фридману мы знаем о связи между плотностью Вселенной и ее крупномасштабной геометрией. Вселенная замкнута, если плотность выше критической, открыта — при более низкой плотности и плоская, если плотность в точности равна критической. Таким образом, вместо того чтобы спрашивать, почему плотность Вселенной так близка к критической, можно с тем же успехом задаться вопросом, почему геометрия пространства так близка к плоской. Поэтому часто говорят не о загадке тонкой настройки, а о *проблеме плоской геометрии* Вселенной.

Проблемы горизонта и плоской геометрии были осознаны в 1960-х годах, но почти не обсуждались, поскольку не было ровным счетом никаких идей, как за них взяться. К ним нельзя подступиться, не сталкиваясь с куда большей скрывающейся за ними загадкой: что же в действительности случилось в момент Большого взрыва? Какова была природа силы, которая вызвала космическую вспышку и заставила частицы разлетаться друг

от друга? Поскольку почти за полвека на этом направлении не было достигнуто никакого прогресса, физики стали привыкать к мысли, что это один из тех вопросов, которые не следует задавать, поскольку либо они лежат за пределами физики, либо физика к ним еще не готова. Так что когда Алан Гут в 1980 году совершил впечатляющий прорыв и предложил способ одним махом справиться с несколькими неподатливыми космологическими загадками, это оказалось полной неожиданностью¹.

Гут выдвинул идею, согласно которой за раздувание Вселенной отвечает отталкивающая гравитация. Он предположил, что ранняя Вселенная содержала очень необычную материю, которая порождала мощные силы гравитационного отталкивания. Если вы когда-нибудь попробуете прочесть лекцию о подобных идеях, лучше вам припасти в кармане кусок антигравитационного вещества или по крайней мере подготовить очень хорошие аргументы в пользу его существования. К счастью для Гута, он не изобретал никаких волшебных материалов. Ведущие теории элементарных частиц уже наперебой предлагали их под названием *ложного вакуума*.

ЛОЖНЫЙ ВАКУУМ

“А ты можешь из ничего что-нибудь сделать, дяденька?” —

“Нет, дружок, из ничего не выйдет ничего”.

ШЕКСПИР, “КОРОЛЬ ЛИР” (ПЕР. Т.Л. ЩЕПКИНОЙ-КУПЕРНИК)

Вакуум — это пустое пространство. Его часто используют как синоним слова “ничто”. Вот почему идея энергии вакуума показалась такой странной, когда ее впервые выдвинул Эйн-

штейн. Однако под влиянием достижений теории элементарных частиц за последние три десятилетия отношение физиков к вакууму коренным образом поменялось. Исследования вакуума продолжаются, и чем больше мы узнаем о нем, тем он кажется сложнее и удивительнее.

Согласно современным теориям элементарных частиц, вакуум — это физический объект; он может быть заряжен энергией и может находиться в разнообразных состояниях. В терминологии физиков эти состояния называют разными вакуумами. Типы элементарных частиц, их массы и взаимодействия определяются лежащим в основе вакуумом. Взаимосвязь между частицами и вакуумом подобна той, что существует между звуковыми волнами и материалом, по которому они распространяются. Вакуум, в котором мы живем, находится в наинизшем энергетическом состоянии, его называют “истинным вакуумом”ⁱⁱ.

Физики собрали массу знаний о частицах, который населяют этот тип вакуума, и силах, действующих между ними. Сильное ядерное взаимодействие, например, связывает протоны и нейтроны в атомных ядрах, электромагнитные силы удерживают электроны на их орбитах вокруг ядер, а слабое взаимодействие отвечает за поведение неуловимых легких частиц, называемых нейтрино. В соответствии со своими именами эти три взаимодействия обладают очень разной силой, причем электромагнитное взаимодействие занимает промежуточное положение между сильным и слабым.

Свойства элементарных частиц в других вакуумах могут быть совершенно иными. Неизвестно, сколько существует разных вакуумов, но физика элементарных частиц позволяет предположить, что их, вероятно, должно быть еще по крайней мере два, причем обладающих большей симметрией и меньшим разнообразием частиц и взаимодействий. Первый из них — это так называемый *электрослабый* вакуум, в котором

электромагнитное и слабое взаимодействия имеют одинаковую силу и проявляются как составляющие одной объединенной силы. Электроны в этом вакууме имеют нулевую массу и неотличимы от нейтрино. Они движутся со скоростью света и не могут удерживаться внутри атомов. Неудивительно, что мы живем не в этом типе вакуума.

Второй — это вакуум *Великого объединения*, в котором сливаются все три типа взаимодействий между частицами. В этом высокосимметричном состоянии нейтрино, электроны и кварки (из которых состоят протоны и нейтроны) становятся взаимозаменяемыми. Если электрослабый вакуум почти наверняка существует, то вакуум Великого объединения — гораздо более умозрительная конструкция. Теории элементарных частиц, которые предсказывают его существование, привлекательны с теоретической точки зрения, но задействуют чрезвычайно высокие энергии, а их наблюдательные подтверждения немногочисленны и в основном носят косвенный характер.

Каждый кубический сантиметр электрослабого вакуума содержит колоссальную энергию и — согласно соотношению Эйнштейна между массой и энергией — громадную массу, около десяти миллионов триллионов тонн (это примерно масса Луны). Сталкиваясь с такими огромными числами, физики переходят на сокращенную запись чисел, выражая их степенями десятки. Триллион — это единица, за которой следует 12 нулей; его записывают как 10^{12} . Десять миллионов триллионов — это единица с 19 нулями; то есть плотность массы электрослабого вакуума составляет 10^{19} тонн на кубический сантиметр. Для вакуума Великого объединения плотность массы оказывается еще больше, причем чудовищно больше — в 10^{48} раз. Излишне упоминать, что этот вакуум никогда не создавался в лаборатории: на это потребовалось бы много больше энергии, чем доступно при современных технологиях.

По сравнению с этими ошеломляющими величинами энергия обычного истинного вакуума ничтожна. Долгое время считалось, что она в точности равна нулю, однако недавние наблюдения указывают на то, что вакуум может обладать небольшой положительной энергией, которая эквивалентна массе трех атомов водорода на кубический метр. Значение этого открытия прояснится в главах 9, 12 и 14.

Высокоэнергичные вакуумы называют “ложными”, поскольку, в отличие от истинного вакуума, они неустойчивы. Спустя короткое время, обычно малую долю секунды, ложный вакуум распадается, превращаясь в истинный, а его избыточная энергия высвобождается в виде огненного шара из элементарных частиц. В следующих главах мы гораздо подробнее рассмотрим процесс распада вакуума.



Если вакуум обладает энергией, то, согласно Эйнштейну, он должен иметь и натяжениеⁱⁱⁱ. Но, как мы обсуждали в главе 2, натяжение создает отталкивающий гравитационный эффект. В случае вакуума отталкивание в три раза сильнее, чем гравитационное притяжение, вызванное его массой, так что в сумме получается очень сильное отталкивание. Эйнштейн использовал эту антигравитацию вакуума, чтобы уравновесить гравитационное притяжение обычной материи в своей стационарной модели мира. Он обнаружил, что баланс достигается, когда плотность массы материи в два раза превосходит вакуумную. Гут предложил другой план: вместо уравнивания Вселенной он хотел ее раздуть. Поэтому он позволил отталкивающей гравитации ложного вакуума господствовать, не встречая сопротивления.

КОСМИЧЕСКАЯ ИНФЛЯЦИЯ

Что бы случилось, если бы в далеком прошлом пространство Вселенной находилось в состоянии ложного вакуума? Если плотность материи в ту эпоху была меньше, чем требуется для уравнивания Вселенной, тогда доминировала бы отталкивающая гравитация. Это вызвало бы расширение Вселенной, даже если бы первоначально она не расширялась.

Чтобы сделать наши представления более определенными, будем считать, что Вселенная замкнута. Тогда она раздувается подобно воздушному шару на рисунке 3.1. С ростом объема Вселенной материя разрезается, и ее плотность падает. Однако плотность массы ложного вакуума является фиксированной константой; она всегда остается одинаковой. Так что очень быстро плотность материи становится пренебрежимо малой, мы остаемся с однородным расширяющимся морем ложного вакуума.

Расширение вызывается натяжением ложного вакуума, превосходящим притяжение, связанное с плотностью его массы. Поскольку ни одна из этих величин не меняется со временем, *темп расширения* остается с высокой точностью постоянным. Этот темп характеризуют пропорцией, в которой Вселенная расширяется за единицу времени (скажем, за одну секунду). По смыслу эта величина очень похожа на темп инфляции в экономике — процентное увеличение цен за год. В 1980 году, когда Гут вел семинар в Гарварде, уровень инфляции в США составлял 14%. Если бы это значение оставалось неизменным, цены удваивались бы каждые 5,3 года. Аналогично, постоянный темп расширения Вселенной подразумевает, что существует фиксированный интервал времени, на протяжении которого размер Вселенной увеличивается вдвое.

Рост, который характеризуется постоянным временем удвоения, называют экспоненциальным. Известно, что он очень быстро приводит к гигантским числам. Если сегодня кусок пиццы

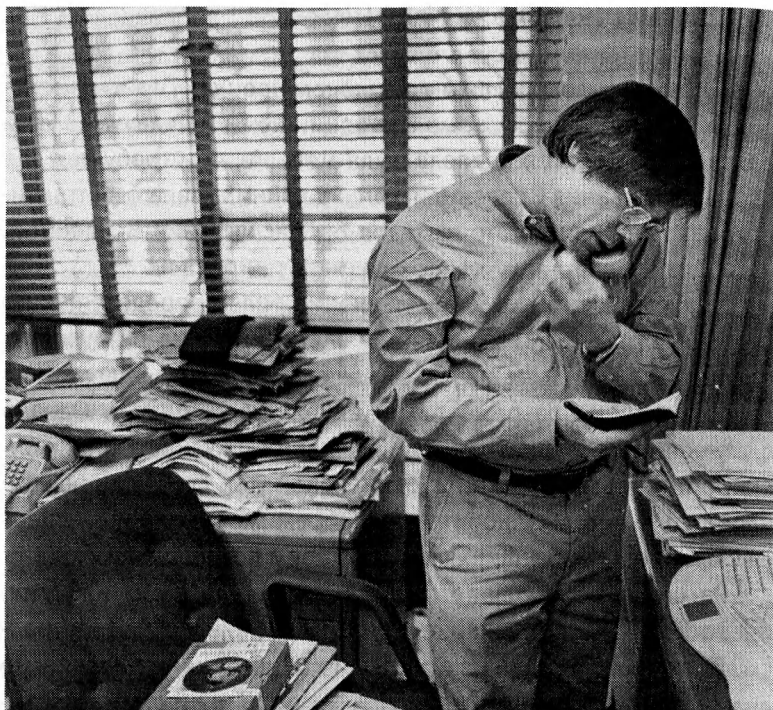


Рис. 5.2. Алан Гут в своем кабинете в Массачусетском технологическом институте. Гут — гордый победитель конкурса на самый захламленный кабинет, организованного в 1995 году газетой *Boston Globe*.

стоит 1 доллар, то через 10 циклов удвоения (53 года в нашем примере) его цена составит 1024 доллара, а через 330 циклов достигнет 10^{100} долларов. Это колоссальное число, единица, за которой следует 100 нулей, имеет специальное название — гугол. Гут предложил использовать в космологии термин *инфляция* для описания экспоненциального расширения Вселенной.

Время удвоения для вселенной, заполненной ложным вакуумом, невероятно короткое. И чем выше энергия вакуума, тем оно короче. В случае электрослабого вакуума вселенная рас-

ширится в гугол раз за одну тридцатую микросекунды, а в присутствии вакуума Великого объединения это случится в 10^{26} раз быстрее. За столь короткую долю секунды область размером с атом раздуется до размеров, намного превосходящих всю наблюдаемую сегодня Вселенную.

Поскольку ложный вакуум нестабилен, он в конце концов распадается, и его энергия зажигает огненный шар из частиц. Это событие обозначает конец инфляции и начало обычной космологической эволюции. Тем самым, из крошечного исходного зародыша мы получаем громадных размеров горячую расширяющуюся Вселенную. А в качестве дополнительного бонуса в этом сценарии удивительным образом исчезают проблемы горизонта и плоской геометрии, характерные для космологии Большого взрыва.

Суть проблемы горизонта состоит в том, что расстояния между некоторыми частями наблюдаемой Вселенной таковы, что они, по-видимому, всегда были больше расстояния, пройденного светом с момента Большого взрыва. Это предполагает, что они никогда не взаимодействовали друг с другом, а тогда трудно объяснить, как они достигли почти точного равенства температур и плотностей. В стандартной теории Большого взрыва путь, пройденный светом, растет пропорционально возрасту вселенной, тогда как расстояние между областями увеличивается медленнее, поскольку космическое расширение замедляется гравитацией. Области, которые не могут взаимодействовать сегодня, смогут влиять друг на друга в будущем, когда свет покроет наконец разделяющее их расстояние. Но в прошлом пройденное светом расстояние становится еще короче, чем надо, так что, если области не могут взаимодействовать сегодня, они тем более не были способны к этому раньше. Корень проблемы, таким образом, связан с притягивающей природой гравитации, из-за которой расширение постепенно замедляется.

Однако во вселенной с ложным вакуумом гравитация отталкивающая, и вместо того, чтобы замедлять расширение, она ускоряет его. При этом положение меняется на противоположное: области, которые могут обмениваться световыми сигналами, в будущем потеряют эту возможность. И, что более важно, те области, которые сегодня недостижимы друг для друга, должны были взаимодействовать в прошлом. Проблема горизонта исчезает!

Проблема плоского пространства разрешается столь же легко. Оказывается, что Вселенная удаляется от критической плотности, только если ее расширение замедляется. В случае ускоренного инфляционного расширения все обстоит наоборот: Вселенная *приближается* к критической плотности, а значит, становится более плоской. Поскольку инфляция увеличивает Вселенную в колоссальное число раз, нам видна лишь крошечная ее часть. Эта наблюдаемая область выглядит плоской подобно нашей Земле, которая тоже кажется плоской, если смотреть на нее, находясь вблизи поверхности.

Итак, короткий период инфляции делает Вселенную большой, горячей, однородной и плоской, создавая как раз такие начальные условия, которые требуются для стандартной космологии Большого взрыва.

Теория инфляции начала покорять мир. Что же касается самого Гута, то его пребывание в статусе постдока закончилось. Он принял предложение от своей альма-матер, Массачусетского технологического института, где и продолжает работать поныне.

Это могло бы стать счастливым финалом для теории инфляции, если бы не одна серьезная неприятность: теория не работала.

ГЛАВА 6

Слишком хорошо, чтобы быть ошибкой

Истина возникает из ошибки гораздо охотнее,
чем из беспорядка.
ФРЭНСИС БЭКОН (1561–1626)

ПРОБЛЕМА ИЗЯЩНОГО ВЫХОДА

Каждый физик знаком с тяжелым чувством, следующим за обнаружением фатальной ошибки в красивой теории, придуманной несколько дней назад. Увы, такова судьба большинства красивых теорий. Не обошла она и теорию инфляции. Как обычно, дьявол таился в деталях. При более внимательном анализе выяснилось, что ложный вакуум распадается не так гладко, как ожидалось.

Процесс распада вакуума похож на кипение воды. Посреди ложного вакуума случайным образом появляются маленькие пузырьки вакуума истинного (рис. 6.1). Внутренние области растущих пузырьков остаются пустыми, а вся энергия, выделяющаяся при переходе ложного вакуума в истинный, сконцентри-

рирована в расширяющихся стенках пузырьков. Когда пузырьки сталкиваются и сливаются, их стенки распадаются на элементарные частицы. Конечным результатом становится истинный вакуум, заполненный плотной горячей материей.

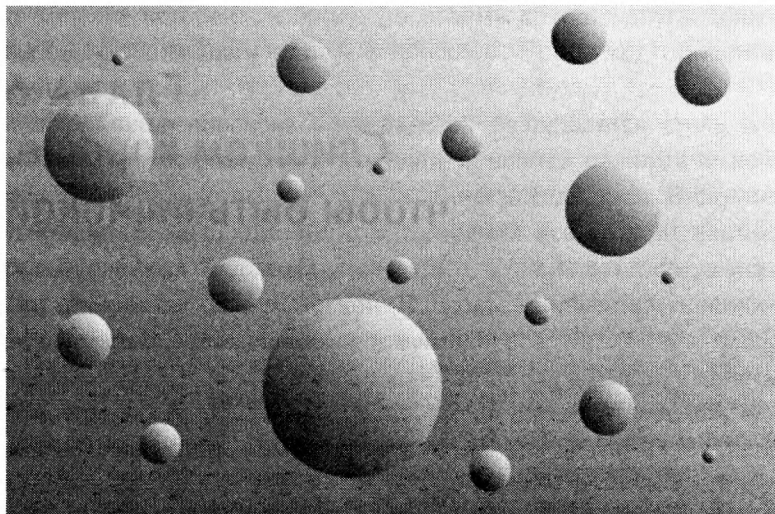


Рис. 6.1. Маленькие пузырьки истинного вакуума случайно возникают и расширяются. Пузырьки, которые образовались раньше, вырастают до большего размера.

Именно так происходит, если пузырьки возникают в бешеном темпе и весь процесс распада завершается меньше чем за один период удвоения. Это означает, однако, что инфляция заканчивается слишком быстро, намного раньше, чем вселенная становится однородной и плоской. Нас же интересует противоположный случай, когда темп формирования пузырьков низкий, так что вселенная может расшириться во много раз, прежде чем пузыри начнут сталкиваться. Но, как любил говорить швейцарский физик Пауль Эренфест, здесь-то лягушка и прыгает в воду.

Трудность состоит в том, что пространство между пузырьками заполнено ложным вакуумом, а значит, быстро расширяется. Пузырьки растут очень быстро, со скоростью, близкой к скорости света, но это не сравнится с экспоненциальным расширением ложного вакуума. Если пузырьки не столкнутся в течение одного периода удвоения от момента возникновения, то в дальнейшем расстояние между ними будет только расти, так что они уже никогда не столкнутся.

Выходит, инфляция может никогда не закончиться. Пузыри неограниченно растут в размерах, а в промежутках между ними все продолжают появляться новые. В результате замечательная однородность, порожденная инфляцией, полностью разрушается. Отсутствие подходящего финала для инфляционного расширения стали называть *проблемой изящного выхода*.

Гут осознал эту проблему спустя несколько месяцев после того, как представил свою новую теорию публике. К тому времени его статья об инфляции еще не была написана, причем по очень простой причине: Алан Гут — самый большой в мире любитель откладывать дела на потом. (Я убедился в этом лично, работая с ним в ряде исследовательских проектов.) Он, конечно, был разочарован, обнаружив в теории серьезный прокол, однако продолжал считать, что идея слишком удачна, чтобы быть ошибочной. Дописав наконец к августу 1980 года свою статью, Гут закончил ее словами: “Я публикую эту статью в надежде, что она... побудит других найти способ обойти нежелательные особенности инфляционного сценария”¹.

СКАЛЯРНОЕ ПОЛЕ

Чтобы разобраться в истоках проблемы, давайте подробнее обсудим ложный вакуум. Процесс его распада был изучен гарвардским физиком Сиднеем Коулманом (Sidney

Coleman), который описал его в терминах так называемых скалярных полей.

Поле — это количественная характеристика, имеющая определенное значение в каждой точке пространства. Его значения могут меняться от точки к точке, а также во времени. Простым примером поля является температура. Северный полюс, мыс Кейп-Код, центр Солнца — все это точки Вселенной, имеющие определенную температуру. Другой знакомый пример — магнитное поле. В дополнение к величине оно обладает также и направлением. Мы не ощущаем магнитного поля, но его присутствие обнаруживается, если взглянуть на компас. Стрелка указывает направление поля, а его напряженность можно определить по тому, насколько сильно оно действует на стрелку, заставляя принять это направление.

Поля, подобно температуре не имеющие направления, называются скалярными. Они описываются одним числом: величиной. Скалярные поля играют важную роль в физике элементарных частиц. Согласно современным теориям, пространство Вселенной заполнено рядом скалярных полей, величины которых определяют энергию вакуума, а также массы частиц и их взаимодействия. Другими словами, эти поля задают вакуум, в котором мы живем. В настоящее время значения скалярных полей соответствуют истинному вакууму, но в прошлом они могли быть иными.

Чтобы проиллюстрировать физику распада вакуума, рассмотрим единственное скалярное поле и сконцентрируемся на том, как оно влияет на энергию вакуума. Каждый кубический сантиметр пространства содержит энергию, которая зависит от величины поля. Точный характер зависимости пока неизвестен, однако в общих чертах он напоминает холмистый ландшафт, как на рисунке 6.2, с максимумами на одних значениях и минимумами на других. Поведение скалярного поля очень похоже на поведение шарика, катящегося по поверхности с ре-

льефом, подобным этому энергетическому ландшафту. В зависимости от начального положения шарик скатится в тот или иной энергетический минимум. Самый нижний минимум имеет почти нулевую плотность энергии; он отвечает истинному вакууму. Более высокий минимум соответствует высокоэнергичному ложному вакууму.

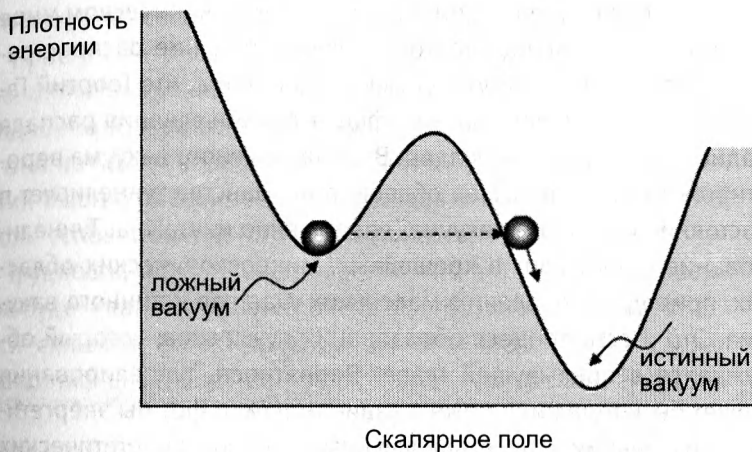


Рис. 6.2. Энергетический ландшафт скалярного поля с ложным и истинным вакуумом. Поле может туннелировать сквозь барьер, разделяющий два вакуума.

Допустим, мы начинаем с ложного вакуума во всех точках пространства. Это соответствует шарик, покоящемуся в верхнем минимуме. Он будет лежать там очень долго, пока что-нибудь не подтолкнет его вверх, сообщив энергию, необходимую для того, чтобы преодолеть барьер и попасть в нижний минимум. Однако, согласно квантовой теории, объект может “туннелировать” сквозь энергетический барьер. Когда вы наблюдаете такое событие, то видите, как шарик исчезает и мгновенно материализуется по другую сторону барьера.

Квантовое туннелирование — вероятностный процесс. Нельзя точно предсказать, когда оно произойдет, но можно вычислить вероятность, с которой оно случится в заданный отрезок времени. Для макроскопических объектов вроде шарика вероятность туннелирования чрезвычайно мала. Если, к примеру, вы хотите, чтобы банка колы туннелировала к вам из торгового автомата, время ожидания намного превысит современный возраст Вселенной. Однако в микроскопическом мире элементарных частиц квантовое туннелирование распространено гораздо шире. Я уже упоминал в главе 4, что Георгий Гамов использовал туннельный эффект для объяснения распада радиоактивных атомных ядер. В случае ложного вакуума вероятность того, что большая область пространства туннелирует в состояние истинного вакуума, совершенно ничтожна. Туннелирование происходит в крошечных, микроскопических областях, приводя к появлению маленьких участков истинного вакуума. Это и есть процесс образования пузырьков, который обсуждался в предыдущей главе. Вероятность туннелирования может быть выше или ниже в зависимости от формы энергетической функции. (Она выше для низких и узких энергетических барьеров.)

Несмотря на сходство между туннелированием шарика и скалярного поля, между ними есть важное различие. Мяч туннелирует между двумя разными точками в пространстве, тогда как скалярное поле — между различными значениями поля в одном и том же месте.

Из нашего анализа следует, что, если между двумя вакуумами имеется энергетический барьер, распад вакуума может происходить только через квантовое туннелирование. Его результатом становятся случайным образом разбросанные пузырьки, которые никогда не сливаются, так что процесс распада никогда не завершается. Но что случится, если мы удалим барьер?

ТИШЕ ЕДЕШЬ — ДАЛЬШЕ БУДЕШЬ

Молодой российский космолог Андрей Линде был первым, кто рассмотрел необщепринятые модели скалярного поля без барьера между истинным и ложным вакуумами.

Как и прежде, предположим, что все начинается с маленькой замкнутой вселенной и скалярного поля в состоянии ложного вакуума. Если барьера нет, шарик, представляющий поле, просто скатывается вниз в сторону истинного вакуума (рис. 6.3). Нет никаких пузырьков, а поле, катясь вниз, остается однородным во всем пространстве. Достигнув нижней точки, оно начинает колебаться вверх и вниз. Энергия этих колебаний быстро рассеивается, порождая огненный шар частиц, а поле успокаивается на минимальной энергии.

Трудность, однако, состоит в том, что в отсутствие барьера поле будет скатываться вниз очень быстро, и инфляция прекратится слишком рано. Понимая эту опасность, Линде сделал принципиальный шаг: он предположил, что график энергетического

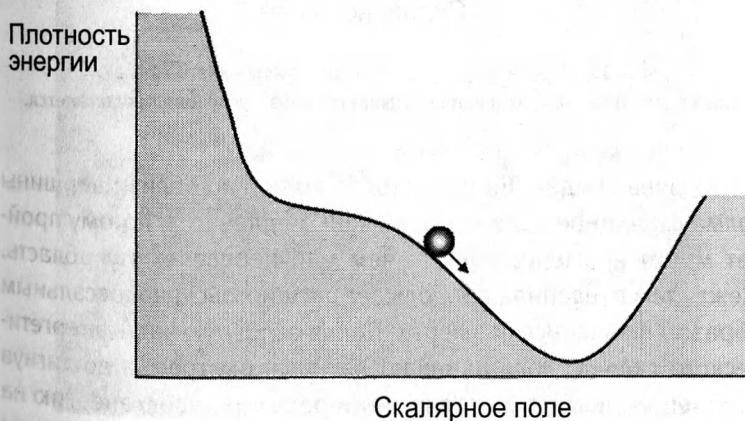


Рис. 6.3. Энергетический ландшафт без барьера. Скалярное поле быстро скатывается к истинному вакууму.

ческой функции напоминает по форме холм с очень пологим склоном, как на рисунке 6.4. Плоский участок наверху холма играет роль ложного вакуума. Если поместить шарик где-то на этом участке, он начнет катиться *крайне* медленно. При этом он будет оставаться практически на одной и той же высоте, поскольку склон очень пологий. Теперь вспомните, что высота на рисунке соответствует плотности энергии скалярного поля, а ее постоянство — все, что требуется для поддержания неизменного темпа инфляции.

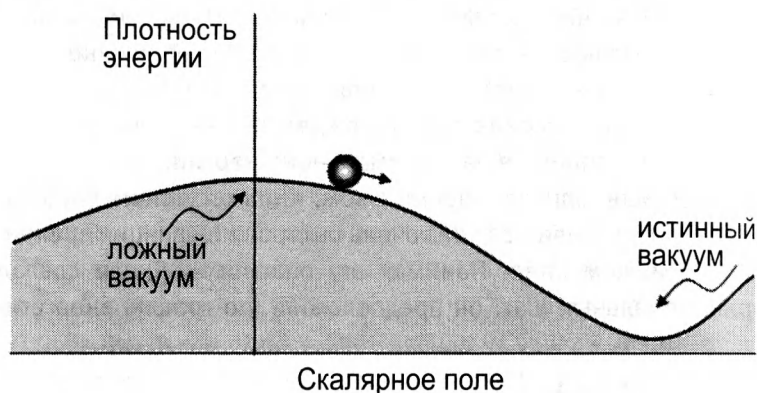


Рис. 6.4. Энергетический ландшафт “сплющенного холма”.
Пока скалярное поле медленно скатывается вниз, инфляция продолжается.

Ключевая идея Линде состояла в том, что вблизи вершины холма скалярное поле катится очень медленно, и потому пройдет много времени, прежде чем оно пересечет эту область. Между тем вселенная продолжает расширяться, колоссальным образом вырастая в размерах. Попав на крутую часть энергетического склона, поле начинает катиться быстрее, а достигнув наконец минимума, осциллирует и расходует свою энергию на порождение горячей смеси частиц. В этот момент мы получаем горячую расширяющуюся вселенную, которая к тому же явля-

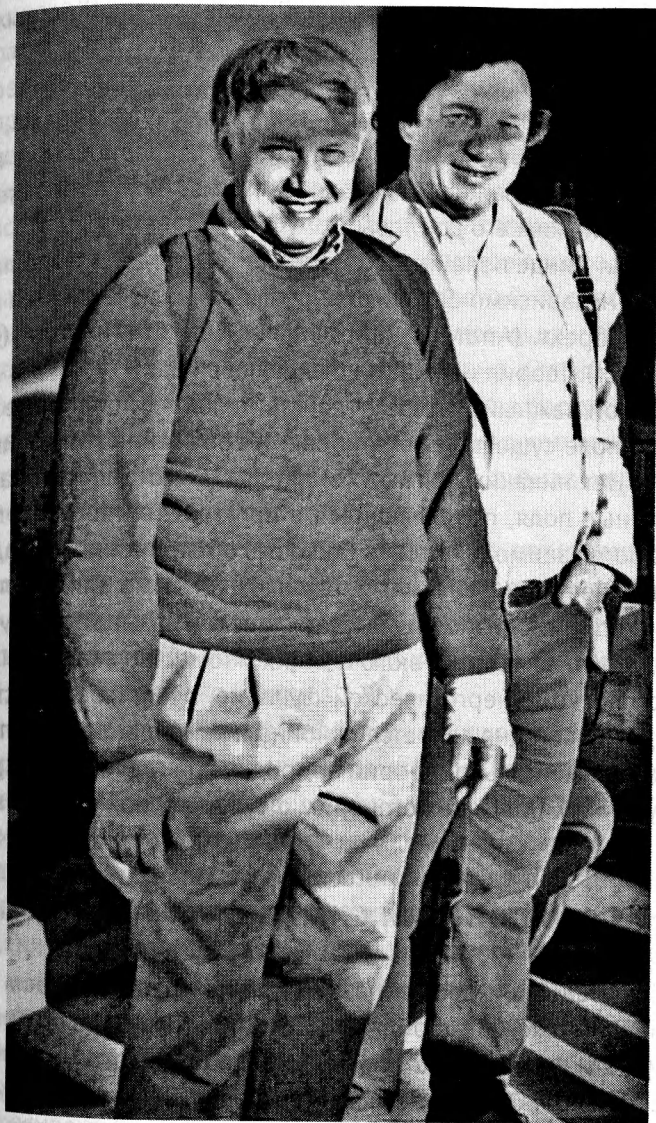


Рис. 6.5. Андрей Линде (слева) со Славой Мухановым
(из Максимилиановского университета в Мюнхене).

ется однородной и почти плоской. Проблема изящного выхода решена!

Все, что нужно, — это скалярное поле, энергетическая функция которого имеет функцию приплюснутого холма, как на рисунке 6.4. Вы можете спросить: а как скалярное поле в самом начале оказалось на вершине холма? Хороший вопрос. Однако отложим его до главы 17.

Статья Линде появилась в феврале 1982 года, и ту же почти идею независимо опубликовали американские физики Андреас Олбрехт (Andreas Albrecht) и Пол Стейнхардт (Paul Steinhardt). Теория инфляции была спасена.

Другой важный вопрос — действительно ли подобное скалярное поле существует в природе. К сожалению, этого мы не знаем. Нет никаких прямых свидетельств его существования. Скалярные поля, появляющиеся в простейших теориях электрослабого взаимодействия и Великого объединения, обладают энергетическими функциями, слишком крутыми для инфляционной теории. Однако существует класс так называемых *суперсимметричных* теорий, включающих множество скалярных полей с плоской энергетической функцией. Теория суперструн, которая на сегодня является основным кандидатом на роль самой фундаментальной теории природы, принадлежит как раз к этому классу. (Мы еще поговорим о суперструнах в главе 15.)

НАФФИЛДОВСКИЙ СИМПОЗИУМ

Следующий акт драмы развернулся в средневековом университете Кембридже. Летом 1982 года сюда по приглашению Стивена Хокинга съехались около тридцати космологов со всего мира. Они собрались на трехнедельный симпозиум по очень ранней Вселенной, который проводился на средства Фонда Наффилда. Я был очень рад оказаться в числе его участ-

ников: Хокинг попросил меня сделать доклад о моих последних работах по космическим струнам.

Я сразу влюбился в Кембридж. Поднимаясь рано утром, я прогуливался по территории колледжа. Готические часовни, колокольни, аскетичные обнесённые стенами дворiki с идеально прямоугольными газонами и яркими пятнами цветов — все это были остатки другого, более расположенного к созерцанию века. К девяти часам я возвращался в наше время, ожидая в конференц-зале начала выступлений. К счастью, в день было только по два доклада — один утром, другой после обеда, — так что оставалась масса времени для неформальных дискуссий. Британская кухня едва ли могла послужить гвоздем программы, но вот местное пиво — это другое дело, так что я провел немало вечеров, разговаривая о физике и других предметах за пинтой лагера.

Программа встречи была специально сориентирована на последние достижения космологии, и теория инфляции закономерно оказалась в центре всеобщего внимания. Проблема изящного выхода была уже снята с повестки дня, но оставались и другие серьезные вопросы.

Инфляция и вправду делает вселенную плоской и однородной, но, возможно, она слишком хорошо справляется со своей работой. В идеально однородной вселенной никогда не возникло бы ни галактик, ни звезд. Как уже обсуждалось в главе 4, галактики развиваются из небольших вариаций плотности. Происхождение этих первичных неоднородностей, или возмущений плотности, стало центральным вопросом симпозиума.

Незадолго до его начала Хокинг написал статью, в которой высказал очень интересную идею. Согласно квантовой теории, эволюция всех физических систем не полностью детерминирована, а подвержена непредсказуемым квантовым подергиваниям. Так что, скатываясь вниз, скалярное поле испытывает случайные толчки то вперед, то назад. Направления

этих толчков неодинаковы в разных областях Вселенной, и в результате в разных местах скалярное поле не в точности одновременно достигает подножия холма. В областях, где инфляция длилась чуть дольше, плотность вещества оказывалась немного выше¹. Идея Хокинга состояла в том, что возникающие в результате этого небольшие неоднородности приведут к образованию галактик и их скоплений. Его правота в этом вопросе означала бы, что квантовые эффекты, обычно имеющие значение только на крошечных субатомных масштабах, оказались бы причиной существования самых крупных образований во Вселенной!

Естественно, Гут был очень взволнован такой возможностью. Ведь она не только разрешала трудности теории, но и открывала заманчивую перспективу проверить инфляцию наблюдениями. Возмущения плотности можно наблюдать посредством космических микроволн, а затем сравнивать с предсказаниями теории. Это было чрезвычайно важно!

Расчет плотности образующихся в ходе инфляции неоднородностей — технически очень сложная задача. Статья Хокинга содержала очень мало подробностей, и ее идеи было трудно развивать. Так что Гут объединил усилия с физиком корейского происхождения Со-Янгом Пи (So-Young Pi) чтобы рассчитать возмущения, используя метод, понятный им обоим. К моменту, когда Гут отправился на симпозиум, работа была еще не вполне закончена, и он завершил вычисления в первые дни пребывания в Кембридже. К его удивлению, полученный результат сильно отличался от хокинговского. Оба они нашли, что возмущения зависят от формы энергетического ландшафта скаляр-

1 По окончании инфляции плотность вещества постоянно снижается вместе с расширением Вселенной, а значит, области пространства, которые поторопились закончить инфляцию, будут уже немного разреженными к тому времени, когда другие, более медлительные регионы наконец завершат инфляционное расширение.

ного поля, но эта зависимость получалась разной, и результат Гута давал значительно большую величину возмущений.

Хокинг настаивал на своем результате. Когда Гут рассказывал мне об их беседе за ланчем, он выглядел озадаченным. Он не был уверен в правильности своего ответа и сказал, что собирается проверить несколько моментов в расчетах.

Дополнительную неразбериху вносило то, что была еще третья группа, работавшая над той же проблемой. Пол Стейнхардт занимался расчетом неоднородностей в сотрудничестве с двумя другими американскими космологами — Джимом Бардиным (Jim Bardeen) и Майклом Тернером (Michael Turner). Они тоже были не согласны с Хокингом, но их ответ был значительно меньше! Наконец, на симпозиуме присутствовал еще и российский физик Алексей Старобинский, также приглашенный выступить по вопросу о возмущениях плотности, однако он пока отмалчивался, и никто не знал, какие он представит результаты.

Старобинский не был новичком в космологии. Среди прочего он был известен тем, что придумал вариант инфляции примерно на год раньше Гута. Правда, сделано это было по ошибке. Он полагал, что его модель позволит избавиться от начальной сингулярности, что на самом деле было в ней невозможно. Однако он не распознал, что она может решить проблемы горизонта и плоской геометрии. Без этой ключевой идеи на модель в то время не обратили большого внимания, но теперь она рассматривалась как реальная альтернатива моделям со скалярным полем Линде, Олбрехта и Стейнхардта¹¹.

По расписанию Старобинский выступал первым. Стиль его доклада был типичен для русской физической школы и восходил к одному из ее создателей, нобелевскому лауреату Льву Ландау. На знаменитых еженедельных семинарах Ландау предполагалось, что докладчик — идиот, и ему давался лишь крошечный шанс объяснить другим свою позицию в самом начале

выступления. Поэтому семинары проводились главным образом “для Ландау” — именно его необходимо было убедить в том, что докладчик знает, о чем говорит. При этом никого особо не беспокоило то обстоятельство, что сказанное оставалось непонятным большинству других собравшихся. Добавьте к этому русский акцент и сильное заикание, и вас уже не удивит, что понять доклад Старобинского было непросто. И все же к моменту его завершения одна вещь была ясна: он пришел к выводу, что неоднородности окажутся крупными, как и в расчетах Гута.

На следующий день пришла очередь выступать Хокингу. Легендарный физик страдает болезнью Лу Герига¹ и с начала 1970-х годов прикован к инвалидному креслу. Сегодня он общается при помощи голосового синтезатора, выбирая слова одно за другим в меню на компьютерном экране. Когда проводился симпозиум, он еще мог говорить, хотя и с трудом. Лекция Хокинга воспроизводила аргументацию в его статье, но в конце был припасен сюрприз. Последний шаг вычислений теперь был изменен, и результат согласовывался с тем, что получили Гут и Старобинский! После разговора с Гутом и доклада Старобинского Хокинг, должно быть, нашел ошибку в своих выкладках, хотя никогда не упоминал, что исправил ошибку в своей статье или что его новый результат был получен с учетом работ Старобинского и Гута.

Большинство дискуссий Наффилдовского симпозиума вертелось вокруг вопроса об инфляции, и хотя новая теория будоражила умы, ее было заведомо многовато. Доклады по другим темам, касающимся ранней Вселенной, дарили долгожданное облегчение — это ощущение я постарался выразить на первом слайде своего доклада, посвященного космическим струнам (рис. 6.6). Струны — это линейно протяженные остатки горячей

1 Официальное название заболевания — боковой амиотрофический склероз.

высокоэнергичной эпохи ранней Вселенной. Они представляют собой тонкие трубки ложного вакуума, существование которых предсказывается некоторыми моделями в физике элементарных частиц. В моем докладе обсуждались образование струн и их возможные астрофизические проявления. Доклад был хорошо принят, и теперь я мог сесть, расслабиться и спокойно наблюдать последние рывки в гонке за определением формы возмущений плотности.

Стейнхардт с друзьями все еще продолжали стоять на своем. Беспокоясь о некоторых слабых местах в своих вычислениях, они продолжали интенсивно работать, чтобы их прояснить. Однако ответ, который они получали, по-прежнему оставался меньше исходного хокинговского результата.

Выступление Гута было запланировано на третью неделю симпозиума. Он волновался, как бы Стейнхардт с компанией не поймали его врасплох, и потому при любой возможности скрывался у себя в номере, чтобы перепроверить различные



Рис. 6.6. Передозировка инфляции — открывающий слайд моего доклада о космических струнах.

моменты своих выкладок. Позже даже оказалось, что, готовясь к своему выступлению, он пропустил состоявшийся на симпозиуме банкет.

Но, несмотря на растущее напряжение, битва так и не состоялась. За несколько дней до своего доклада Стейнхардт и его сотрудники признали поражение. Они нашли ошибки в использованных аппроксимациях, и после исправления их результаты стали согласовываться с тем, к чему пришли другие участники соревнования. Доклад Гута прошел очень гладко: он повторил свои ранее полученные результаты. Таким образом, к концу симпозиума все четыре команды-участницы пришли к полному консенсусу.

Однако последний сюрприз этой удивительной гонки стал известен уже после завершения симпозиума. К своему полному смятению, бывшие участники состязаний обнаружили, что проблема возмущений плотности, вызванных квантовыми флуктуациями, над распутыванием которой они так тяжело трудились, уже была решена за целый год до того, как они скрестили свои мечи в Кембридже. Решение опубликовали двое российских ученых — Слава Муханов¹ и Геннадий Чибисов — из Физического института им. Лебедева в Москвеⁱⁱⁱ. Они рассчитали возмущения для инфляции по версии Старобинского, но выкладки были по сути такие же, как и в модели скалярного поля. Читая русские физические журналы, частенько можно откопать что-то интересное!

Конечным итогом вычислений стала формула для амплитуды возмущений плотности, порожденных квантовой дрожью скалярного поля в процессе скатывания вниз в ходе инфляции. Эта

1 Муханов ныне работает в Максимилиановском университете в Мюнхене; см. рис. 6.5 на с. 85.

амплитуда зависит от формы энергетического ландшафта, а также от размеров области, в которой случается возмущение. Космические структуры охватывают большой диапазон линейных масштабов. Характерные размеры звезд много меньше, чем галактик, которые, в свою очередь, меньше скоплений галактик. Амплитуда возмущений на этих колоссально различающихся масштабах могла бы оказаться совсем разной. Однако полученная формула говорит, что все возмущения почти в точности одинаковы. Между наименьшими и наибольшими космическими структурами различия в амплитуде составляют не более 30%.

Это свойство масштабной независимости инфляционных возмущений нетрудно понять. Квантовые флуктуации первоначально воздействуют на скалярное поле в крошечной области пространства, но затем возникшее возмущение растягивается до значительно больших размеров экспоненциальным расширением Вселенной. Возмущения, появившиеся раньше, подвергаются растяжению дольше и охватывают большего размера области. Но их амплитуда задается исходными квантовыми флуктуациями, которые почти одинаковы на всех представляющих интерес масштабах¹.

Масштабную независимость возмущений плотности можно использовать для предсказания вариаций по небу интенсивности космического микроволнового фона и в конечном счете — для проверки идеи инфляции. Тем самым, спекулятивная гипотеза о ранних моментах Вселенной превращается в проверяемую физическую теорию. Однако потребовалось еще десятилетие, прежде чем космологическая инфляция была подвергнута этой проверке.

¹ По мере того как скалярное поле медленно скатывается вниз по энергетическому склону, флуктуации становятся слабее, а вызываемые ими возмущения — меньше. Однако скатывание происходит так медленно, что положение не успевает значительно измениться за то время, пока генерируются возмущения для всех доступных астрофизике масштабов.

СЕКРЕТ БЫСТРОГО УСПЕХА

На то, чтобы новая теория стала общепризнанной, обычно требуются годы, если не десятилетия. Физики могут восхищаться красотой идеи, но признают ее лишь тогда, когда предсказания теории подтверждаются экспериментами или астрономическими наблюдениями. Это вдвойне верно в отношении космологии, где наблюдателям всегда было тяжело угнаться за воображением теоретиков, и теория Большого взрыва иллюстрирует это не хуже других. Статьи Александра Фридмана при жизни оставались незамеченными, а работа Георгия Гамова едва ли не игнорировалась на протяжении более чем десятилетия. Какой контраст со встречей, оказанной теории инфляции!

Почти 40 работ по новой теории было опубликовано в течение года после выхода первой статьи Гута. Еще через год их число выросло до 200 и оставалось на уровне около 200 статей в год в течение всего следующего десятилетия. Казалось, будто люди бросили все, чем они занимались, и принялись работать над инфляционной теорией.

С чем связан такой молниеносный успех? Отчасти его можно объяснить социологическими причинами. Физики, занимающиеся элементарными частицами, только что завершили разработку теорий сильного и электрослабого взаимодействий. И эта небольшая армия неожиданно обнаружила, что ей нечем заняться. Все новые идеи в физике частиц были связаны с чрезвычайно высокими энергиями. Не было никакой надежды проверить эти теории на существующих ускорителях, и прогресс застопорился. Единственным ускорителем, который мог разогнать частицы до требуемых энергий, оказался Большой взрыв, и физики элементарных частиц все чаще присматривались к космологии как к испытательному полигону для новых идей. В начале 1980-х годов начался массовый

переход из физики элементарных частиц в космологию. Перешедшие были новичками в этой сфере и искали интересные задачи для применения своих сил.

Именно на этом фоне Гут предложил свою идею инфляции и дал физикам в точности то, что они искали. Особенно помогла незавершенность его теории. Когда вы полностью решаете важную проблему, работа может вызывать восхищение, но индустрию на ней не построишь. Инфляция, напротив, была лишь наброском теории с многочисленными пробелами, которые предстояло заполнить. Она предлагала множество задач для работы и самим ученым, и их аспирантам.

Однако помимо социологии продолжительная популярность инфляции связана с привлекательностью и силой самой этой идеи. В каком-то смысле инфляция похожа на дарвиновскую теорию эволюции. Обе теории предлагали объяснение того, что прежде считалось необъяснимым. Сфера научного исследования, тем самым, значительно расширилась. В обоих случаях объяснение было чрезвычайно привлекательным, а убедительных альтернатив никто не предложил.

Другая параллель с Дарвином состоит в том, что в то время, когда Гут предложил идею инфляции, она уже носилась в воздухе¹. Главное достижение Гута состояло в ясном понимании того, чем хороша инфляция, и, тем самым, в создании мотивации для решения проблемы изящного выхода и других трудностей инфляционного сценария.

¹ Эраст Глинер, Старобинский и Линде в СССР, Кацухико Сато (Katsuhiko Sato) в Японии и Роберт Брут (Robert Brout), Франсуа Энглер (Francois Englert) и Эдгар Гунзиг (Edgard Gunzig) в Бельгии — все они рассматривали возможность периода экспоненциального расширения в ранней Вселенной. Сато был также в курсе проблемы изящного выхода.

ВСЕЛЕННАЯ КАК БЕСПЛАТНЫЙ ОБЕД

До сих пор мы предполагали, что начальной точкой инфляции была маленькая замкнутая Вселенная со скалярным полем в состоянии ложного вакуума на вершине энергетического холма. Но эти предположения не являются обязательными. Вместо этого мы можем начать с небольшого кусочка ложного вакуума в бесконечной вселенной. Такое начало тоже приводит к инфляции, но несколько неожиданным способом.

Вспомните, ложный вакуум имеет огромное натяжение, которое вызывает его отталкивающую гравитацию. Если он заполняет все пространство, то натяжение повсюду одинаково и нет никаких физических проявлений, кроме гравитационных. Но если он окружен истинным вакуумом, натяжение внутри не уравнивается никакой внешней силой и заставляет кусочек ложного вакуума сжиматься. Можно подумать, что натяжению противостоит отталкивающая гравитация, но на самом деле это не так.

Анализ, основанный на общей теории относительности Эйнштейна, показывает, что гравитационное отталкивание является чисто внутренним. Так что, если вы принесете кусочек ложного вакуума, чтобы продемонстрировать на лекции, предметы не будут отталкиваться от него, как на рисунке 1.1. Вместо этого они станут притягиваться. Снаружи от ложного вакуума сила гравитации проявляется как обычное тяготение. Результат зависит от размеров кусочка.

Если он меньше некоторой критической величины, побеждает натяжение, и кусочек съеживается, как растянутая резинка. Затем, после нескольких колебаний, он распадается на элементарные частицы. Если размер больше критического, побеждает отталкивающая гравитация, и тогда ложный вакуум начинает раздуваться. В ходе этого процесса он искривляет пространство наподобие воздушного шарика. Этот эффект проиллюстри-

рован на рисунке 6.7 для случая сферической области ложного вакуума. Показано только два пространственных измерения, так что сферическая граница области представлена окружностью. Натяжение влечет границу внутрь, к центру сферы, и это приводит к уменьшению объема ложного вакуума. Но это сокращение совершенно ничтожно по сравнению с экспоненциальным расширением внутренней части.



Рис. 6.7. Раздувающийся шар ложного вакуума (темный), соединенный с внешним пространством “кротовой норой” и видимый извне как черная дыра.

Расширяющийся шар соединен с внешним пространством узкой “кротовой норой”. Снаружи она видна как черная дыра, и внешний наблюдатель никогда не сможет подтвердить или опровергнуть, что внутри этой черной дыры скрывается огромная раздувающаяся вселенная. Аналогично, наблюдатель, который появится внутри раздувающейся вселенной-пузыря, увидит только крошечную часть всего пространства и никогда не узнает, что его вселенная имеет границу, за которой имеется другая большая вселенная.

Поскольку судьба сферы из ложного вакуума так радикально зависит от того, превышает ли ее радиус критическое значение, важно знать, чему же оно равно. Ответ зависит от плотности энергии вакуума: чем больше плотность энергии, тем меньше критический радиус. Для электрослабого вакуума он составляет около 1 миллиметра, а для вакуума Великого объединения — в 10 триллионов раз меньше. Это все, что нужно для создания Вселенной! Воистину, совершенно бесплатный обед. Ну, или почти бесплатный...

{ Часть II Вечная инфляция

ГЛАВА 7

Антигравитационный камень

Теория инфляции стала основной темой моей работы вскоре после того семинара в Гарварде, где я впервые о ней услышал. Надо сказать, что если бы я был более склонен к мистике, то мог бы заметить предзнаменования этого еще до семинара Гута. Определенные указания на отталкивающую гравитацию были как раз в той работе, которой я занимался в университете Тафтса.

Кампус Тафтса, стоящий на пологом склоне холма и окруженный тенистыми вязами, наполнен атмосферой изящества и покоя. Поднимаясь по ступеням на холм, к ядру кампуса, и проходя мимо укрытой ивами часовни в романском стиле, можно заметить странный памятник. Большая гранитная плита поднимается вертикально из земли подобно старинному надгробию. Надпись на ней гласит:

“Данный монумент воздвигнут
Роджером У. Бэбсоном,
основателем Фонда исследований гравитации.

Он призван напоминать студентам
о прекрасном будущем,

когда будут открыты полуизоляторы, способные обуздать гравитацию как свободную энергию и сократить число авиакатастроф”.

Это пресловутый антигравитационный камень, знак моей судьбы.

Роджер Бэбсон, основатель Бэбсоновского колледжа, был живым свидетельством того, как проницательность в управлении бизнесом может мирно уживаться с самыми ненаучными идеями. Он утверждал, что, опираясь на законы механики Ньютона, предсказал биржевой крах 1929 года и последовавшую за ним Великую депрессию. С Ньютоновой помощью он сколотил огромное состояние и в благодарность сэру Исааку выкупил помещение, служившее последним местом проживания Ньютона в Лондоне, а также яблоню из потомства того знаменитого дерева, которое росло возле родного дома Ньютона в Линкольншире. Согласно легенде, именно с него упало яблоко, которое навело Ньютона на мысль о гравитации. И, как вы могли догадаться, именно гравитация занимала центральное место во вселенной Бэбсона.

Одержимость Бэбсона гравитацией восходит к временам его детства, когда его сестра утонула в реке. Он винил в ее смерти гравитацию и решил освободить человечество от ее фатального притяжения. В своей книге “Гравитация — наш враг номер один” Бэбсон описывает преимущества, которые принес бы изолятор, противодействующий гравитации. Он бы уменьшил вес самолетов и повысил их скорость; его применение в подошвах обуви снизило бы вес при ходьбе. Знаменитый изобретатель Томас Эдисон, с которым Бэбсон дружил всю жизнь, навел его на мысль, что в коже птиц может содержаться некое антигравитационное вещество, и Бэбсон немедленно приобрел коллекцию из пяти тысяч птичьих чучел. Неясно, что именно он с ними потом делал, но, очевидно, это направление исследований не принесло успеха.

К чести Бэбсона надо признать, что он действительно вкладывал деньги в то, о чем говорил. Он сделал пожертвования нескольким университетам, включая Тафтский, чтобы способствовать антигравитационным исследованиям. Единственным условием этого гранта была установка в кампусе данного монумента с надписью.

Странное сооружение смущало администрацию Тафтса и послужило поводом для многочисленных студенческих забав. Время от времени оно исчезает, а потом появляется там, где его менее всего ожидают найти. Однажды оно преградило вход попечительскому совету и президенту университета в день вручения дипломов. В другой раз казалось, что камень действительно пропал, но чудесным образом он объявился на своем месте спустя десять лет. Оказалось, что группа студентов зарыла его где-то на территории кампуса, а затем выкопала и вернула на место на юбилейной встрече выпускников. Одной только гравитации было явно не под силу удержать камень на постаменте, так что в конце концов его закрепили в земле при помощи цемента.

Поскольку мало кто из ученых станет утверждать, что ведет активные исследования по антигравитации, получить деньги Бэбсона оказалось весьма непросто. Не то чтобы никто этого не пробовал: президент университета Джин Мейер, диетолог по специальности, безуспешно пыталась доказать, что потеря веса — это антигравитация. После многих лет дискуссий и юридических доказательств деньги наконец пошли на учреждение Института космологии Тафтса.

Как у любой уважающей себя академической организации, у нашего института есть свой уникальный ритуал — церемония “инаугурации” получающих докторскую степень по космологии. После защиты диссертации на голову новоиспеченного доктора, стоящего на коленях перед антигравитационным камнем, роняют яблоко. Оно падает из руки научного руководителя работы и должно быть съедено новоиспеченным доктором.

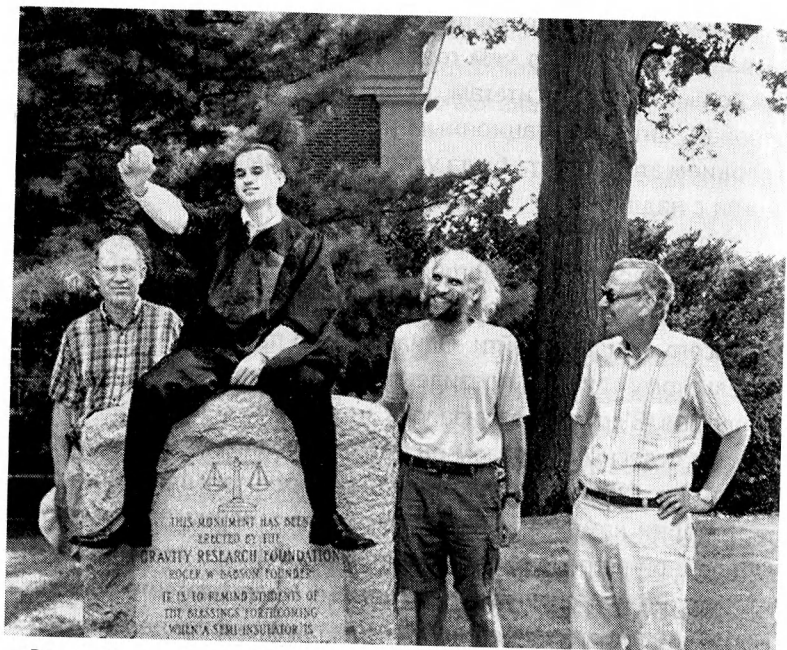


Рис. 7.1. Доктор Виталий Ванчурин (Vitaly Vanchurin) после присуждения ему докторской степени в окружении сотрудников Института космологии. Слева направо: Ларри Форд (Larry Ford), Кен Олам (Ken Olum) и автор (фото: Делия Перлов (Delia Perlov)).

К моменту учреждения Института космологии Бэбсон уже давно умер, а его Фонд гравитационных исследований превратился в респектабельное учреждение, выдающее гранты на исследования по гравитационной тематике. Никто, естественно, не ждал, что космологи Тафтса станут изучать антигравитацию, но, как это ни удивительно, они занялись именно этим. Большая часть исследований в институте связана с ложным вакуумом и отталкивающей гравитацией, которую естественно считать антигравитацией. Так что, я думаю, мистер Бэбсон не смог бы найти лучшего применения своим деньгам. Даже несмотря на то, что мы так и не преуспели в сокращении числа авиакатастроф.

Глава 8

Вечная инфляция

Я думаю, самый вероятный ответ на вопрос о том, что было до инфляции, — еще большая инфляция.

Алан Гут

ВСЕЛЕННАЯ ЗА ГОРИЗОНТОМ

Что лежит за нашим сегодняшним горизонтом? Этот вопрос занимал меня с самых первых дней знакомства с инфляцией. Если нам видна лишь крошечная часть Вселенной, то какова же ее общая картина — вроде того вида нашей планеты, что открывается космическому путешественнику, когда его корабль удаляется от Земли?

Теория возмущений плотности давала об этом некоторое представление. В соответствии с нею рисунок распределения галактик в пространстве определяется квантовыми флуктуациями, которые испытывало скалярное поле во время инфляции. Этот процесс был случайным, и потому некоторые области такого же размера, как наша, содержат больше галактик, а другие — меньше. Причина, по которой галактика Млечный Путь

находится именно здесь, состоит в том, что скалярное поле в этом месте едва заметно сдвинулось назад от состояния истинного вакуума и в результате скатилось с энергетического холма чуть позже, чем в местах по соседству. Это вызвало появление небольшого уплотнения, которое позднее развилось в нашу галактику. Подобные же небольшие сгущения на однородном фоне распределения плотности породили соседнюю с нами Туманность Андромеды и бесчисленное множество других галактик как внутри нашего горизонта, так и за его пределами. Это описание формирования структур предполагает, что самые далекие части Вселенной более или менее похожи на то, что окружает нас здесь. Однако у меня стало возникать подозрение, что в этой картине чего-то недостает.

Влияние квантовых флуктуаций крайне невелико, поскольку они намного уступают силе, тянущей скалярное поле вниз по склону энергетического холма. Вот почему поле везде одновременно достигает нижней точки, и возникают лишь очень небольшие возмущения плотности. Однако я задался вопросом: что случится, если поле находится у вершины холма, где уклон очень маленький? Здесь оно будет отдано на милость квантовых флуктуаций, толкающих его случайным образом то в одну, то в другую сторону. Вселенная, возникающая после инфляции, может в результате оказаться куда менее упорядоченной и более разнообразной, чем казалось на первый взгляд.

Для описания поведения скалярного поля у вершины холма мы используем неpolitкорректную, но весьма уместную аналогию. Позвольте представить вам джентльмена, назовем его мистер Филд¹, который слишком много выпил и теперь пытается сохранить вертикальное положение. Он плохо контролирует свои ноги, не представляет, куда направляется, и поэтому ша-

1 От англ. *field* — “поле”. — *Примеч. перев.*

гает то влево, то вправо совершенно случайно. Мистер Филд начинает свою прогулку с вершины холма, как показано на рисунке 8.1. Поскольку в среднем он одинаково часто шагает и вправо, и влево, ему не удастся слишком быстро куда-то уйти. Но после большого числа шагов он рано или поздно отойдет от вершины. Наконец, приблизившись к более крутой части склона, он неизбежно поскользнется и закончит путь, скатываясь вниз на пятой точке.



Рис. 8.1. Мистер Филд случайным образом блуждает по плоской части холма и соскальзывает вниз, оказавшись на крутом склоне.

Скалярное поле во время инфляции ведет себя очень похоже. Оно бесцельно блуждает вблизи вершины энергетического холма, пока не достигает крутого склона; тогда оно “скатывается” вниз, чем и заканчивается инфляция. На плоском участке вблизи вершины холма вариации поля вызываются квантовыми флуктуациями и совершенно случайны, в то же время скатывание по склону происходит упорядоченно и предсказуемо

и лишь слегка возмущается флуктуациями. Интервалы времени между последовательными флуктуациями примерно равны инфляционному времени удвоения. Это означает, что мистер Филд за такой период успевает сделать лишь один шаг. Поскольку, блуждая по плоской вершине холма, он делает много шагов, это означает, что ложный вакуум, прежде чем распасться, успевает многократно удвоиться.

Конкретная последовательность шагов, приводящая мистера Филда с вершины холма к его подножию, представляет одну из возможных историй скалярного поля. Однако квантовые флуктуации, испытываемые полем, различаются от одной точки к другой, и поэтому истории скалярного поля тоже будут различными. Каждая флуктуация воздействует на небольшой участок пространства. Его размер примерно равен расстоянию, проходимому светом за один интервал инфляционного удвоения; мы будем называть этот размер “кикспэном”¹. Можно представить себе целую группу джентльменов в таком же состоянии, как мистер Филд, каждый из которых представляет скалярное поле в некоторой точке пространства. Когда две точки находятся в пределах кикспэна друг от друга, они испытывают одинаковые квантовые флуктуации, так что соответствующие два джентльмена делают все шаги синхронно, как пара чечеточников. Но точки быстро удаляются друг от друга из-за инфляционного расширения Вселенной, и, когда расстояние между ними превысит кикспэн, компания из пары джентльменов распадется и они станут шагать независимо. Как только это случится, значения скалярного поля в двух точках начнут посте-

1 Слово “кикспэн” (*kickspan*) образовано от англ. слов *kick* — “толчок” и *span* — “величина”, “амплитуда”. Это максимальное расстояние, на котором возможна коммуникация в инфляционной Вселенной. Оно равно критическому размеру кусочка ложного вакуума, необходимого для инфляции (см. главу 6): 1 миллиметр для электрослабого вакуума и в 10^{13} раз меньше для вакуума Великого объединения. Это расстояние играет роль горизонта в расширяющейся инфляционной Вселенной.

ленно расходиться, а расстояние между ними продолжит стремительно расти за счет инфляции.

Малость флуктуаций плотности в наблюдаемой нами области пространства говорит о том, что эта область лежала в пределах кикспэна, когда скалярное поле уже вовсю катилось вниз с холма. Вот почему эффект квантовых флуктуаций был очень мал, а поле почти всюду достигло нижней точки почти одновременно. Но если бы мы могли перемещаться на очень большие расстояния, много больше горизонта, то увидели бы области, которые были в общей компании, когда поле еще блуждало у вершины холма. Истории скалярного поля в таких областях могут очень сильно отличаться от нашей, и я хотел узнать, как выглядит Вселенная на таких сверхгигантских масштабах.

Представьте себе огромную толпу пьяных людей, которые начинают расходиться с вершины холма. Каждый выпивоха представляет отдаленный регион Вселенной, так что все они движутся независимо. Если плоская часть холма имеет протяженность N шагов, то средний джентльмен пересечет ее, сделав N^2 шагов. Примерно половина сделает это быстрее, а другая половина — медленнее. Например, если дистанция составляет 10 шагов, то в среднем потребуется 100 случайных шагов, чтобы ее преодолеть. Так что после 100 шагов примерно половина толпы достигнет своей конечной точки у подножья холма, а половина все еще будет наслаждаться прогулкой. Еще через 100 шагов число гуляющих вновь уполовинится, и так далее, пока последний из друзей не сверзится наконец вниз.

Но теперь заметим, что между пьяницами и расширяющимися областями пространства, которые они символизируют, есть важнейшее различие. Пока наш джентльмен шатается у вершины холма, соответствующая область пространства подвергается экспоненциальному инфляционному расширению. Поэтому число независимо развивающихся областей быстро

увеличивается, как если бы наши пьяные джентльмены быстро размножались. По мере того как я размышлял об этом, картина постепенно обретала форму.

ВЕЧНАЯ ИНФЛЯЦИЯ

Инфляция в известном смысле похожа на размножение бактерий. Есть два конкурирующих процесса: воспроизведение бактерий в результате деления и их эпизодическое уничтожение антителами. Исход зависит от того, какой процесс окажется эффективнее. Если бактерии уничтожаются быстрее, чем размножаются, все они скоро умрут. Напротив, если размножение идет быстрее, бактерии быстро размножатся (рис. 8.2).

В случае инфляции два конкурирующих процесса — это распад ложного вакуума и его “воспроизведение” в результате расширения инфлирующих областей. Эффективность распада можно охарактеризовать периодом полураспада¹ — временем, в течение которого распадается половина ложного вакуума, если бы он не расширялся. (В нашей аналогии со случайным блужданием это время, за которое число гуляющих сокращается вдвое.) С другой стороны, эффективность воспроизведения задается временем удвоения, за которое объем расширяющегося ложного вакуума увеличивается в два раза. Объем ложного вакуума будет сокращаться, если период полураспада короче времени удвоения, и расти — в противном случае.

Однако из обсуждения в предыдущих главах ясно, что период полураспада велик по сравнению с временем удвоения. Причина этого в том, что в моделях инфляции энергетический

1 Термин “период полураспада” происходит из ядерной физики, где он означает время, в течение которого распадается половина атомов в образце радиоактивного вещества.

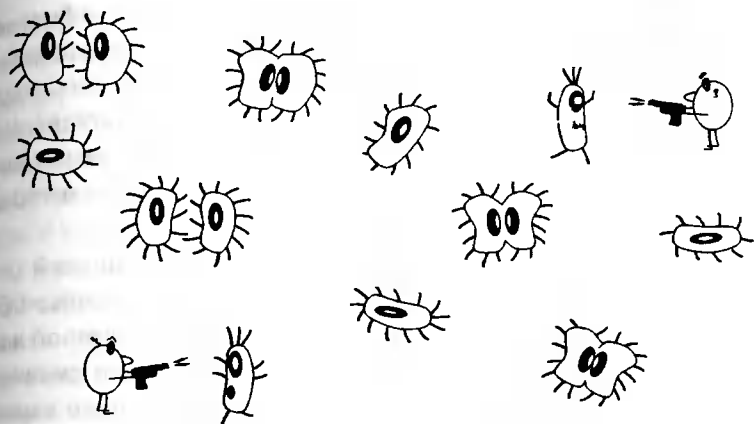


Рис. 8.2. Число бактерий быстро растет, если они размножаются быстрее, чем уничтожаются.

холм весьма пологий, и нужно много шагов, чтобы его пересечь. Поскольку каждый шаг случайного блуждания соответствует одному периоду удвоения в ходе инфляции, период полураспада должен быть много больше времени удвоения. Отсюда вытекает, что области ложного вакуума размножаются намного быстрее, чем распадаются. А значит, во Вселенной в целом инфляция никогда не заканчивается и рост объема инфлирующих областей продолжается беспредельно!

В этот самый момент какие-то отдаленные части Вселенной заполнены ложным вакуумом и испытывают экспоненциальное инфляционное расширение. Но вместе с тем постоянно возникают области, подобные нашей, где инфляция закончилась. Они образуют “островные вселенные” в море инфляции¹.

¹ Алан Гут называет эти острова “карманными вселенными”. Однако Ленни Сасскинд (Lenny Susskind) отметил, что это уничтожает всякую романтику. (Следует отметить, что в первой половине прошлого века термином “островные вселенные” в научно-популярной литературе называли галактики. — Примеч. пер.)

Из-за инфляции пространство между этими островами быстро расширяется, создавая место для рождения все новых островных вселенных. Таким образом, инфляция — это процесс, идущий вразнос, который остановился в наших окрестностях, но продолжается в других частях Вселенной, заставляя ее расширяться в бешеном темпе, постоянно выметывая новые островные вселенные, подобные нашей.

Энергия распада ложного вакуума зажигает горячий огненный шар из элементарных частиц, запускает процесс образования гелия и все последующие события стандартной космологии Большого взрыва. Таким образом, момент окончания инфляции играет в этом сценарии роль Большого взрыва. Если их отождествить, то нам уже не надо считать Большой взрыв одномоментным событием в нашем прошлом. Множество таких взрывов отгремело до него в отдаленных частях Вселенной, и бессчетное число других еще произойдет повсюду в будущем¹.



Едва в голове у меня сложилась эта новая картина мира, я уже изнемогал от желания поделиться ею с другими космологами. И кто бы мог лучше подойти на роль моего первого конфиден-та, чем сам мистер Инфляция — Алан Гут, чей офис в МТИ (Массачусетский технологический институт) был всего в двадцати минутах езды от Тафтса? Так что я просто сел в машину и поехал в знаменитый институт на встречу с Аланом.

МТИ занимает громадный комплекс сооружений, где я не раз безнадежно терялся. Можно идти по коридору третьего эта-

1 Во избежание путаницы с этого момента я буду пользоваться термином “Большой взрыв” для обозначения конца инфляции, а начальное (или конечное) состояние с бесконечной кривизной и плотностью буду называть сингулярностью.

жа корпуса шесть и вдруг обнаружить, что уже находишься на четвертом этаже корпуса шестнадцать. Я решил не рисковать и выбрал простейший, хотя и самый длинный путь к цели — через главный вход (выделяющийся рядом коринфских колонн и увенчанный сверху зеленым куполом). Пройдя весь Бесконечный Коридор и поднявшись на несколько лестничных пролетов, я в итоге достиг офиса Гута.

Я рассказал Алану о случайном блуждании скалярного поля и о том, как описать его математически. И тут, в самой середине описания моей новой поразительной картины мира, я заметил, что Алан стал засыпать. Много лет спустя, узнав его получше, я понял, что он вообще очень сонлив. Мы организовали совместный семинар для космологов Бостона и окрестностей, и на каждом заседании Алан мирно засыпал спустя несколько минут после начала доклада. Удивительным образом, когда выступление заканчивалось, он просыпался и задавал самые глубокие вопросы. Алан отрицал наличие у него каких бы то ни было сверхъестественных способностей, но не все в это верили.

Оглядываясь назад, я понимаю, что должен был продолжать, но в то время, не зная о волшебной способности Алана, я быстро закруглился. Другие коллеги в своих отзывах тоже не проявляли энтузиазма. Физика — это наблюдательная наука, говорили они, так что мы должны воздерживаться от утверждений, которые не допускают проверки. Невозможно наблюдать ни другие большие взрывы, ни отдаленные области, где продолжается инфляция. Все они лежат за нашим горизонтом, и как нам убедиться в их реальном существовании? Я был сильно разочарован таким холодным приемом и решил включить эту работу в качестве раздела в статью по другой теме, посчитав, что она не заслуживает отдельной самостоятельной публикации¹.

Для объяснения идеи вечной инфляции в этой статье я использовал аналогию прогулки пьяницы у вершины холма. Пару

месяцев спустя мне пришло письмо от редактора, в котором говорилось, что статья принята, за исключением того, что обсуждение пьяниц “неприемлемо для такого солидного журнала, как *The Physical Review*”, и я должен заменить его более подходящей аналогией. Я слышал, что подобный инцидент произошел ранее с Сиднеем Коулманом. В его статье была диаграмма, которая выглядела как кружок с волнистым хвостиком. Коулман называл ее “диаграммой-головастиком”. Как вы уже поняли, редактор счел и этот термин неприемлемым. “О’кей, — ответил Коулман, — давайте назовем ее диаграммой-сперматозоидом”. В итоге без дальнейших комментариев была принята исходная версия статьи. Я прикинул возможность применить тактику Коулмана, но в итоге отказался от нее — не хотелось ввязываться в драку.

Я не возвращался к теории вечной инфляции почти 10 лет. Если не считать одного эпизода...

МГНОВЕНИЕ ВЕЧНОСТИ

Я переключился на работу, связанную с другими моими научными интересами, и постепенно мне самому стало казаться странным, что я был так одержим ненаблюдаемыми мирами. Но, по правде сказать, соблазн бросить взгляд за горизонт Вселенной никуда не девался. В 1986 году, не в силах ему больше противиться, мы с моим аспирантом Мукундой Арьялом (Mukunda Aryal) разработали компьютерную модель вечной инфляционной Вселенной.

Мне трудно даются технологии, и я в жизни не написал ни единой строчки программного кода. Но я очень хорошо понимаю, как “думают” компьютеры, и руководил несколькими крупными вычислительными проектами моих аспирантов. Поскольку я не мог проверять их код (а даже если б мог, не думаю,

что это доставляло бы мне хоть какое-то удовольствие), я всегда опасался скрытых ошибок и относился к получаемым результатам с большой осторожностью. Поэтому я заставил Мукунду выполнить множество проверок, запуская моделирование для тривиальных случаев, где мы знали ответ заранее. Наконец, убедившись, что все работает отлично, мы приступили к настоящей работе.

Моделирование началось с маленького участка ложного вакуума, представленного светлым прямоугольником на экране компьютера. Спустя некоторое время стали появляться первые темные островки истинного вакуума. По мере того как границы этих островных вселенных продвигались в море инфляции, они быстро росли в размерах. Однако инфлирующая область расширялась еще быстрее, так что интервалы, разделяющие островные вселенные, увеличивались, а во вновь образованном пространстве возникали новые островные вселенные^{II}.

На картине, открывшейся после некоторого времени моделирования, были видны крупные островные вселенные, окруженные меньшими, вокруг которых располагались еще меньшие, и так далее. Это напоминало вид архипелага с самолета — узор, который математики называют фрактальным. На рис. 8.3 показан результат похожего, но более сложного моделирования, выполненного позднее моими студентами Виталием Ванчуриным и Сергеем Виницким (Vitaly Vanchurin and Serge Winitzki).

Мы с Мукундой опубликовали результаты моделирования в европейском журнале *Physics Letters*^{III}. Мое любопытство в отношении ненаблюдаемых вселенных теперь было удовлетворено, и я переключился на другие работы. А данным вопросом тем временем вплотную занялся Андрей Линде.

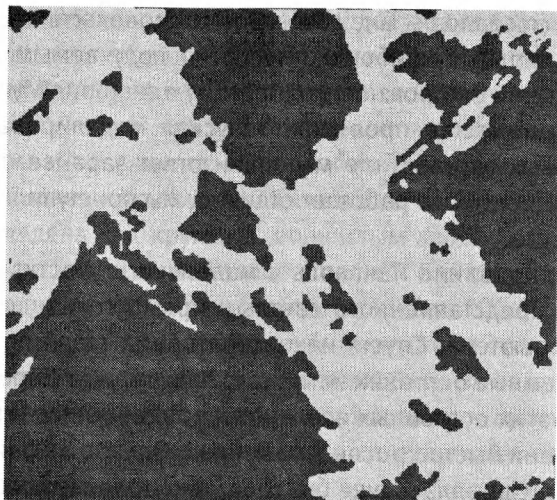


Рис. 8.3. Смоделированная на компьютере Вселенная с вечной инфляцией. Островные вселенные (темные) на фоне инфляционно раздувающегося ложного вакуума (светлого). Более крупные островные вселенные — самые старые: у них было больше времени для роста.

ХАОТИЧЕСКАЯ ИНФЛЯЦИЯ ЛИНДЕ

Линде — настоящий герой инфляции, человек, который спас теорию посредством изобретения приплюснутого энергетического холма для скалярного поля. С 1983 года он работал над идеей о том, что Вселенная начинается из состояния перманентного хаоса. Скалярное поле в этом состоянии беспорядочно меняется от точки к точке. В некоторых областях оно оказывается на вершине энергетического холма, и в таких местах происходит инфляция.

Линде понял, что полю не обязательно стартовать в верхней точке энергетического ландшафта. Оно может начинать скатываться вниз и с какой-то другой точки на склоне. Фактически

энергетический холм может и не иметь верхней точки, вздымаясь вверх без ограничений (рис. 8.4). У такого лишенного вершины — так сказать, топлес — холма есть дно — истинный вакуум, но нет определенного места для ложного вакуума. Его роль может играть любая точка на склоне, куда поле попало в исходном хаотическом состоянии, лишь бы это было достаточно высоко, чтобы обеспечить необходимое для инфляции время скатывания. Линде описал эти идеи в статье, озаглавленной “Хаотическая инфляция”.



Рис. 8.4. Скалярное поле скатывается со склона “безверного” энергетического холма.

Еще через несколько лет Линде изучил влияние квантовых флуктуаций на скалярное поле в данном сценарии. Неожиданно оказалось, что они тоже могут приводить к вечной инфляции, несмотря даже на то, что у энергетического холма нет плоской вершины.

Ключевое наблюдение Линде заключалось в том, что на больших высотах квантовые флуктуации становятся сильнее и могут толкать поле вверх против сил, тянущих его вниз по

склону. Так что, если поле стартует высоко, оно не обращает большого внимания на склон и совершает случайные блуждания, как если бы находилось на вершине холма. Когда блуждания заносят его в низины энергетического ландшафта, где квантовые флуктуации слабее, поле начинает упорядоченно катиться вниз к состоянию истинного вакуума. Чтобы это случилось, требуется намного больше времени, чем на инфляционное удвоение, так что расширяющиеся области размножаются быстрее, чем распадаются, что опять же приводит к вечной инфляции.

Здесь я должен остановиться и прояснить терминологическое недоразумение, связанное с данной темой. Вечную инфляцию часто путают с хаотической, хотя это совсем разные вещи. Название “хаотическая” указывает на случайность начального состояния и не имеет никакого отношения к вечному характеру инфляции. Линде показал, что хаотическая инфляция также может быть вечной, но этим связь между теориями исчерпывается. Для ясности я в дальнейшем ограничусь обсуждением первоначальной модели инфляции с приплюснутым энергетическим холмом. Вечная инфляция на безверхом холме выглядит похожим образом.

Статья Линде о вечной инфляции вызвала не больше энтузиазма, чем моя, опубликованная тремя годами раньше^{iv}. Однако его реакция была иной. Он не сдавал позиций, продолжал исследования по данному направлению и неоднократно выступал с докладами о своих результатах. Тем не менее физическое сообщество не поддавалось его нажиму. Понадобилось почти двадцать лет, чтобы удача повернулась лицом к вечной инфляции.

ГЛАВА 9

Говорящие небеса

Когда в 1980 году Алан Гут предложил теорию инфляции, это была не более чем спекулятивная гипотеза. Но к концу 1990-х она уже была близка к тому, чтобы стать краеугольным камнем современной космологии. Появившиеся новые наблюдения подтвердили предсказания теории, причем весьма неожиданным способом.

ВОЗВРАЩЕНИЕ КОСМОЛОГИЧЕСКОЙ ПОСТОЯННОЙ

Самое главное предсказание инфляции состоит в том, что наблюдаемая область Вселенной должна быть плоской, то есть иметь евклидову геометрию. Вселенная в целом вполне может быть сферической или иметь более сложную форму, но наш горизонт охватывает лишь крошечную ее часть, и поэтому мы не можем отличить ее геометрию от плоской. Как уже говорилось в главе 4, это утверждение эквивалентно тому, что средняя плотность Вселенной должна быть с очень высокой точностью равна критической.

В период появления теории инфляции астрономы относились к ее предсказаниям весьма скептически. Обычное вещество, состоящее из протонов, нейтронов и электронов, обеспечивает лишь несколько процентов от критической плотности. Существует также намного большее количество так называемой *темной материи*, состоящей из каких-то неизвестных частиц. В соответствии с ее названием темную материю нельзя наблюдать непосредственно, но ее присутствие проявляется гравитационным притяжением, действующим на видимые объекты. Наблюдения за движением звезд и галактик говорят о том, что масса темной материи примерно в десять раз больше массы обычной. И все-таки, даже если сложить оба этих вида массы, во Вселенной набирается лишь около 30 процентов критической плотности, до нужного значения не хватает еще 70 процентов.

Таковы были представления до 1998 года, когда две независимые исследовательские группы объявили о поразительном открытии¹. Они измерили яркость взрывов сверхновых в далеких галактиках и использовали эти данные для уточнения истории космологического расширения¹. К своему огромному удивлению, они обнаружили, что вместо замедления под действием гравитации скорость расширения в действительности возрастает. Это открытие говорило о том, что Вселенная заполнена некой гравитационно отталкивающей субстанцией. Простейшая возможность состоит в том, что истинный вакуум, в котором мы обитаем, имеет ненулевую плотность массы². Как мы

- 1 Расстояние до сверхновой, которое определяется по ее видимому с Земли блеску, говорит о том, как долго свет от нее шел к нам, а значит, и о том, когда случился взрыв. Покраснение света (доплеровское смещение) можно использовать для оценки скорости космологического расширения в то время. Подробнее об этом см. главу 14.
- 2 В следующих главах будут упомянуты некоторые другие возможности. Многие физики склонны к агностицизму в отношении причин космологического ускорения и говорят о нем как о "темной энергии".

знаем, вакуум является гравитационно отталкивающим, и если его плотность превышает половину плотности массы вещества, суммарным результатом будет отталкивание.

Плотность массы истинного вакуума — это то, что Эйнштейн называл космологической постоянной, идея, которую он сам объявил своей величайшей ошибкой. Она была похоронена почти на 70 лет, но сегодня, похоже, не выглядит такой уж неудачной. Как мы увидим далее, неожиданное возвращение космологической постоянной привело к глубокому кризису в физике элементарных частиц. Однако для теории инфляции это стало чрезвычайно благоприятным поворотом событий. Плотность массы вакуума, оцененная по величине космологического ускорения, составляет около 70 процентов критической плотности — в точности столько, сколько требуется, чтобы сделать Вселенную плоской!

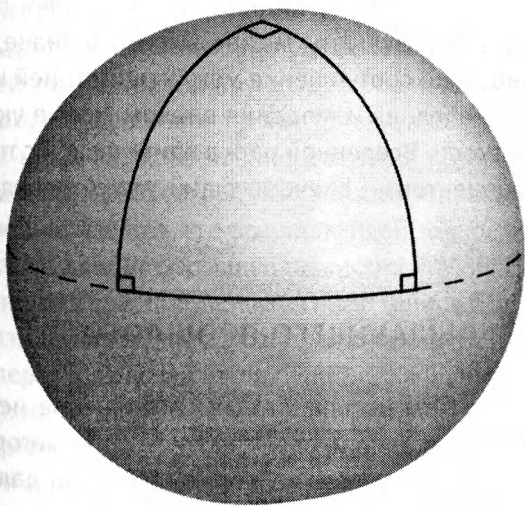


Рис. 9.1. В сферической вселенной сумма углов треугольника превышает 180 градусов. На этом рисунке треугольник имеет три прямых угла, что в сумме дает 270 градусов.

Этот вывод был позднее подтвержден наблюдениями космического микроволнового излучения. Вместо того чтобы полагаться на фридмановскую связь между геометрией Вселенной и ее плотностью, микроволновые наблюдения позволяют напрямую определить геометрию пространства — по сути, путем измерения суммы углов огромного узкого треугольника, одна вершина которого находится на Земле, а две другие — в точках испускания микроволн, приходящих к нам от двух близких точек на небе. (Длинные стороны этих треугольников имеют сегодня протяженность около 40 миллиардов световых лет.) В плоском пространстве, как известно еще со школьных уроков геометрии, сумма углов должна составлять 180 градусов. Большее значение суммы трех углов будет указывать на замкнутую Вселенную со сферической геометрией (рис. 9.1), а меньшее — на открытую с седлообразной. Микроволновые наблюдения показывают, что в действительности сумма углов очень близка к значению, которое соответствует плоскому пространству. Эти результаты можно выразить иначе, используя фридмановское соотношение между геометрией и плотностью. Самые последние измерения в таком случае указывают на то, что плотность Вселенной равна критической с точностью не хуже 2 процентов — впечатляющий успех инфляционной космологии.

ОБРАЗЫ ПЫЛАЮЩЕГО ПРОШЛОГО

Другим триумфом инфляции было объяснение небольших возмущений плотности, едва заметной ряби, которая позднее превратилась в галактики. Теория инфляции дала четкое предсказание: величина возмущений должна быть примерно одинаковой на всех астрофизических масштабах длины — от характерных межзвездных расстояний (в несколько световых

лет) и вплоть до размеров всей видимой Вселенной. К началу 1990-х наблюдатели были готовы проверить это предсказание.

Как уже говорилось в главе 4, первичная рябь оставляет отпечаток в фоновом космическом излучении. Это послесвечение Большого взрыва было испущено 13 миллиардов лет назад и сейчас приходит к нам со всех направлений на небе. С самого открытия этого излучения в середине 1960-х годов космологи догадывались, что в нем скрыт образ ранней Вселенной. Однако первичные неоднородности были столь малы — всего одна сотысячная от средней интенсивности, — что долгие годы оставались за пределами точности измерений, и наблюдался лишь идеально однородный фон. Прорыв случился в 1992 году, когда был запущен спутник COBE (Cosmic Background Explorer, “исследователь космического фона”). Он построил полную карту неба, измерив излучение, приходящее со всех направлений, и впервые смог различить едва заметные вариации его интенсивности.

Карта COBE напоминает расфокусированную фотографию: на ней видны только крупные особенности космического огненного шара, а более тонкие детали, меньше примерно 7 градусов на небе, совершенно размыты. (Для сравнения: Луна видна под углом полградуса.) За COBE последовала серия других экспериментов все возрастающей точности. Последним из них стала другая спутниковая миссия WMAP. На изображении огненного шара, полученном WMAP (рис. 4.2), различимы детали размером в $1/5$ градуса, то есть оно в 30 раз более резкое, чем первоначальная карта COBE.

По мере сбора данных постепенно, шаг за шагом, проступала картина первичной ряби. И, что поразительно, она оказывалась в полном согласии с предсказаниями теории инфляции! Эти свидетельства ранней горячей эпохи оставались на небе миллиарды лет, дожидаясь, пока их откроют и расшифруют. И вот теперь небеса наконец заговорили.

В ближайшие годы инфляции предстоит пройти через серию новых наблюдательных проверок. Физическая теория может подтверждаться экспериментом, но никогда не может быть доказана. С другой стороны, одного твердо установленного факта достаточно, чтобы ее опровергнуть. Например, инфляция предсказывает, что плотность должна быть равна критической с точностью 1 к 100 000. Так что, если будущий эксперимент обнаружит более значительное отклонение, инфляция окажется в трудном положенииⁱⁱ.

Новое поколение миссий по исследованию микроволнового фона включает спутник “Планк”¹, который еще более повысит разрешение изображения, а также наземную обсерваторию QUIET, которая будет с высокой точностью измерять ориентацию электрического поля (поляризацию) микроволн. Поляризационный узор чувствителен к наличию гравитационных волн — крошечных вибраций геометрии пространства-времени. Этот эффект может служить для проверки еще одного предсказания инфляционной теории: мы должны быть погружены в гравитационно-волновое море с очень широким спектром длин волн — от размеров меньше Солнечной системы и до самых больших наблюдаемых масштабовⁱⁱⁱ. Амплитуда этих волн определяется энергией ложного вакуума — движущей силы инфляции. Чем выше энергия, тем больше волны. Так что, если QUIET зарегистрирует гравитационные колебания, мы получим возможность определить энергию ложного вакуума, вызывающего инфляционное расширение^{iv}. Это стало бы важным шагом к пониманию инфляции и ее связи с физикой микромира.

1 Он назван в честь первооткрывателя квантовой физики Макса Планка, который вывел формулу, описывающую, как энергия теплового излучения распределена между волнами различной частоты. Спутник был запущен 14 мая 2009 года.

По мере поступления новых данных мои мысли все чаще обращались к заброшенной идее вечной инфляции. Главным аргументом против нее было то, что она рассматривает Вселенную за нашим горизонтом, которая недоступна для наблюдения. Но если теория инфляции поддерживается данными в наблюдаемой части Вселенной, не следует ли нам доверять и ее заключениям о регионах, которые мы не можем наблюдать?

Если я брошу камень в черную дыру, то, используя теорию относительности, смогу описать, как он падает к ее центру и как разрушается и испаряется под действием колоссальных гравитационных сил. Все это невозможно наблюдать снаружи, поскольку ни свет, ни какой-либо другой сигнал не может вырваться изнутри черной дыры. И все же лишь немногие поставят под вопрос точность моего описания. У нас есть все основания полагать, что теория относительности действует внутри черных дыр точно так же, как и снаружи. То же самое можно теперь сказать и про теорию инфляции. Надо попробовать извлечь из нее все, что она может рассказать о величественном устройстве Вселенной, ее происхождении и конечной судьбе.

ГЛАВА 10

Бесконечные острова

Я бы и в ореховой скорлупе считал себя
властелином необъятного пространства.
ШЕКСПИР, "ГАМЛЕТ" (ПЕР. К.Р. (КОНСТАНТИНА РОМАНОВА))

БУДУЩЕЕ ЦИВИЛИЗАЦИЙ

Вопрос, заставивший меня думать о вечной инфляции, больше напоминает научную фантастику, чем физику. Он касался будущего разумной жизни во Вселенной. Отдаленные перспективы любой появившейся цивилизации выглядят довольно мрачными. Даже если она избежит природных катастроф и самоуничтожения, она в конце концов лишится энергии. Звезды рано или поздно умирают, и все остальные источники энергии тоже исчерпываются. Но теперь вечная инфляция, похоже, дает некоторую надежду.

Умрут звезды в наших космических окрестностях, но бесконечное число новых звезд появится в будущих больших взрывах бесконечной инфляции. Видимая нам область — это лишь крошечная часть одного острова Вселенной, затерянного в ин-

фляционном море ложного вакуума (см. рис. 8.3). Посреди этого моря постоянно возникают новые островные вселенные с мириадами новых звезд.

На самом деле образование звезд будет продолжаться всегда, даже внутри нашей собственной островной вселенной. Ее границы все время наступают на инфляционное море. Их неумолимое продвижение вызвано распадом ложного вакуума в прилегающих инфляционных областях. Фактически эти границы — это области, где Большой взрыв происходит прямо сейчас¹. Вновь образовавшиеся вселенные микроскопически малы, но с возрастом они безгранично растут. Центральные части больших островов Вселенной очень старые. Они темны и пустыны: все звезды здесь давно умерли, а жизнь исчезла. Но области по краям островов совсем молодые и должны быть полны сияющих звезд.

Высокоразвитая цивилизация может захотеть отправить миссию для колонизации вновь образовавшихся звездных систем у границы своего острова. На худой конец, они могут хотя бы послать сообщение новым цивилизациям, развивающимся вблизи границы или в других островных вселенных. Те цивилизации могут, в свою очередь, послать сообщения следующим, и так далее. Если мы пойдем по этому пути, то можем стать ветвью вечно растущего “древа” цивилизаций, и наша аккумулированная мудрость не будет полностью потеряна.

Эти сценарии предложил Андрей Линде в статье “Жизнь после инфляции”¹, и мне захотелось узнать, возможен ли хоть один из них в действительности, по крайней мере в принципе. Линде проанализировал различные аспекты этой проблемы, но не пришел к какому-то определенному выводу. Тот факт, что где-то во Вселенной звезды образовались позже, чем здесь,

¹ Напомним, что мы договорились отождествлять Большой взрыв с концом инфляции.

еще не означает, что мы можем попасть туда за доступное время. С другой стороны, благодаря Эйнштейну мы знаем, что понятия “раньше” и “позже” не абсолютны и могут зависеть от наблюдателя. Чтобы продвинуться в решении данной задачи, мне надо было понять структуру пространства-времени вечно инфлирующей Вселенной.

Как говорилось в главе 2, пространство и время в теории относительности объединены в четырехмерную сущность, называемую пространством-временем. Точка в нем — это событие, имеющее определенное положение и время. Рассмотрим два события, которые могли бы привлечь ваше внимание, — например, встречу выпускников вашего класса здесь, на Земле, и межзвездный матч по суперболу, запланированный через 3 года на альфе Центавра, удаленной от нас примерно на 4 световых года. Вопрос: можете ли вы успеть на оба эти мероприятия?

Ответ можно найти, вычислив так называемый пространственно-временной *интервал* между двумя событиями. В пространстве-времени он играет роль, аналогичную расстоянию между точками в пространстве. Его математическое определение сейчас несущественно; зато важно, что интервалы могут быть двух типов: *пространственно-подобные* и *времени-подобные*. Интервал времени-подобен, если материальный объект может добраться от одного события до другого, не нарушая базового принципа теории относительности — невозможности двигаться быстрее скорости света”. В этом случае все наблюдатели согласятся, какое из двух событий произошло раньше, а какое — позже. Напротив, если добраться от одного события до другого невозможно (то есть если это требует сверхсветовой скорости), — интервал пространственно-подобный. Ни одно из этих двух событий не может быть причиной другого. Эйнштейн показал, что временной порядок таких событий зависит от наблюдателя и всегда можно найти наблюдателя, для которого они происходят одновременно.

В нашем примере с альфой Центавра интервал оказывается пространственно-подобным, так что вам придется выбрать, какому событию отдать предпочтение. Конечно, в данном случае нетрудно получить ответ, даже не вычисляя интервал. За три года свет проходит путь в три световых года, а чтобы преодолеть четыре — расстояние до альфы Центавра, — вам пришлось бы двигаться быстрее света. В искривленном пространстве-времени вселенной с бесконечной инфляцией анализ несколько усложняется, и вычислять интервал все-таки приходится.

Пространство-время островной вселенной схематически изображено на рисунке 10.1. Вертикальное направление соответствует времени, а горизонтальное — одному из трех пространственных измерений; два других измерения опущены. Каждая горизонтальная линия — это мгновенный снимок вселенной в некоторый момент времени. Историю островной вселенной можно проследить, начиная с горизонтальной пунктирной линии, помеченной “до”, в нижней части рисунка и постепенно двигаясь вверх. (Момент времени, соответствующий этой линии, относится к инфлирующей части пространства-времени, где островная вселенная еще не образовалась.) Толстая сплошная линия, помеченная словами “Большой взрыв”, — это граница между островной вселенной и инфлирующей частью пространства-времени. Точка, отмеченная черной галактикой, — это “здесь и сейчас”, а белыми галактиками обозначены области, где условия похожи на те, что сегодня мы наблюдаем вокруг себя. Горизонтальная пунктирная линия, помеченная “сейчас”, изображает настоящее время. Она соответствует островной вселенной с пустынным центральным регионом и областями звездообразования вблизи границ.

Несложный расчет показывает, что все Большие взрывы, расположенные вдоль сплошной линии на рисунке, разделены пространственно-подобными интервалами. Для меня это стало

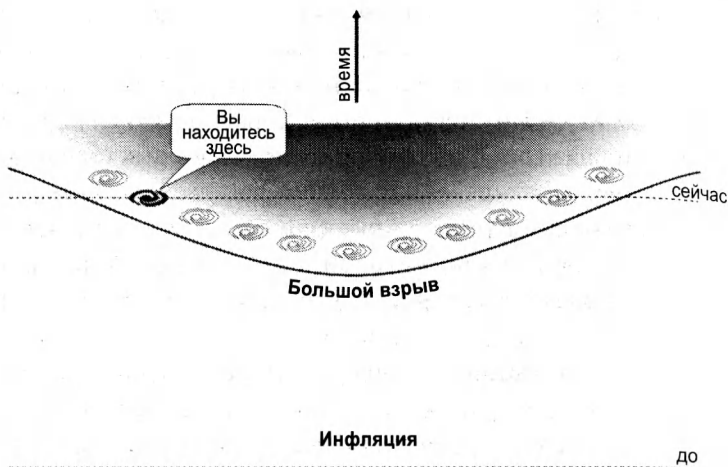


Рис. 10.1. Пространственно-временная диаграмма островной вселенной (вид извне).

важнейшим наблюдением, которое позволило сформулировать мой собственный ответ на вопрос о будущем цивилизаций. Оно также полностью изменило мои представления об островных вселенных.

Пространственно-подобный тип интервалов говорит о невозможности попасть от одного события Большого взрыва к какому-либо другому. Иными словами, вы не можете держаться на краю островной вселенной, поскольку ее края раздвигаются быстрее света. Выходит, мы никогда не сможем достичь берегов инфляционного моря и погреться в лучах новых солнц, которые будут там рождены. И мы не можем послать никакого сообщения будущим цивилизациям, которые разовьются вокруг этих солнц, поскольку никакой сигнал не может распространяться быстрее света. Печально, но вечная инфляция, похоже, не благоприятствует долгосрочным перспективам человечества.

Возможно, вас удивляет сверхсветовое расширение островных вселенных, поскольку оно выглядит противоречащим эйнштейновскому запрету на движение быстрее света. Однако этот запрет весьма избирателен: он относится только к движению материальных объектов (включая излучение, такое как световые или гравитационные волны) друг относительно друга, тогда как границы островной вселенной — это геометрические сущности, которые не обладают какой-либо массой или энергией. Сверхсветовое расширение границ означает, что последовательные Большие взрывы не могут быть причинно связаны между собой. Они не похожи на домино, где падение одной костяшки вызывает падение следующей. Распространение распада вакуума предопределяется рисунком скалярного поля, порожденным во время инфляции. Поле меняется в пространстве очень плавно, и в результате вакуум в соседних областях распадается почти одновременно. Вот почему Большие взрывы следуют друг за другом в такой быстрой последовательности, а граница расширяется столь стремительно.

ВРЕМЯ НЕ ИМЕЕТ ЗНАЧЕНИЯ

Признаюсь Тебе, Господи, я до сих пор не знаю,
что такое время.
Святой Августин

Но что же мы все-таки имеем в виду, говоря о том, что Большой взрыв у границы островной вселенной случился позже, чем в ее центральной области? Раз все интервалы между всеми событиями Большого взрыва пространственно-подобны, значит, между наблюдателями будут разногласия по вопросу о том, какое из этих событий случилось раньше, а какое позже. Кому из них мы должны верить? Сейчас мы постараемся

прояснить этот вопрос. Наш анализ может показаться довольно запутанным, но его стоит проделать, поскольку он приведет нас к некоторым далеко идущим выводам.

В качестве разминки рассмотрим сначала однородную вселенную, описываемую одной из моделей Фридмана. В любой момент времени материя в ней однородно распределена в пространстве. Может показаться, что это тривиально, но мы должны определить, что значит “момент времени”.

Когда космологи говорят о “моменте времени”, они представляют себе огромное число наблюдателей, снабженных часами и разбросанных по всей вселенной. Каждый наблюдатель видит лишь небольшую область непосредственно вокруг себя, так что для описания вселенной в целом необходимо все сообщество наблюдателей. Мы можем считать себя одним из его членов. Наши часы сейчас показывают 14 миллиардов лет ПБВ¹. “То же самое время” в другой части вселенной наступит, когда на часах находящегося там наблюдателя появятся те же показания. Мы должны решить теперь, как наблюдателям, находящимся за горизонтом друг друга, синхронизировать свои часы.

В случае фридмановской вселенной ответ очевиден: в ней Большой взрыв — это естественное начало времен, так что каждый наблюдатель должен отсчитывать время от него². При таком определении одновременности плотность материи, измеренная всеми наблюдателями в одно и то же время, окажется одинаковой, а значит, вселенная будет однородной.

В принципе допустимо рассматривать совокупность наблюдателей, чьи часы выставлены по-разному. Например, мы мо-

1 Как и раньше, ПБВ означает “после Большого взрыва”.

2 Состояние движения наблюдателя также влияет на показания его часов. Еще раз подчеркнем, что во вселенной Фридмана существует естественный выбор: наблюдатели, которые покоятся по отношению к галактикам (или частицам вещества) в местах своего размещения. Это так называемые “сопутствующие наблюдатели”.

жем сместить начало отсчета времени на некоторую величину относительно Большого взрыва и сделать так, чтобы эта величина менялась от одной области пространства к другой. Тогда вселенная будет выглядеть очень сложной и неоднородной. Разумеется, никто в здравом уме не станет использовать такое описание. Оно значительно усложняет анализ и скрывает истинную природу фридмановской вселенной. Но не всегда все бывает так просто.

Возвращаясь к вселенной с бесконечной инфляцией, рассмотрим сначала крупную область, подобную той, что показана на рисунке 8.3, включающую как островные вселенные, так и зоны, охваченные инфляцией. В такой области нельзя естественным образом выбрать начало отсчета времени. Поэтому определение “момента времени” становится в значительной мере произвольным, единственное условие состоит в том, что все события “момента” должны быть разделены пространственно-подобными интервалами. Если выбрать начальный момент достаточно рано, когда вся область находится в состоянии ложного вакуума, в дальнейшем в ней, как мы уже обсуждали в предыдущей главе, появятся и станут расширяться островные вселенные. Однако порядок их появления, а также темп и формы, приобретаемые ими по мере расширения, могут весьма сильно меняться в зависимости от выбора начального момента.

Допустим теперь, что мы интересуемся одной конкретной островной вселенной и хотим описать ее с точки зрения ее обитателей. Тогда ситуация оказывается совершенно иной. Как и в случае фридмановской вселенной, существует естественный выбор для начала времени. Все населяющие островную вселенную наблюдатели могут отсчитывать его от Большого взрыва — каждый в своем месте. Другими словами, Большой взрыв можно выбрать в качестве начального “момента времени”. Такой выбор ведет к новой, радикально отличающейся картине островной вселенной. Чтобы различать описания большой об-

ласти и отдельного острова, договоримся называть их соответственно внешним (глобальным) видом и внутренним (локальным).

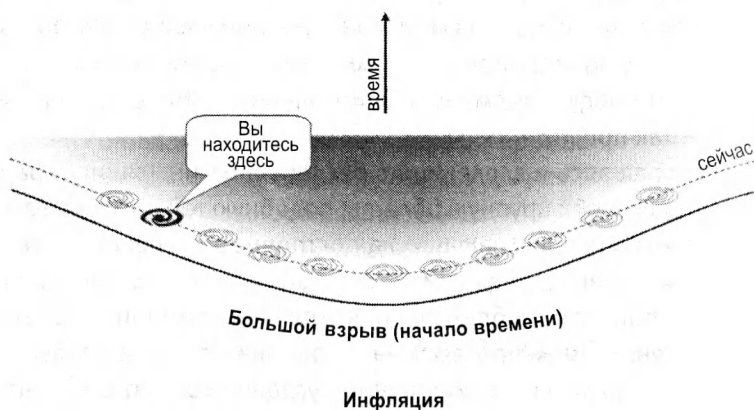


Рис. 10.2. Внутренний вид пространства-времени островной вселенной.

Внутренний вид островной вселенной представлен на рисунке 10.2. Как и раньше, момент Большого взрыва изображен сплошной кривой, помеченной “Большой взрыв”. Плотность вещества во всех событиях на этой кривой практически одинакова и определяется плотностью распадающегося ложного вакуума. Таким образом, на локальном виде островная вселенная почти однородна. Настоящий момент времени здесь представлен пунктирной линией, помеченной “сейчас”, которая совпадает с рядом галактик на рисунке. Все точки на этой линии характеризуются одинаковой средней плотностью вещества и одинаковой концентрацией звезд — такой же, как наблюдается вблизи нас. Но самое замечательное — с локальной точки зрения островная вселенная бесконечна!

На глобальном виде островная вселенная растет по мере распространения Большого взрыва по ее границам, и, если по-

дождать достаточно долго, она станет сколь угодно большой. Однако с локальной точки зрения Большой взрыв случился единомоментно, а островная вселенная была бесконечно велика с самого начала. На рисунке 10.2 этой бесконечности соответствует тот факт, что сплошная линия Большого взрыва нигде не заканчивается. Если продолжить эту кривую, то ее отдаленные точки будут соответствовать все более поздним событиям Большого взрыва с глобальной точки зрения и все более далеким областям в начальный момент — с локальной. Бесконечность времени в рамках одного взгляда трансформируется в бесконечность пространства в рамках другой.

БОЛЬШАЯ КАРТИНА

Попробуем подвести краткие итоги. Если бы каким-то образом нам удалось извне наблюдать Вселенную бесконечной инфляции, подобно тому как наблюдают Землю из космоса, мы увидели бы множество вселенных, разбросанных по обширному инфляционному морю ложного вакуума. В случае замкнутости Вселенной открывшийся перед нами вид мог бы чем-то напоминать глобус с континентами и архипелагами, окруженными океаном¹. Этот глобус с ошеломительной скоростью расширяется, островные вселенные тоже чрезвычайно быстро увеличиваются, а между ними постоянно появляются крошечные новые острова и немедленно принимаются расти. Число островных вселенных быстро умножается и становится бесконечным в пределе бесконечного будущего.

Обитатели островных вселенных, подобно нам, видят совершенно иную картину. Их вселенная не воспринимается ими как конечного размера остров. Она представляется им само-

¹ С той оговоркой, что замкнутая Вселенная подобна трехмерной сфере, тогда как поверхность Земли имеет только два измерения.

стоятельной бесконечной вселенной. Граница между их вселенной и инфляционной частью пространства-времени — это Большой взрыв, случившийся в определенный момент в прошлом. Мы не можем добраться до инфляционного моря просто потому, что невозможно переместиться в прошлое.

Весьма примечательно, что “большая” Вселенная, содержащая все бесконечные островные вселенные, может быть замкнутой и конечной. Кажущееся противоречие разрешается, если принять во внимание, что понятие внутреннего времени в островных вселенных отличается от “глобального” времени, которое надо использовать для описания пространства-времени в целом. В глобальном времени внешние части островных

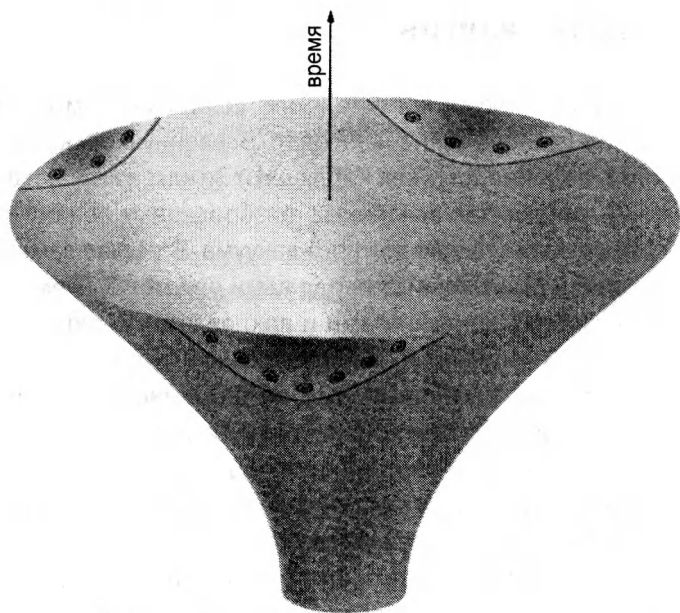


Рис. 10.3. Пространство-время одномерной замкнутой Вселенной с бесконечной инфляцией. Эта Вселенная заполнена ложным вакуумом в начальный момент времени (внизу рисунка) и содержит три островных вселенных к моменту, соответствующему верхнему краю диаграммы.

вселенных еще не образовались и завершат свое формирование лишь в бесконечно отдаленном будущем, тогда как во внутреннем времени островная вселенная возникает единомоментно. Структура пространства-времени замкнутой Вселенной бесконечной инфляции изображена на рисунке 10.3.

Неожиданная особенность островных вселенных, состоящая в том, что изнутри они выглядят бесконечными, оказалась весьма важной: в дальнейшем она привела меня к выводу, который, возможно, является самым поразительным следствием вечной инфляции.

ГЛАВА 11

Да здравствует король!

Не должны ли все вещи, которые могут случиться,
уже случиться, произойти, быть совершены в прошлом?
Ф. Ницше

КАДАКЕС

Первые проблески идеи появились у меня летом 2000 года. Как это часто бывает, мне захотелось немедленно ими поделиться. Можно заслужить больше чести и известности, если трудиться в одиночку, но работать в команде куда увлекательней! И если вам повезло с коллегами, это занятие может доставит настоящую радость. Так случилось, что наш городок посетил тогда мой старый друг Хауме Гаррига (Jaume Garriga). Стоило поделиться с ним, и он мгновенно ухватил мои мысли.

Хауме общается в мягкой и тихой манере. Он мало говорит, но всегда высказывает то, что думает. В этот раз он произнес: “Очень ликвидная идея”. Не то чтобы это было одобрением. Он имел в виду, что данная идея выглядит более привлекательной для прессы, чем для физиков. Но я понял, что она зацепила Ха-

уме. Он уже готовился к отъезду в свою родную Каталонию, и мы договорились продолжить дискуссию в ходе моего визита в Барселонский университет, где он работал.

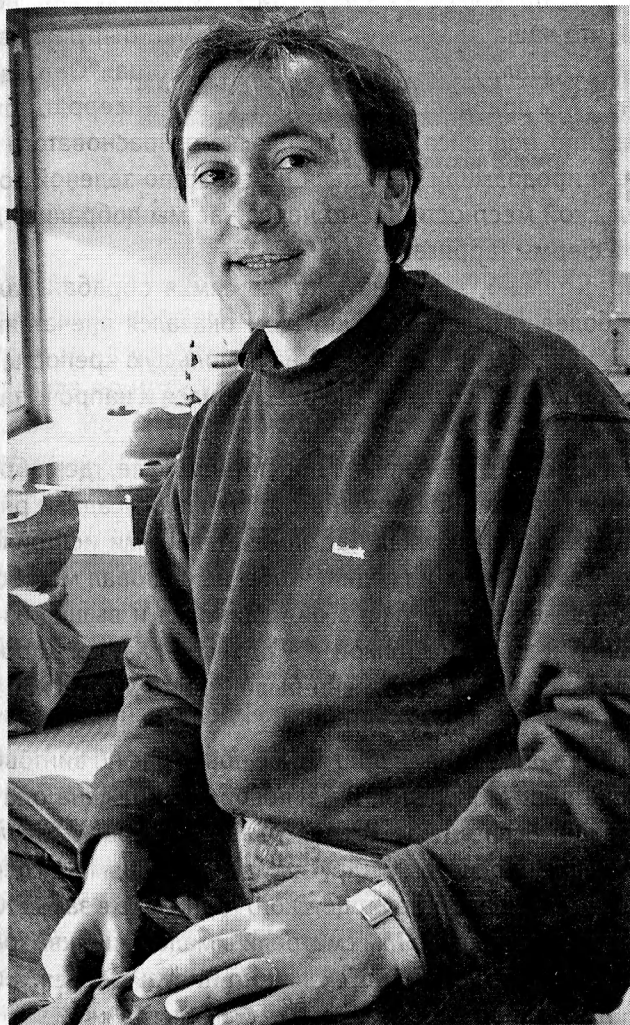


Рис. 11.1. Хауме Гаррига (фото Такахиро Танака).

Спустя два месяца Хауме встречал нас с женой в барселонском аэропорту. Мы прибыли на выходных, так что оставалось два дня до начала моего “официального” визита. Я сгорал от нетерпения продолжить наши физические дискуссии, но оказалось, что наша программа уже расписана. Вырулив на шоссе, Хауме сказал, что мы едем на ферму его отца: “Они ждут нас к ужину”. Мы преодолели горный массив Монтсеррат, который неожиданно поднялся посреди плоского красноватого ландшафта, и продолжили двигаться на север по зеленой холмистой сельской местности. Где-то через час мы добрались до семейной фермы Гаррига.

Поразительно, что одна и та же семья обрабатывала эту землю более 750 лет. Сельский дом оказался впечатляющим каталонским “масиа”¹, похожим на небольшую крепость, увенчанную башней. Я совершенно расслабился и напроочь забыл о физике.

Стол к ужину был накрыт в просторном зале, где собралась вся семья Гаррига. Как почетного гостя меня усадили рядом с отцом, который развлекал нас замечательными историями из истории своей земли и следил, чтобы не пустовал мой бокал с вином. Ближе к концу ужина он извинился и вышел из зала. “Он пошел звать коров домой”, — объяснил Хауме. Коровы не нуждались в пастухе; им нужно было просто дружеское напоминание.

После ужина старший брат Хауме повел нас по винтовой лестнице на вершину башни. В беспокойные времена она была сторожевой. Если в поле зрения появлялся враг, караульный мог факелом просигналить другим таким башням на соседних фермах — и так вплоть до герцогского гарнизона в замке Кардона в пяти милях отсюда. Мы смотрели в маленькие квадратные окошки башни — не видно ли какого-нибудь злодея. Солнце

1 Традиционная каталонская каменная усадьба или ферма. — *Примеч. перев.*



Рис. 11.2. Хауме в детстве на родительской ферме
(фото Энтони Пратса).

опускалось за холмы. Вдали были только коровы, которые сами шли с пастбища домой.

Утром мы покинули ферму и отправились к горам. Нашей целью была приморская деревушка Кадакес, родина Сальвадора Дали. Моя жена восхищается его творчеством и захотела посмотреть дом и деревню, где он провел большую часть своей жизни. Каждый раз, когда мы бывали в Барселоне, она стремилась туда выбраться, но, попав в университет, я неизменно погружался в физические дискуссии и другие не менее важные дела, так что в итоге на поездку не оставалось времени. Но на этот раз она настояла на своем: мы поедem в Кадакес прежде, чем в Барселону.

Узкая дорога серпантином поднималась в горы, цепляясь за опасные склоны, а затем, петляя, уходила вниз к утесам и уединенным бухтам Коста-Брава. Мы въехали в деревню вскоре после полудня, когда солнце палило во всю свою средиземноморскую силу. Белые домики Кадакеса скучились на склоне холма, поступая к самой воде. Выше по склону расположилась церковь, сложенная из грубо отесанного камня, аскетичная и красивая.

Наше посещение Дома Дали пошло не так, как планировалось. Джулия, жена Хауме, которая в последнюю минуту решила к нам присоединиться, взяла с собой дочь Клару. Как только мы

вошли в музей, Клара начала громко протестовать, так что дамы пошли в музей, а мы с Хауме остались сидеть с ребенком. Вскоре мы уже глубоко погрузились в обсуждение физических проблем. Когда наши жены вернулись, музей уже закрывался. Так я и не посмотрел “Каса Дали” — Дом Дали, о котором столько говорят.

Остаток дня мы провели, гуляя по узким, мощенным булыжником деревенским улочкам Кадакеса. Мы с Хауме продолжали разговор, и новая картина Вселенной постепенно обретала очертания. Она была странной и волнующей.

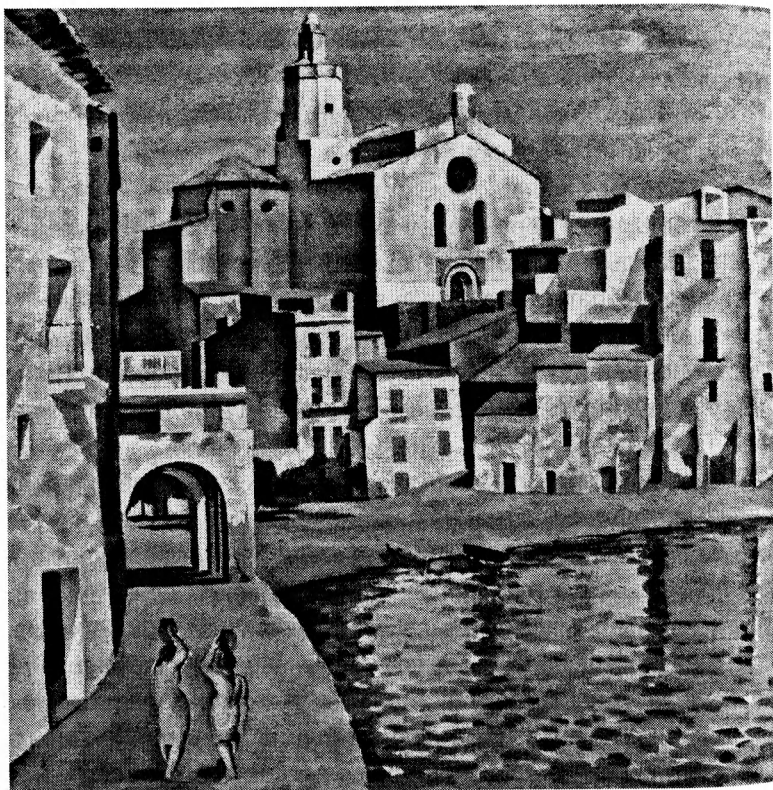


Рис. 11.3. “Порт-Альгеро” (Кадакес) Сальвадора Дали.

ОГРАНИЧЕННЫЙ НАБОР ВОЗМОЖНОСТЕЙ

Наша беседа вертелась вокруг далеких областей Вселенной и того, насколько сильно они могут отличаться от нашего местного космического окружения. Поскольку каждая островная вселенная бесконечна с точки зрения ее обитателей, она может быть разделена на бесконечное число областей такого же размера, как наблюдаемая нами часть Вселенной. Для краткости мы называли их “О-регионами”.

Представьте себе бесконечное пространство, набитое гигантскими сферами диаметром по 80 миллиардов световых лет. Каждая сфера — это О-регион. Сферы расширяются вместе с вселенной, поэтому в прошлом они были меньшего размера. В момент Большого взрыва, то есть в конце инфляции, все эти О-регионы выглядели чрезвычайно похоже. Но в деталях они различались. Небольшие возмущения плотности, порожденные случайными квантовыми флуктуациями в ходе инфляции, отличаются от региона к региону. Поскольку эти возмущения усиливаются гравитацией, макроскопические свойства О-регионов начинают расходиться. Ко времени образования галактик О-регионы уже заметно различаются особенностями распределения галактик, хотя статистически они все еще очень похожи друг на друга. Позднее развитие жизни и разума, зависящее от случайных обстоятельств, вело к дальнейшему расхождению свойств. Так что можно ожидать, что истории О-регионов будут весьма сильно различаться.

Ключевым моментом является то, что количество различных конфигураций материи в любом О-регионе — или, точнее говоря, в любой конечной системе — ограничено. Может казаться, что произвольные малые изменения, которые можно внести в систему, порождают бесконечное число возможностей. Но это не так. Если я подвину свой стул на 1 сантиметр, я изменю состояние всего О-региона. Я мог бы подвинуть его на

0,9, 0,99, 0,999 и т. д. сантиметров — это бесконечная последовательность возможных смещений, все ближе и ближе подходящая к 1 сантиметру. Проблема, однако, в том, что смещения, слишком близкие по величине, невозможно различить даже теоретически из-за квантово-механической неопределенности.

В классической ньютоновской механике состояние физической системы можно описать, указав положения и скорости всех составляющих ее частиц. Мы теперь знаем, что такое описание можно использовать только для макроскопических, массивных объектов, и даже тогда оно остается лишь приближенным. В квантовом мире частицы в самой своей основе расплывчаты и не могут быть точно локализованы.

Ядром квантовой физики является принцип неопределенности, открытый в 1927 году Вернером Гейзенбергом. Он говорит, что нельзя одновременно точно измерить положение и скорость частицы. Чем точнее мы измеряем положение, тем больше оказывается неопределенность скорости. Если положение измерено точно, скорость оказывается совершенно неопределенной, и наоборот — если мы точно измерим скорость, то не будем иметь никакого представления, где находится частица.

Гейзенберг предложил следующее интуитивно понятное объяснение неопределенности. Простейший способ выяснить положение частицы — посветить на нее. Световые волны будут рассеиваться частицей во всех направлениях. Некоторые из них будут замечены нашими глазами или измерительной аппаратурой, и мы увидим, где находится частица. Ее изображение, полученное таким способом, не будет идеально четким: детали размером меньше длины волны непременно окажутся размытыми, так что положение нельзя будет измерить точнее, чем до длины волны. Чтобы справиться с этим затруднением, нам придется использовать все более и более коротковолновый свет, но здесь вступает в игру квантовая природа света. Он состоит

из фотонов, энергия которых обратно пропорциональна длине волны. Когда частица освещается очень коротковолновым светом, она оказывается под обстрелом очень энергичных фотонов. Под воздействием их ударов она испытывает отдачу, отчего ее скорость изменяется. Эта отдача — источник неопределенности: чем большей точности мы хотим достичь при измерении положения, тем более коротковолновый свет мы должны использовать и тем сильнее будет его воздействие на наблюдаемую частицу.

Даже если мы не интересуемся скоростью частицы, рассуждения Гейзенберга указывают, что для наращивания точности локализации частицы нам потребуется все больше и больше энергии. В любой реальной физической системе с ограниченной энергией точность определения положения тоже ограничена. Так что мы не можем идеально точно указать положение частиц, а вынуждены использовать крупнозернистое описание. Предположим, что объем нашего О-региона разделен на кубические ячейки размером, скажем, 1 сантиметр каждая. Крупнозернистое описание состояния заключается в указании клеток, занимаемых каждой частицей в регионе. Более точное описание получится, если мы уменьшим размер клеток. Однако для такого уточнения есть предел, поскольку энергетическая цена локализации частиц в маленьких ячейках в конце концов превзойдет всю доступную энергию О-региона.

Очевидно, что число способов, которыми можно распределить конечное число частиц по конечному числу клеток, тоже конечно. Выходит, материя, наполняющая наш О-регион, может находиться лишь в конечном числе различных состояний. Очень грубо это число можно оценить как 10 в степени 10^{90} , то есть единица, за которой следует 10^{90} нулей — много больше, чем поместилось бы на страницах этой книги. Это фантастически огромное число, но нам важно, что оно все же конечное.

Пока все идет неплохо. Есть, правда, одно затруднение: далекие регионы могут содержать больше материи и энергии, чем наш. Редкие крупные квантовые флуктуации во время инфляции иногда порождают сильно переуплотненные регионы, полные высокоэнергичных частиц. С ростом их энергии число возможных состояний тоже возрастает. Но лишь до некоторого предела. Если вкачивать в регион все больше и больше энергии, его гравитация станет усиливаться, и в конечном счете он целиком превратится в черную дыру. Таким образом, гравитация ставит абсолютный верхний предел числу возможных состояний региона данного размера независимо от его наполнения.

Точное значение этого предела еще предстоит установить. Впервые о нем заговорил Якоб Бекенштейн (Jacob Bekenstein) в 1980-х годах, а потом он появился в работах по суперструнам Герард'та Хофта (Gerard't Hooft), Леонарда Сасскинда (Leonard Susskind) и других. В работе Бекенштейна предполагалось, что максимальное число состояний в регионе зависит только от его границ. Для О-региона получалось значение 10 в степени 10^{123} (1 с более чем гуголом нулей!)¹.

ПОДСЧЕТ ИСТОРИЙ

Но конечным является не только число различных состояний О-региона — то же самое можно сказать и о числе его возможных историй.

История описывается цепочкой состояний в последовательные моменты времени. Такие понятия, как история, по-видимому, очень сильно различаются в квантовой и классичес-

¹ Это ограничение неприменимо к областям, превосходящим размеры космического горизонта. Предполагается, что на пределе оно применимо к О-региону, который по размерам совпадает с горизонтом.

кой физике. В квантовом мире будущее не определяется однозначно прошлым. Одни и те же начальные условия могут вести к множеству разных исходов, и мы можем подсчитывать лишь их вероятности. В результате диапазон возможностей значительно расширяется. Но квантовая неопределенность вновь не позволяет нам различить истории, которые слишком похожи одна на другую.

Квантовая частица, как правило, не имеет однозначно определенной истории. Это неудивительно, поскольку, как мы знаем, у нее нет и четко определенного положения. Но неопределенность не означает, что мы просто не знаем, по какому пути движется частица от своего источника к детектору. Ситуация куда удивительнее: похоже, что частица следует одновременно по множеству различных путей и все они вносят свой вклад в исход процесса.

Это шизофреническое поведение лучше всего иллюстрируется знаменитым двухщелевым экспериментом (рис. 11.4). Установка состоит из источника света и фотопластинки, которая закрыта непрозрачным экраном с двумя узкими щелями. Свет проникает через щели и создает изображение на пластинке. Эксперимент впервые поставил в начале XIX века английский физик Томас Юнг. Он обнаружил, что изображение складывается из чередующихся светлых и темных полосок. Свет от обеих щелей падает на все точки фотопластинки. Но в одни места световые волны приходят в фазе (гребни и впадины двух волн совпадают), усиливая друг друга, тогда как в других местах они оказываются в противофазе (гребни одной волны приходятся на впадины другой) и взаимно гасятся. Так узор из полосок объясняется волноподобной природой света.

Удивительные вещи начинаются, когда мы уменьшаем интенсивность источника света до такого уровня, что фотоны испускаются им поштучно — один за другим. Каждый фотон оставляет пятнышко на фотопластинке. Сначала они располагаются

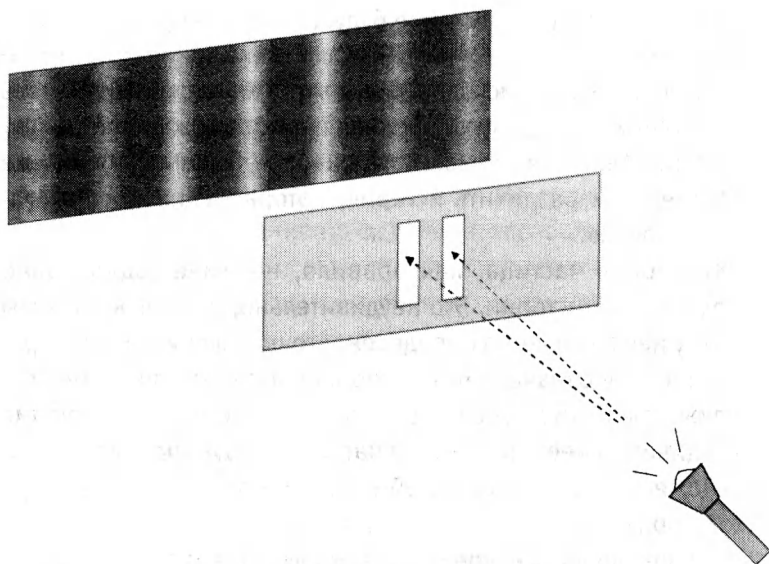


Рис. 11.4. Двухщелевой эксперимент.

беспорядочно, но поразительно, что спустя некоторое время они складываются в узор, в точности совпадающий с полосками, которые получались раньше. Фотоны попадают на экран по отдельности, поэтому те, что прошли через одну щель, не могут взаимодействовать с теми, что прошли через другую. Но как тогда им удастся “усилить” или “гасить” друг друга?

Чтобы глубже разобраться в вопросе, можно посмотреть, что случится, если вынудить фотоны проходить через одну или через другую щель. Допустим, мы выполняем эксперимент, открыв только одну щель, а затем на столько же времени открываем другую, не меняя фотопластинку. Поскольку фотоны проходят через установку по одному, это не должно внести изменений, и мы ожидаем получить тот же узор. Верно? Нет. В этой модифицированной версии эксперимента никаких полосок не наблюдается, а на снимке будут только очертания двух щелей.

Отсюда вытекает, что представление, будто фотон проходит через одну из щелей, не обращая внимания на то, открыта ли другая, неверно. Когда открыты обе щели, фотон каким-то образом “чувствует” две возможные истории, которым он может следовать. Они совместно определяют вероятность того, что фотон попадет в конкретное место на пластинке. Этот феномен называется *квантовой интерференцией* между историями.

Квантовая интерференция редко проявляется столь наглядно, как в двухщелевом эксперименте, но она влияет на поведение каждой частицы во Вселенной. Двигаясь из одного места в другое, частицы “разнохивают” множество различных маршрутов, так что вместо четко определенного прошлого мы имеем запутанную сеть интерферирующих историй.

Как тогда можно быть уверенным, что некоторое событие действительно имело место? Как придать смысл понятию истории? Ответ вновь возвращает нас к крупнозернистому описанию.

Как и прежде, разделим пространство на маленькие ячейки и зададим крупнозернистое состояние системы (О-региона в нашем случае) путем указания “адресов” ячеек для всех частиц. Крупнозернистая история задается последовательностью таких состояний через равные интервалы времени, например, каждые две секунды. Подчеркнем важный момент: эффект интерференции обычно силен только для очень близких друг к другу историй. Если увеличивать размеры ячеек и интервалы времени, то разные крупнозернистые истории станут все сильнее и сильнее отличаться друг от друга, и в некоторый момент их интерференция окажется совершенно ничтожной. После этого можно говорить об альтернативных историях системы.

Формализм квантовой механики в терминах крупнозернистых историй был относительно недавно, в 1990-х годах, разработан Робертом Гриффитсом, Роланом Омнэ, Джеймсом Хартлом и Мюрреем Гелл-Манном (Robert Griffiths, Roland Omnès, James

Hartle and Murray Gell-Mann). Они обнаружили, в частности, что минимальный размер ячеек, при котором еще можно говорить об определенности истории, как правило, является микроскопическим, а минимальный интервал времени — это крошечная доля секунды. Неудивительно, что в макроскопическом мире человеческого опыта история представляется хорошо определенной.

Крупнозернистая история протекает за конечное число шагов, и любая ограниченная во времени история должна состоять из конечного числа моментов. В каждый момент система может находиться лишь в конечном числе состояний, а значит, и число различных историй системы должно быть конечным.

Мы с Хауме, по-быстрому прикинув на обороте конверта, оценили число возможных историй О-региона от Большого взрыва до наших дней. Как и следовало ожидать, получилось еще одно “гуголплексное”¹ число: 10 в степени 10^{150} . Действительное количество квантовых состояний и историй О-региона не так важно, но конечность их числа имеет важные последствия для нашей дискуссии.

ИСТОРИЯ ПОВТОРЯЕТСЯ

Давайте рассмотрим ситуацию внимательнее. Она возникла как следствие теории инфляции, согласно которой островные вселенные бесконечны внутри и каждая из них содержит бесконечное множество О-регионов. Она также опирается на квантовую механику, говорящую, что существует лишь конечное число историй, которые могут реализоваться в любом О-регионе. Объединяя эти два утверждения, мы с неизбежностью приходим к выводу, что каждая конкретная история должна повторяться бесконечное число раз. Согласно квантовой

¹ От слова “гуголплекс” — названия числа 10 в степени 10^{100} .

механике, все, что строго не запрещено законами сохранения, имеет ненулевую вероятность реализации, а значит, наверняка случилось в бесконечном числе О-регионов!

Среди этих бесконечно повторяемых сценариев должны быть весьма странные истории. Например, планета, похожая на нашу Землю, может вдруг сколлапсировать в черную дыру. Или она может испустить колоссальный импульс излучения и перейти на другую орбиту, значительно ближе к центральной звезде. Такие происшествия чрезвычайно маловероятны, но это лишь означает, что придется перебрать очень много О-регионов, прежде чем найдется такой, в котором это случилось.

Удивительным следствием этой новой картины мира является существование бесконечного числа миров, идентичных нашему. Да, дорогой читатель, десятки ваших дублей держат сейчас в руках эту книгу. Они живут на планетах, в точности таких же, как наша Земля со всеми ее горами, городами, деревьями и бабочками. Эти земли обращаются вокруг точных копий Солнца, и каждое солнце принадлежит огромной спиральной галактике — точной копии нашего Млечного Пути.

Как далеко находятся все эти земли, населенные нашими дублями? Мы знаем, что материя, содержащаяся в нашем О-регионе, может находиться в 10 в степени 10^{90} различных состояний. Объем, содержащий, скажем, гуголплекс (10 в степени 10^{100}) О-регионов, должен исчерпать все возможности. Такой объем будет иметь поперечник порядка гуголплекса световых лет. На больших расстояниях О-регионы, включая наш, будут повторяться.

Должны также существовать регионы, где истории немного отличаются от нашей, со всеми возможными вариациями. Когда Юлий Цезарь со своими легионами стоял на берегу реки Рубикон, он знал, что должен принять важнейшее решение. Переход реки станет государственной изменой, и пути назад уже не будет. Со словами “*Jacta alea est!*” — “Жребий брошен!” —

он приказал войскам идти вперед. И жребий действительно был брошен: на некоторых землях Цезарь стал римским диктатором, а на других он был разбит, подвергнут пыткам и казнен как враг государства. Конечно, на большинстве земель никогда не было человека по имени Цезарь, а в большинстве мест Вселенной нет ничего похожего на нашу Землю, поскольку существует гораздо больше других возможных вариантов развития помимо простого повторения.

Весьма символично, что эта сюрреалистичная картина мира появилась в городке, пропитанном духом Сальвадора Дали. Подобно живописи Дали, она смешивает странные, кошмарные детали с привычной реальностью. И тем не менее это прямое следствие инфляционной космологии. Мы с Хауме написали статью о новой картине мира и представили ее в ведущий физический журнал *The Physical Review*. Мы опасались, что статья будет отвергнута как “слишком философская”, но ее приняли без возражений. В дискуссионном разделе ближе к концу мы писали: “Существование О-регионов со всеми возможными историями, среди которых есть идентичные или почти идентичные нашей, имеет ряд тревожных следствий. Если только у вас появилась мысль о возможности какого-то страшного несчастья, можете быть уверены, что оно уже случилось в каком-то из О-регионов. Если вы с трудом избежали аварии, значит, в некоторых регионах с точно такой же предшествующей историей вам не повезло. С другой стороны, некоторые читатели будут рады узнать, что существует бесконечное число О-регионов, где Эл Гор стал президентом¹ и — да! — Элвис жив¹”.

Пресса отреагировала немедленно — как и предсказывал Хауме. На следующий месяц в британском журнале *New Scientist* вышел обзор нашей статьи под заголовком “Да здравствует король!”

1 Мы писали статью в 2001 году, сразу после весьма спорных выборов в США, на которых Джордж Буш обошел Эла Гора на очень небольшую величину.

ЧТО ЕЩЕ НОВОГО?

Позднее мы выяснили, что у картины множества наших клонов, разбросанных по Вселенной, есть предыстория. Знаменитый российский физик Андрей Сахаров высказал подобную идею в своей Нобелевской лекции в 1975 году. Он говорил: “В бесконечном пространстве должны существовать многие цивилизации, в том числе более разумные, более “удачные”, чем наша. Я отстаиваю также космологическую гипотезу, согласно которой эволюция Вселенной повторяется в основных своих чертах бесконечное число раз”ⁱⁱ.

Кое-кто даже называл мысль, что в бесконечной Вселенной должно случиться абсолютно все, самоочевидной. Это утверждение, однако, ложно. Рассмотрим, например, последовательность нечетных чисел 1, 3, 5, 7, Она бесконечна, но нельзя говорить, что она содержит все возможные числа. Ведь в ней отсутствуют все четные числа. Аналогично, бесконечность пространства сама по себе не гарантирует, что все возможности реализуются где-то во Вселенной. Например, по всему пространству могла бы бесконечно повторяться одна и та же галактика.

На этот момент указали южноафриканские физики Джордж Эллис (George Ellis) и Дж. Брандрит (G. Brundrit)ⁱⁱⁱ. Они доказали, исходя из предположения о бесконечности Вселенной, что в ней должно быть бесконечное число мест, очень похожих на нашу Землю. (В своем анализе они опирались на классическую физику и поэтому могли говорить только о сходстве, но не об идентичности других земель и нашей.) Они предположили вдобавок, что начальное состояние Вселенной случайным образом меняется от одного О-региона к другому, так что в бесконечном объеме исчерпываются все возможные их варианты. Таким образом, существование на-

ших клонов не самоочевидно, а опирается на предположения о пространственной бесконечности и “исчерпывающей случайности” Вселенной.

Напротив, в случае бесконечной инфляции эти свойства не нужно вводить как независимые предположения. Из самой теории вытекает, что островные вселенные бесконечны и что начальные условия в момент Большого взрыва задаются случайными квантовыми процессами во время инфляции. Существование клонов, таким образом, является неизбежным следствием теории.

ЗНАЧЕНИЕ СЛОВА “БЫТЬ”

Все зависит от значения слова “есть”.

Билл Клинтон

Идея множества миров, или “параллельных” вселенных, обсуждалась также и в совершенно ином контексте. Возможно, вы слышали о многомировой интерпретации квантовой механики, которая утверждает, что Вселенная постоянно расщепляется на множество копий самой себя так, что в разных копиях реализуются все возможные исходы каждого квантового процесса. Несмотря на кажущееся сходство с бесконечной инфляцией, это на самом деле совсем разные теории. Чтобы не путать их, давайте совершим короткий экскурс в мир множества миров.

Квантовая механика — феноменально успешная теория. Она объясняет строение атомов, электрические и тепловые свойства твердых тел, ядерные реакции и сверхпроводимость. Физики безоговорочно доверяют ей, но при этом основания данной теории на удивление темны, и дебаты об их интерпретации продолжают до сих пор.

Самым спорным является вопрос о природе квантово-механических вероятностей. Так называемая копенгагенская интерпретация, разработанная Нильсом Бором и его последователями, гласит, что квантовый мир принципиально непредсказуем. Согласно Бору, бессмысленно спрашивать, где находится квантовая частица, пока вы не произведете измерение, чтобы ее обнаружить. Вероятности всех возможных исходов измерения можно вычислить, используя правила квантовой механики. Частицы как будто никак не могут “решиться” и прыгают на определенное место в самый последний момент, когда выполняется измерение.

Альтернативная интерпретация предложена Хью Эвереттом III в его докторской диссертации, защищенной в 1950 году в Принстонском университете. Он утверждал, что на самом деле реализуются все возможные исходы каждого квантового события, но происходит это в разных, “параллельных” вселенных. При любом измерении положения частицы Вселенная разветвляется на мириады копий, в которых частица обнаруживается во всех возможных местах. Процесс ветвления полностью детерминирован, но мы не знаем, с какой из ветвей будет связан *наш* опыт. В результате исход *нашего* измерения по-прежнему остается вероятностным, причем Эверетт показал, что все вероятности оказываются в точности такими же, как и в копенгагенской интерпретации^{IV}.

Поскольку выбор интерпретации не влияет ни на какие результаты или предсказания теории, большинство работающих физиков относятся к дискуссии об основаниях квантовой механики как агностики и не тратят время на подобные вопросы. По словам физика Исидора Раби (Isidor Rabi), занимающегося элементарными частицами, “квантовая механика — это просто алгоритм. Используйте его. Он работает, не беспокойтесь”^V. Такой подход “заткнись и считай”^{VI} прекрасно работает везде, кроме квантовой космологии, в которой квантовая механика

применяется к целой Вселенной. “Ортодоксальную” копенгагенскую интерпретацию, требующую, чтобы внешний наблюдатель выполнял над системой процедуры измерения, в этом случае невозможно даже сформулировать: нет никакого внешнего по отношению к Вселенной наблюдателя. Космологи, таким образом, склонны предпочитать многомировую картину.

Эверетт и некоторые его последователи настаивают, что все параллельные миры в равной мере реальны, однако другие полагают, что это лишь возможные миры и среди них только один реален¹. Эта дискуссия может оказаться простым спором о терминах: когда говорят, что есть другая параллельная вселенная, независимая от нашей, что в точности означает это утверждение? Как сказал президент Клинтон по другому поводу, “все зависит от значения слова “есть”^{vii}”. Параллельные вселенные подобны параллельным прямым: у них нет общих точек. Каждая из них развивается самостоятельно в отдельном пространстве и времени, которые нигде не могут проникнуть в нашу Вселенную. Но как тогда мы можем сказать, существуют они на самом деле или только как возможности?²

Я должен подчеркнуть, что все это никак не влияет на картину вечной инфляции, описанную в начале этой главы. Если принимается многомировая интерпретация, то существует ансамбль “параллельных” вечно инфлирующих вселенных, каждая с бесконечным числом О-регионов. Новая картина мира приложима к каждой из вселенных этого ансамбля.

Более того, в отличие от идеи параллельных миров другие О-регионы безусловно реальны. Все они принадлежат общему

- 1 Эта точка зрения близка к копенгагенской интерпретации, за тем исключением, что не настаивает на присутствии внешнего наблюдателя.
- 2 Далее в главе 17 мы увидим, что в действительности есть серьезные основания верить в существование совершенно не связанных вселенных.

пространству-времени, и, будь у нас в запасе достаточный срок, мы даже смогли бы добраться до них и сравнить их истории с нашей¹.

ОБХОДНЫЕ ПУТИ

Без сомнения, многие читатели удивятся: неужели нам действительно надо верить во всю эту чепуху с нашими клонами? Нет ли способа избежать столь причудливых выводов? Если вы совершенно не способны смириться с мыслью, что ваш двойник в далекой галактике является республиканцем (или, наоборот, демократом), и если вы готовы ухватиться за любую соломинку, чтобы этого избежать, позвольте подбросить вам пару соломинок.

Прежде всего, есть вероятность, что теория инфляции неверна. Идея инфляции очень убедительна и подтверждается наблюдениями, но, конечно, далеко не в той мере, как, например, теория относительности Эйнштейна.

Даже если наша Вселенная является продуктом инфляции, можно допустить, что инфляция не вечна. Правда, это потребует довольно серьезных натяжек в теории. Чтобы избежать вечной инфляции, энергетический ландшафт скалярного поля должен быть специальным образом подогнан под наши требования^{viii}.

Ни одна из этих возможностей не выглядит привлекательной. Теория инфляции — это самое лучшее из имеющихся у нас

¹ Нашим возможностям путешествовать в другие О-регионы может помешать наблюдаемое ускорение расширения Вселенной, вызванное постоянной энергией вакуума. В этом случае галактики других О-регионов будут удаляться все быстрее и быстрее, и мы никогда не сможем их догнать. Некоторые модели, однако, предполагают, что энергия вакуума будет постепенно снижаться, как это происходило в период инфляции. В таком случае не будет никаких принципиальных ограничений на дальность путешествий.

объяснений Большого взрыва. Если мы примем эту теорию и не станем ее калечить, добавляя совершенно не обязательные и произвольные свойства, у нас не будет иного выбора, кроме как признать инфляцию бесконечной, со всеми вытекающими из этого последствиями, нравятся они нам или нет.

ПРОЩАНИЕ С УНИКАЛЬНОСТЬЮ

В представлениях древних мы, люди, были центром Вселенной. Небо располагалось не слишком далеко, и судьбы людей и царств можно было прочесть по звездам и планетам на его бархатном своде. Наш уход с авансцены начался с трудов Коперника и длился вплоть до конца прошлого столетия. Не только Земля не является центром Солнечной системы, но и само Солнце — лишь рядовая звезда на окраине довольно типичной галактики. И все же нас грела мысль, что на Земле есть нечто совершенно особенное — что это единственная планета с данным конкретным набором жизненных форм и что человеческая цивилизация с ее искусством, культурой и историей уникальна во всей Вселенной. Можно было думать, что эта единственность — достаточное основание, чтобы охранять нашу маленькую планету, как драгоценное произведение искусства.

Теперь мы лишились и этой последней претензии на уникальность. В картине мира, возникающей из теории вечной инфляции, Земля и наша цивилизация никак не могут считаться уникальными. По бесконечным просторам космоса разбросано бесчисленное множество идентичных цивилизаций. С этим понижением статуса человечества до абсолютной космической ничтожности наш путь прочь от центра мировой сцены может считаться завершенным^{ix}.

ЧАСТЬ III
Принцип
заурядности

ГЛАВА 12

Проблема космологической постоянной

Немногие теоретические оценки в истории физики...
были настолько неточными.

ЛАРРИ ЭББОТ

КРИЗИС ЭНЕРГИИ ВАКУУМА

Вакуум — это самый загадочный объект, с которым когда-либо встречались физики. А самый страшный секрет вакуума — это происхождение его энергии. Я должен подчеркнуть, что говорю не о высокоэнергичном вакууме инфляционной космологии. Как раз физика ложного вакуума относительно понятна. Загадочный объект, о котором идет речь, — это обычный, истинный вакуум, в котором мы сейчас обитаем.

Вакуум — это то, что остается, когда мы убираем все частицы и излучение. Для классического физика это просто пустое пространство, и о нем нечего больше сказать. Но в квантовой физике вакуум — это арена безумно активной деятельности.

Возьмем, к примеру, электромагнитное излучение. Оно состоит из фотонов — небольших сгущений электромагнитной

энергии. Допустим, у нас есть ящик чистого вакуума. Мы напроць опустошили его и убедились, что внутри не осталось ни одного фотона, ни одной частицы. Можно предположить, что электрическое и магнитное поля в ящике должны быть строго равны нулю. Но это не так. Квантовый вакуум отказывается пребывать в покое. Точно так же, как скалярное поле во время инфляции, электрическое и магнитное поля испытывают случайные рывки или квантовые флуктуации.

Если вы попытаетесь измерить, скажем, магнитное поле внутри ящика, полученный результат будет зависеть от размера вашего измерительного устройства. Предположим, для начала вы взяли относительно крупное приспособление, измеряющее поле в масштабе 1 сантиметр. Тогда величина измеренного поля составит несколько миллиардных долей гаусса. (Для сравнения: напряженность магнитного поля Земли составляет у поверхности около 1 гаусса.) Спустя одну наносекунду¹ направление поля станет совершенно другим, но его величина останется где-то между нулем и несколькими миллиардными гаусса. Чтобы заметить эти стремительные флуктуации поля, измерения надо выполнять быстро. Если измерение занимает больше наносекунды, вы получите среднее значение поля, которое будет очень близко к нулю.

Детектор размером 1 миллиметр регистрирует в 100 раз более сильное поле, которое флуктуирует в 10 раз быстрее. Эти соотношения сохраняются по мере дальнейшего уменьшения масштабов: каждый раз, когда вы уменьшаете масштаб длины в 10 раз, величина флуктуаций увеличивается в 100 раз, а их частота возрастает десятикратно. В масштабе атомов флуктуирующее магнитное поле в 10 миллионов гаусс меняет свое направление примерно 10^{17} раз в секунду.

Мы не замечаем этих колоссальных магнитных полей, потому что они очень быстро меняются от точки к точке и от мгнове-

1 Наносекунда — одна миллиардная доля секунды.

ния к мгновению. Стрелка компаса, например, реагирует на магнитное поле, осредненное по всей ее длине, и за интервал времени, достаточный для существенного ее поворота (скажем, 0,1 секунды). Влияние квантовых флуктуаций на таких масштабах совершенно ничтожно¹.

Все это замечательно, пока мы не заинтересуемся энергией флуктуаций. Плотность энергии магнитного поля зависит только от его напряженности, но не от направления. Поэтому, даже если поле колеблется в разные стороны, его плотность энергии в среднем не равна нулю. Сильные, быстро флуктуирующие поля на малых расстояниях вносят большой вклад в плотность энергии, и тут мы сталкиваемся с серьезной проблемой. По мере рассмотрения все меньших и меньших размеров плотность энергии неограниченно возрастает. В результате мы приходим к абсурдному выводу, будто плотность энергии вакуума бесконечна! Похоже, в нашей теории что-то глубоко неверно. Попробуем разобраться, что бы это могло быть и как нам обойти этот странный результат.

Бесконечность возникает, если мы допускаем, что линейный масштаб флуктуаций может быть сколь угодно малым. Но ведь не исключено, что существует предел тому, насколько малыми они могут быть. На сверхмалых расстояниях геометрия пространства и времени тоже оказывается подвержена большим квантовым флуктуациям. Как и в случае электромагнетизма, чем меньше линейный масштаб, тем больше флуктуации. Ниже некоторого критического размера, называемого *планковской длиной*, пространство-время обретает хаотическую, пенообразную структуру. Пространство неистово закручивается и сминается, крошечные “пузырьки” отрываются от него и немедленно коллапсируют, возникает и мгновенно исчезает множество “ручек” или “туннелей” (рис. 12.1). Планковская длина невероятно мала: она составляет одну миллиардно-триллионно-триллионную долю сантиметра. В значительно больших масштабах пространство выглядит гладким, а “прост-

ранственно-временная пена” не видна — подобно тому как пенная поверхность океана кажется гладкой, если смотреть на нее с большой высоты.

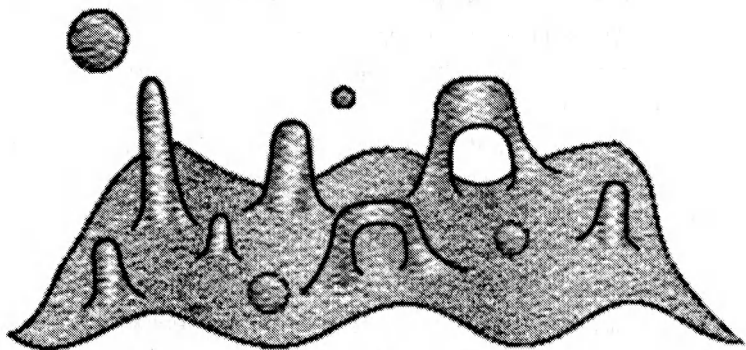


Рис. 12.1. Пространственно-временная пена.

Возможно, столь резкое изменение свойств пространства-времени гасит идущие вразнос электромагнитные флуктуации. Этого нельзя сказать с уверенностью, поскольку физика пространственно-временной пены не вполне ясна. Но даже при наилучшем раскладе ничто не ограничивает флуктуации в масштабах, больших, чем планковская длина. Оценка плотности энергии таких флуктуаций дает поразительную величину 10^{88} тонн на кубический сантиметр, что намного превосходит энергию вакуума Великого объединения!

Плотность энергии истинного вакуума — это то, что Эйнштейн называл космологической постоянной. Если она действительно так невероятно велика, Вселенная должна сейчас находиться в состоянии взрывного инфляционного расширения. Однако наблюдаемый темп расширения Вселенной ограничивает величину космологической постоянной значением в 10^{120} (это больше гугола!) раз меньшим. Итак, мы столкнулись с за-

гадкой: почему плотность энергии вакуума не так велика? Столь разительное несоответствие между предсказанным и наблюдаемым значениями космологической постоянной известно под названием проблемы космологической постоянной. Это одна из самых волнующих и будоражащих ум загадок в теоретической физике элементарных частиц.

В ПОИСКАХ ГЛУБИННОЙ СИММЕТРИИ

Помимо электромагнетизма квантовые флуктуации других полей также вносят свой вклад в энергию вакуума. Некоторые из этих вкладов оказываются отрицательными, и это дает надежду на то, что положительные и отрицательные вклады в энергию скомпенсируют друг друга. Эта возможность стимулировала многочисленные попытки решения проблемы космологической постоянной.

Все элементарные частицы делятся на два типа: *бозоны* и *фермионы*¹. Фотоны, например, относятся к бозонам, а электроны, позитроны, кварки — к фермионам. Ферми-частицы можно представлять в виде небольших сгущений фермионных полей, однако, в противоположность электромагнетизму, величины таких полей характеризуются так называемыми *гассмановыми числами*², которые очень сильно отличаются от обычных. Когда вы перемножаете обычные числа, результат не зависит от порядка сомножителей; например, $4 \times 6 = 6 \times 4 = 24$. Однако произведение гассмановых чисел при этом меняет знак: $A \times B = -B \times A$. Гассманов характер фермионных полей ответствен за многие особенности ферми-частиц, но для нас

¹ Они называются в честь Шатъендраната Бозе и Эрнико Ферми, которые сформулировали их отличительные свойства.

² Названы в честь немецкого математика XIX века Германа Гассмана, который ввел их в оборот.

важно то, что вакуумные флуктуации ферми-полей имеют отрицательную плотность энергии.

Может ли положительная энергия бозе-полей быть скомпенсирована отрицательной энергией ферми-полей? В принципе это возможно, но выглядит крайне маловероятным. Огромные положительные и отрицательные члены уравнений, сложнейшим образом связанные с массами и взаимодействием частиц, должны совпасть по величине с точностью лучше, чем единица к гуголу. С чего бы случиться такому чудесному совпадению?

Удивительные сокращения случаются в физике элементарных частиц, но они обычно связаны с некоторой лежащей в их основе симметрией. Возьмем, к примеру, сохранение электрического заряда. Высокоэнергичные столкновения могут порождать мириады новых частиц, но всегда можно быть уверенным, что число положительно и отрицательно заряженных среди них будет в точности равным, так что совокупный заряд останется неизменным. Это свойство связано с особой симметрией уравнений физики элементарных частиц, называемой калибровочной симметрией¹.

Из калибровочной симметрии следует, что электрический заряд сохраняется при любых взаимодействиях элементарных частиц. Красота симметрии состоит в том, что детали не имеют значения. Неважно, каковы массы частиц и в какие взаимодействия они друг с другом вступают. Сохранение заряда имеет место всегда.

Вплоть до самого недавнего времени абсолютное большинство физиков верило, что нечто подобное должно иметь место и в случае энергии вакуума. Должна существовать некая пока еще не открытая глубинная симметрия, которая приводит к сокращению различных вкладов в космологическую постояннуюⁱⁱ. Начиная с 1970-х годов при участии лучших умов было предпринято множество попыток разобраться, что это может

1 Про уравнение говорят, что оно обладает симметрией, если существует некоторая операция, при которой оно остается неизменным. Например, уравнение $x + y = 1$ не меняется, если поменять местами x и y .

быть за симметрия. Однако несколько десятилетий усилий так и не принесли значимых успехов. Проблема космологической постоянной остается столь же неприступной, как и прежде.

ПРОБЛЕМА СОВПАДЕНИЯ

“Любое совпадение, — сказала себе мисс Марпл, — это лучше, чем ничего. Если это просто совпадение, его потом можно отбросить”.

АГАТА КРИСТИ

Когда в конце 1990-х годов две группы астрономов сообщили, что обнаружили признаки далеко не исчезающе малой величины космологической постоянной, их заявление оказалось полнейшей неожиданностью. Как уже говорилось в главе 9, это открытие стало важнейшим событием для теории инфляции. Плотность массы (энергии) вакуума оказалась в точности такой, какая требовалась, чтобы сделать Вселенную плоской. Но для физики элементарных частиц оно стало страшной неприятностью.

Шансы найти решение проблемы космологической постоянной становились теперь и вовсе ничтожными. Симметрия должна работать идеально; она не оставила бы и следа некомпенсированной энергии вакуума. И это еще не все. Фактическое значение космологической постоянной, полученное из новых данных, выглядело крайне подозрительно. Оно было настолько велико, что большинство физиков, занимающихся элементарными частицами, и космологов просто отказывались в него верить, надеясь, что как-нибудь все обойдется.

Наблюдаемая плотность массы вакуума оказалась примерно вдвое больше средней плотности вещества. Удивляло то, что эти две плотности сравнимы друг с другом по величине. Это было странно, поскольку плотность вещества и плотность вакуума

совершенно по-разному ведут себя в ходе расширения Вселенной. Плотность вакуума остается совершенно неизменной (до тех пор пока мы остаемся в том же самом вакууме), а плотность вещества убывает с ростом объема. Если эти две плотности сегодня примерно совпадают, значит, в эпоху последнего рассеяния вещество в миллиарды раз превосходило вакуум по плотности, а через секунду ПБВ она была в 10^{45} раз выше. В далеком будущем ситуация сменится на противоположную: плотность вещества станет много меньше, чем у вакуума. Например, через триллион лет она будет в 10^{50} раз меньше.

Таким образом, на протяжении большей части истории Вселенной плотности вещества и вакуума очень сильно различались. Почему же в таком случае нам довелось жить именно в ту особенную эпоху, когда эти две плотности столь близки друг к другу? Если глядеть на огромный диапазон изменения плотности вещества, это совпадение выглядит таким странным, что его трудно считать “просто совпадением”.

Похоже, будто Природа пыталась нам что-то сказать. Но, по своему обыкновению, она не озаботилась внятностью формулировки. Почему такая фундаментальная величина, как космологическая постоянная, должна быть связана с плотностью вещества в ту определенную эпоху, когда довелось появиться человеку? Сама мысль о связи этих двух величин выглядела совершенно вздорной. Сообщество физиков элементарных частиц пребывало в замешательстве.

И тогда обнаружился замечательный факт, сделавший ситуацию еще более странной. Ненулевое значение космологической постоянной, не очень далекое от наблюдаемого, как оказалось, было предсказано теоретически за много лет до упомянутых наблюдений. Правда, с этим предсказанием была связана одна проблема. Оно основывалось на так называемой *антропной селекции* — весьма неоднозначной идее, которой уважающие себя физики избегают как чумы.

ГЛАВА 13

Антропные владения

На берегах неизведанного мы обнаружили странные следы. Чтобы объяснить их происхождение, мы выдвигали одну изощренную теорию за другой.

Наконец нам удалось реконструировать существо, оставившее следы.

И что же? Оказалось, они наши собственные.

СЭР АРТУР ЭДДИНГТОН

ФУНДАМЕНТАЛЬНЫЕ ПОСТОЯННЫЕ

Свойства любого объекта Вселенной от молекулы ДНК до гигантских галактик определяются в конечном счете несколькими числами — так называемыми фундаментальными постоянными. К числу этих констант относятся массы элементарных частиц и параметры, характеризующие силу четырех фундаментальных взаимодействий — сильного, слабого, электромагнитного и гравитационного. Протон, например, на 0,14% легче

нейтрона и в 1836 раз массивнее электрона¹. Гравитационное взаимодействие между двумя протонами в 10^{40} раз слабее их электрического отталкивания. На первый взгляд эти числа кажутся совершенно произвольными. Пользуясь метафорой Крэйга Хогана¹, можно представить себе Творца, сидящего за пультом управления Вселенной и крутящего различные регуляторы для настройки констант: “Поставить 1835 или 1836?”

Но не скрывается ли за внешне случайным набором чисел некая система? Возможно, нет никаких регуляторов для подст-

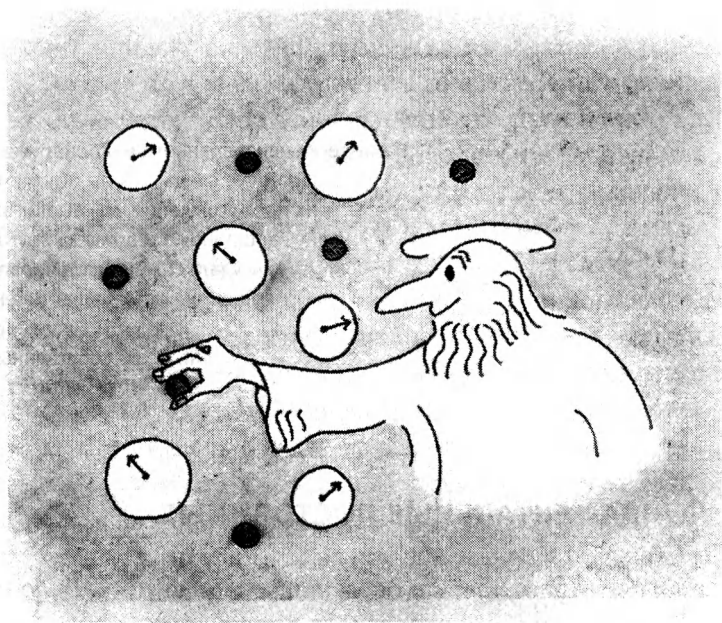


Рис. 13.1. За пультом управления Вселенной.

- 1 Численное значение массы зависит от используемых единиц измерения — граммов, унций или атомных единиц, но соотношение двух масс, такое как 1836, не зависит от нашего выбора.

ройки и все числа predeterminedены математической необходимостью! Давняя мечта физиков — вывести в конце концов значения всех постоянных из некоторой фундаментальной теории, которую еще предстоит открыть.

Однако сегодня нет никаких признаков того, что выбор констант predeterminedен. Стандартная модель элементарных частиц, которая описывает сильное, слабое и электромагнитное взаимодействия всех известных частиц, содержит 25 “подстраиваемых” констант. Их значения определяются из наблюдений¹. Вместе с недавно открытой космологической постоянной имеется 26 фундаментальных постоянных, которые описывают физический мир. Этот список может расшириться, если будут открыты новые типы частиц или взаимодействий.

ТОНКАЯ НАСТРОЙКА ВСЕЛЕННОЙ

То, как Творец выбрал значения констант, может показаться простым капризом, и все же удивительным образом за ними, похоже, стоит некая система, хотя и не в обычаях физиков полагаться на нее. Исследования в различных областях физики обнаружили, что многие существенные особенности нашей Вселенной чувствительны к точному значению некоторых констант. Если бы Творец повернул регуляторы немного иначе, Вселенная оказалась бы совершенно иной. И, скорее всего, в ней не было бы ни нас, ни любых других живых существ, способных ею восхищаться.

Для начала рассмотрим влияние массы нейтрона. Как было сказано, она чуть больше массы протона, что позволяет свободному нейтрону распадаться на протон и электрон². Предпо-

¹ Значения некоторых из этих констант, в особенности тех, что описывают свойства нейтрино, до сих пор неизвестны.

² Распад сопровождается испусканием антинейтрино.

ложим теперь, что мы повернули регулятор массы нейтрона в сторону меньших значений. Внесем очень маленькую коррекцию, не больше 0,2%, чтобы соотношение масс протона и нейтрона изменилось на противоположное. Теперь протоны становятся нестабильными и распадаются на нейтроны и позитроны. Протоны по-прежнему могут оставаться стабильными внутри атомных ядер, но если повернуть ручку сильнее, они будут распадаться и там. В результате ядра потеряют свой электрический заряд, атомы распадутся, поскольку нечему будет удерживать электроны на околоядерных орбитах. Свободные электроны будут образовывать тесные пары с позитронами. Сплетаясь в смертельном танце, они быстро аннигилируют, превратившись в фотоны. Мы в итоге останемся в “нейтронном мире”, состоящем из изолированных нейтронных ядер и излучения. В этом мире не будет химии, не будет сложных структур и не будет жизни.

Теперь повернем регулятор массы нейтрона в другую сторону. И вновь увеличение массы лишь на малую долю приведет к катастрофическим изменениям. С увеличением массы нейтроны становятся более нестабильными и с некоторого момента начинают распадаться внутри атомных ядер, превращаясь в протоны. Ядра после этого разрываются из-за электрического отталкивания протонов, которые, обретя свободу, объединяются с электронами и образуют атомы водорода. Получается довольно скучный “водородный мир”, в котором не может существовать никаких других элементов¹.

Продолжим наше исследование и на этот раз посмотрим, какой эффект окажет изменение силы фундаментальных взаимодействий между частицами. Слабое взаимодействие не иг-

¹ На более глубоком уровне протоны и нейтроны состоят из кварков, так что более корректно рассматривать массы нуклонов как величины, производные от масс кварков, которые уже являются настоящими фундаментальными постоянными. Это, однако, не меняет общего вывода. Изменение масс кварков на несколько процентов приводит либо к нейтронному, либо к водородному миру.

рает большой роли в современной Вселенной, за исключением грандиозных звездных взрывов — сверхновых. Когда массивная звезда исчерпывает свое ядерное горючее, ее внутреннее ядро коллапсирует под действием собственного веса. При этом выделяется громадная энергия, которая по большей части распространяется в виде слабо взаимодействующих нейтрино. Фотоны и другие частицы, которые участвуют в сильном или электромагнитном взаимодействиях, остаются в ловушке сверхплотного коллапсирующего ядра. По пути наружу нейтрино срывают внешние слои звезды, вызывая колоссальный взрыв. Если бы слабое взаимодействие было существенно сильнее, чем в действительности, нейтрино не могли бы вырваться из ядра, а если бы оно было намного слабее, нейтрино свободно проходили бы сквозь внешние слои, не увлекая их за собой. Таким образом, если существенно изменить силу слабого взаимодействия в ту или в другую сторону, астрономы лишатся одного из самых любимых своих зрелищ.

Думаете, вы сможете прожить и без них? Не спешите; не будем пока поворачивать регулятор. Последствия этих изменений на ранних стадиях космической эволюции могли оказаться куда более опустошительными. Как мы уже обсуждали в главе 4, тяжелые элементы, такие как углерод, кислород и железо, выковырываются в звездных недрах, а затем рассеиваются взрывами сверхновых. Эти элементы чрезвычайно важны для образования планет и живых существ. Без сверхновых тяжелые элементы оставались бы похороненными внутри звезд, и в нашем распоряжении оставались бы только легкие, образовавшиеся во время Большого взрыва: водород, гелий и дейтерий с очень небольшой примесью лития, — не слишком подходящий для жизни набор.

Из четырех фундаментальных взаимодействий гравитация намного слабее всех остальных. Ее влияние существенно только при наличии больших скоплений материи — таких как галак-

тики и звезды. На самом деле именно слабость гравитации делает звезды столь массивными: они должны быть достаточно велики, чтобы сжимать горячий газ до высокой плотности, необходимой для ядерных реакций. Если сделать гравитацию сильнее, звезды станут меньше и будут прогорать быстрее. Усиление гравитации в миллион раз уменьшит массы звезд в миллиард раз¹. Типичная звезда будет иметь массу Луны, а срок ее жизни составит около 10 000 лет (против 10 миллиардов лет для Солнца). Этого времени вряд ли хватит даже на то, чтобы в процессе эволюции развились простейшие бактерии. Но и куда меньшее усиление гравитации уже сделает Вселенную необитаемой. Стократный прирост, например, сделает время жизни звезд много меньше тех нескольких миллиардов лет, которые потребовались для появления разумной жизни на Земле.

Эти и многие другие примеры показывают, что наше присутствие во Вселенной зависит от тонкого баланса различных тенденций, который нарушился бы, будь фундаментальные постоянные существенно отличными от своих фактических значений². О чем говорит нам эта тонкая настройка констант? Указание ли это на Творца, который тщательно отрегулировал постоянные, чтобы сделать возможными жизнь и разум? Возможно. Но существует и совершенно иное объяснение.

АНТРОПНЫЙ ПРИНЦИП

Альтернативная точка зрения основывается на совершенно ином представлении о Творце. Вместо того чтобы дотошно проектировать одну Вселенную, он небрежно творит их одну за другой, порождая огромное число вселенных с различными и совершенно случайными значениями постоянных. Большинст-

¹ Заметим, что даже после усиления в миллион раз гравитация по-прежнему будет в 10^{34} раза слабее электромагнетизма.

во этих вселенных не более интересны, чем нейтронный мир, но изредка совершенно случайно возникает вселенная с удачно подобранными параметрами, пригодными для жизни.

Если принять эту точку зрения, нам следует задаться вопросом: в какого типа мирах мы могли бы жить? Большинство вселенных окажутся мрачными и непригодными для обитания, но пожаловаться на это будет некому. Все разумные существа обнаружат, что находятся в редких благоприятных вселенных, и будут восхищаться удивительным подбором постоянных, делающих возможным их существование. Этот ход рассуждений известен как *антропный принцип*. Название было придумано в 1974 году кембриджским астрофизиком Брэндоном Картером¹, который предложил следующую формулировку принципа: "...все наши ожидания в отношении возможных наблюдений должны быть ограничены условиями, необходимыми для нашего существования как наблюдателей"ⁱⁱⁱ.

Антропный принцип — это критерий отбора. Он предполагает существование неких отдаленных доменов, где фундаментальные постоянные иные. Эти домены могут располагаться в далеких частях нашей собственной Вселенной или принадлежать другим, совершенно не связанным пространствам-временам. Совокупность доменов с самыми разнообразными свойствами называется *мультиверсом* — это термин был введен бывшим одноклассником Картера Мартином Рисом, ныне британским королевским астрономом. Далее в этой книге мы встретим три типа мультиверсных ансамблей. Первый состоит из множества регионов, принадлежащих одной Вселенной. Второй тип состоит из отдельных несвязанных вселенных². А третий пред-

¹ Ныне он работает в обсерватории Медон во Франции.

² Философы часто определяют Вселенную как "все сущее". Тогда, конечно, не может быть никаких других вселенных. Физики обычно не используют данный термин в столь широком смысле и говорят о совершенно не связанных, самодостаточных пространствах-временах как об отдельных вселенных. Здесь я следую именно этой физической традиции.

ставляет собой сочетание этих двух: он состоит из множества вселенных, в каждой из которых содержится множество различных регионов. Если мультиверс любого типа действительно существует, то неудивительно, что фундаментальные постоянные так хорошо подходят для жизни. В противном случае они с гарантией будут тонко настроены.

Антропную аргументацию также можно применить к изменениям наблюдаемых свойств во времени, а не только в пространстве. Одним из первых приложений антропного принципа стало объяснение Робертом Дикке современного возраста Вселенной. Он указал, что жизнь может возникнуть только после того, как в звездных недрах будут синтезированы тяжелые элементы. Это занимает несколько миллиардов лет. Элементы затем рассеиваются взрывами сверхновых, и нужно еще несколько миллиардов лет для образования второго поколения звезд и их планетных систем из продуктов взрывов и для протекания биологической эволюции. Так что первые наблюдатели не могли появиться ранее, чем через 10 миллиардов лет ПБВ. Также следует учесть, что звезды, подобные нашему Солнцу, исчерпывают свою ядерную энергию примерно за 10 миллиардов лет, и при этом галактические запасы газа для формирования новых звезд исчерпываются в том же масштабе времени. Примерно через 100 миллиардов лет ПБВ в наблюдаемой Вселенной останется очень мало солнцеподобных звезд^{iv}. Если предположить, что жизнь исчезнет вместе со смертью звезд, то остается окно, скажем, между 5 и 100 миллиардами лет, когда могут существовать наблюдатели¹. Неудивительно, что современный возраст Вселенной попадает в это окно^v.

1 Можно представить, что высокоразвитая цивилизация сумеет пережить смерть звезд, используя ядерную или приливную энергию для поддержания жизни. Но более вероятным кажется, что цивилизации живут относительно недолго. Я касаюсь этого вопроса в примечании i в конце этой главы.

Использованный Дикке способ применения антропного принципа для получения интервала времени, в течение которого возможно наше существование, не выглядит бесспорным. Но Брэндон Картер, Мартин Рис и некоторые другие физики попытались пойти дальше, используя антропный принцип для объяснения тонкой настройки фундаментальных констант. Вот здесь-то и начинаются разногласия.

ЧТО ОБЩЕГО МЕЖДУ АНТРОПНЫМ ПРИНЦИПОМ И ПОРНОГРАФИЕЙ?

Антропный принцип в формулировке Картера является тривиальной истиной. Фундаментальные постоянные и наше местоположение в пространстве-времени не должны препятствовать существованию наблюдателей. В противном случае наши теории были бы логически непоследовательными. В такой интерпретации, в качестве элементарного логического требования, антропный принцип, конечно, бесспорен, но вместе с тем не слишком полезен. Однако любая попытка использования его в качестве объяснения тонкой настройки Вселенной вызывает неодобрительную и весьма резкую реакцию со стороны физического сообщества.

Для этого действительно есть довольно серьезные причины. Чтобы объяснить тонкую настройку, постулируется существование мультиверса, состоящего из далеких доменов, где фундаментальные постоянные иные. Проблема, однако, в том, что нет ни единого свидетельства в пользу этой гипотезы. Даже хуже — похоже, нет никакой возможности *когда-либо* подтвердить или опровергнуть ее. Философ Карл Поппер писал, что любое утверждение, которое не может быть фальсифицировано, не является научным. Из этого критерия, признаваемого большинством физиков, по-видимому, естественным образом

следует, что антропное объяснение тонкой настройки является ненаучным. Другая, связанная с первой, линия критики говорит о том, что антропный принцип может служить для объяснения лишь того, что мы уже знаем. Он никогда ничего не предсказывает и потому не может быть проверен.

Успеху идеи не способствовала и аура туманных и бесполовых интерпретаций, окружающая тему антропного принципа в целом¹. А вдобавок ко всему в литературе приводится множество различных формулировок данного принципа (философ Ник Бостром, автор книги по этой теме^{vi}, насчитал их более тридцати). Ситуация отлично характеризуется цитатой из Марка Твена: “Исследования многих комментаторов уже пролили достаточно тьмы на этот предмет, и вполне возможно, что, продолжай они дальше в том же духе, мы скоро не будем ничего о нем знать”^{vii}. Даже сам термин “антропный” служит источником недоразумений, поскольку словно бы отсылает именно к человеческим существам, а не любым разумным наблюдателям.

Однако основной причиной столь эмоциональной реакции на антропные объяснения послужило, вероятно, ощущение предательства. Со времен Эйнштейна физики верили, что настанет день, когда все фундаментальные постоянные будут выведены из некой всеохватывающей окончательной теории. Обращение к антропным аргументам рассматривалось как капитуляция и вызывало реакцию в диапазоне от раздражения до открытой враждебности. Некоторые хорошо известные физики дошли до того, что стали называть антропные идеи “опасными”^{viii} и говорить, будто они “развращают науку”^{ix}. Только в исключительных

1 Сам Картер внес свой вклад в общую путаницу, введя альтернативную версию принципа, называемую “сильным антропным принципом”, гласящую, что “...Вселенная... должна быть такой, чтобы на определенной стадии допускать появление наблюдателей”. Многие восприняли эту формулировку в мистическом смысле — как указание на определенного рода теологическую необходимость. В этой книге я следую первоначальной формулировке Картера, которую он называет “слабым антропным принципом”.

случаях, когда все иные возможности исчерпаны, может быть простительно упомянуть об “антропности”, да и то не всегда. Лауреат Нобелевской премии Стивен Вейнберг однажды сказал, что физик, говорящий об антропном принципе, “подвергается такому же риску, как священник, рассуждающий о порнографии. Сколько бы он ее ни порицал, кое-кто все равно подумает, будто он немного интересуется предметом”.

КОСМОЛОГИЧЕСКАЯ ПОСТОЯННАЯ

Если какая-то проблема и требовала применения крайних мер, то это проблема космологической постоянной. Различные вклады в плотность энергии вакуума будто сговорились компенсировать друг друга с точностью до 1 к 10^{120} . Это самый вопиющий и необъяснимый случай тонкой подстройки в физике. Андрей Линде был одним из первых смельчаков, применивших антропный подход к этой проблеме. Его не удовлетворяли туманные разговоры о “других вселенных”, и он предложил конкретную модель, описывающую, каким образом космологическая постоянная может варьироваться и что способно вызывать ее изменения от одного места к другому.

Линде использовал все ту же идею, что и раньше. Помните маленький шарик, скатывающийся по энергетическому ландшафту? Шарик представляет собой скалярное поле, а высота, на которой он находится, — плотность энергии этого поля. Пока шарик катится вниз, его энергия вызывает инфляционное расширение Вселенной.

Линде взял из этой модели то, что различные высоты ландшафта соответствуют различным плотностям энергии. Он предположил существование другого скалярного поля со своим энергетическим ландшафтом. Чтобы не путать его с полем, ответственным за инфляцию, последнее мы будем в дальнейшем

называть “инфлатоном” — это термин, обычно применяемый в физической литературе. В наших окрестностях инфлатон уже скатился к подножию своего энергетического холма. (Это случилось 14 миллиардов лет назад, в конце эпохи инфляции.) Чтобы новое поле не скатилось вниз слишком быстро, Линде ввел условие, что для него склон должен быть чрезвычайно пологим, намного более пологим, чем в модели инфляции. Любой уклон, каким бы малым он ни был, заставит поле в конце концов скатиться вниз. Но при меньшем уклоне понадобится больше времени, чтобы “заставить шарик катиться”. Линде предположил уклон настолько малый, что за 14 миллиардов лет, прошедших с момента Большого взрыва, поле не изменилось существенным образом. Но если склон имеет огромную протяженность в обоих направлениях, плотность энергии может достигать очень больших положительных или отрицательных значений.

Полная плотность энергии вакуума — космологическая постоянная — получается путем добавления плотности энергии скалярного поля к плотностям энергии фермионов и бозонов, которые вычисляются в физике элементарных частиц. Даже если нет никакого чудесного сокращения вкладов разных частиц и их совокупный вклад в энергию вакуума велик, на склоне будет такой участок, где вклад скалярного поля окажется равен по величине и противоположен по знаку, так что полная плотность энергии вакуума оказывается нулевой. Предполагается, что в нашей части Вселенной скалярное поле очень близко к этому участку.

Если скалярное поле меняется от одной части Вселенной к другой, то и космологическая “постоянная” тоже будет переменной, и это все, что требуется для применения антропного принципа. Но что может вызывать вариации скалярного поля? На этот вопрос Линде тоже нашел хороший ответ!

Еще до Большого взрыва в процессе вечной инфляции поле подвержено случайным квантовым флуктуациям. Поведение поля по-прежнему можно описывать как случайные блуж-

Плотность
энергии



Скалярное поле

Рис. 13.2. Скалярное поле на очень пологом энергетическом ландшафте.

дания пьяниц, расходящихся с вечеринки (см. главу 8). В данном случае уклон холма слишком мал, чтобы оказывать на них какое-либо влияние, так что пьяницы шагают вправо и влево практически с равной вероятностью. Даже начав с одного места, они будут постепенно удаляться и, если дать им достаточно времени, распределятся по всей длине склона. (Помните — в условиях вечной инфляции нет недостатка во времени.) Поскольку пьяницы представляют значения скалярного поля в различных областях пространства, мы приходим к выводу, что квантовые процессы в ходе инфляции с необходимостью порождают набор областей со всеми возможными значениями поля, а значит, и со всеми возможными значениями космологической постоянной.

Пока пьяницы блуждают по склону, расстояния между областями, которые они представляют, растягиваются экспоненциальным инфляционным расширением. Как результат, пространственные вариации плотности энергии вакуума становятся чрезвычайно малыми¹. Придется преодолеть гуголы километров, прежде чем станет заметно хоть какое-то изменение.

Чтобы высота заметно изменилась, пьяница должен пройти большое расстояние вдоль очень пологого склона, Вселенная за это время испытает колоссальное расширение.

Модель Линде можно расширить, включив больше скалярных полей, и сделать переменными другие фундаментальные постоянные¹. И если физика элементарных частиц позволяет константам меняться, то квантовые процессы во время вечной инфляции неизбежно порождают огромные области пространства со всеми возможными значениями постоянных. Итак, вечная инфляция естественным образом создает условия для применения антропного принципа.

Теперь, когда у нас имеется ансамбль областей с различными значениями космологической постоянной, какое значение мы с наибольшей вероятностью обнаружим в наблюдениях? В областях, где плотность массы вакуума больше плотности воды (1 грамм на кубический сантиметр), звезды будут разрываться на части отталкивающей гравитацией. Но оказывается, что и гораздо меньшие значения плотности вакуума вызовут достаточно нарушений, чтобы сделать невозможным существование наблюдателей. Это было показано Стивеном Вайнбергом в статье, которая позднее стала классикой антропной аргументации.

По мере расширения Вселенной плотность вещества снижается, и неизбежно наступит время, когда она станет ниже вакуумной. Вайнберг обнаружил, что после того, как это случится, вещество больше не сможет сгущаться в галактики; напротив, оно станет рассеиваться отталкивающей гравитацией. Чем больше космологическая постоянная, тем раньше наступит эпоха доминирования вакуума. Области, где он начинает доминировать прежде, чем образуются первые галактики, имеют все шансы никогда не обзавестись космологами, которых беспокоила бы проблема космологической постоянной.

Влияние отрицательной космологической постоянной еще более опустошительно. В этом случае вакуумная гравитация положительна, и доминирование вакуума приводит к быстро-

1 Неизвестно, существуют ли в действительности скалярные поля, постулируемые Линде. Мы вернемся к этому вопросу в главе 15.

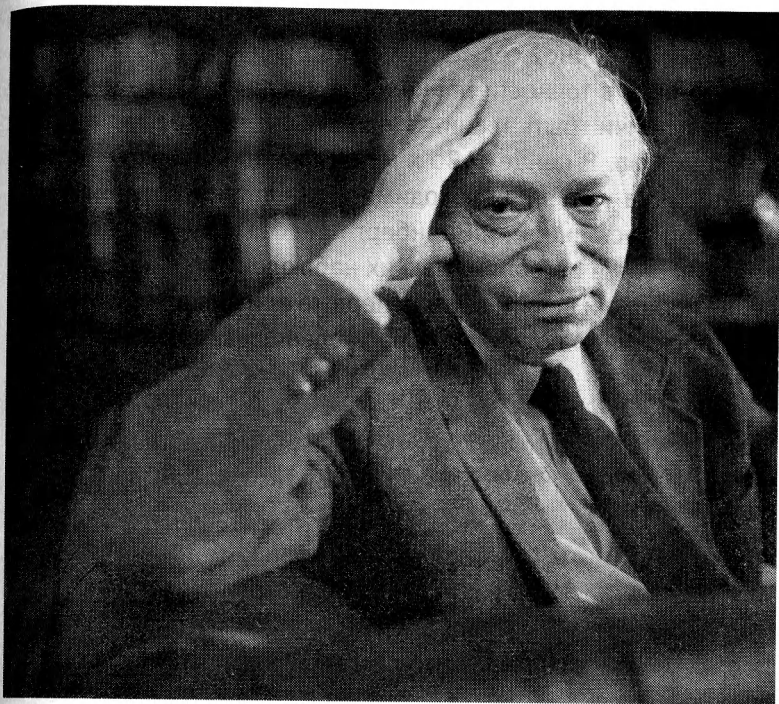


Рис. 13.3. Стивен Вайнберг.

му сжатию и коллапсу соответствующих областей. Антропный принцип требует, чтобы коллапс не случился, пока не образуются галактики и пока не пройдет достаточно времени для развития наблюдателей.

Согласно выполненному Вайнбергом анализу, наибольшая плотность массы вакуума, которая еще позволяет сформироваться некоторым галактикам, примерно равна одному атому водорода на кубический метр, то есть в 10^{27} раз меньше плотности воды. Это был существенный прогресс по сравнению с гуголами тонн на кубический сантиметр, следующими из физики элементарных частиц.

Если малость космологической постоянной действительно связана с антропной селекцией, то ее значение, хоть и мало, не должно быть в точности равно нулю. На самом деле у нее нет никаких причин быть значительно меньше, чем требует антропный принцип. В конце 1980-х годов точность наблюдений как раз достигла уровня, необходимого для детектирования таких значений постоянной, и Вайнберг предсказал, что вскоре она проявит себя в астрономических наблюдениях. И в самом деле, не прошло и десяти лет, как первые признаки космологической постоянной появились в наблюдениях сверхновых.

ГЛАВА 14

Заурядность, возведенная в принцип

Я считаю себя средним человеком,
за исключением того факта,
что я считаю себя средним человеком.
Мишель Монтень (1533–1592)

КОЛОКОЛООБРАЗНАЯ КРИВАЯ

Самая серьезная критика антропного принципа связана с тем, что он не дает никаких проверяемых предсказаний. Весь его смысл сводится к тому, что мы можем наблюдать лишь такие значения постоянных, которые позволяют существовать наблюдателям. Это утверждение трудно считать предсказанием, поскольку оно с гарантией истинно. Вопрос в том, можем ли мы предложить что-то получше? Можно ли извлечь из антропных рассуждений какие-то нетривиальные предсказания?

Если величины, которые я собираюсь измерить, могут случайным образом принимать значения в широком диапазоне, то мне не удастся уверенно предсказать результаты измерений. Но я могу по крайней мере сделать статистическое предсказание. Допустим, я хочу предсказать рост первого встречного человека

на улице. Согласно “Книге рекордов Гиннесса”, самым высоким человеком в истории медицины был американец Роберт Першинг Уэдлоу, чей рост составлял 2,72 метра. Самый низкий взрослый человек, индеец Гал Мохаммед, имел рост 57 сантиметров. Чтобы быть уверенным в успехе, мне следует предсказать, что первый встречный будет иметь рост где-то между этими крайними значениями. Если только рекорды Гиннесса не будут побиты, это предсказание с гарантией окажется правильным.

Чтобы сделать более содержательное предсказание, мне следует изучить статистические данные о росте жителей Соединенных Штатов. Распределение по росту описывается колоколообразной кривой, изображенной на рисунке 14.1, с медианой 1,77 метра (50% людей ниже и 50% — выше этого значения). Вряд ли первый встречный окажется великаном или карликом, поэтому я могу ожидать, что его рост окажется где-то около середины распределения. Чтобы сделать предсказание более определенным, я могу допустить, что он не будет из числа 2,5% самых низкорослых или из 2,5% самых высоких американцев. Остальные 95% имеют рост от 1,63 до 1,90 метра. Если я предскажу, что встречный будет иметь рост в этом диапазоне, а затем многократно проведу эксперимент, можно ожидать, что в 95% случаев я буду прав. Это называется предсказанием с точностью 95%.

Чтобы сделать предсказание с точностью 99%, мне следует отбросить по 0,5% с обоих концов распределения. Чем выше точность, тем меньше мои шансы ошибиться, но прогнозируемый диапазон роста становится все шире, а само предсказание — все менее интересным.

Можно ли применить аналогичную технику к предсказанию фундаментальных постоянных? Я пытался найти ответ на этот вопрос летом 1994 года, когда гостил у моего друга Тибо Дамура (Thibault Damour) во французском Институте высших научных исследований. Институт расположен в небольшой деревушке Бюр-сюр-Иветт (Bures sur Yvette) в 30 минутах поездом

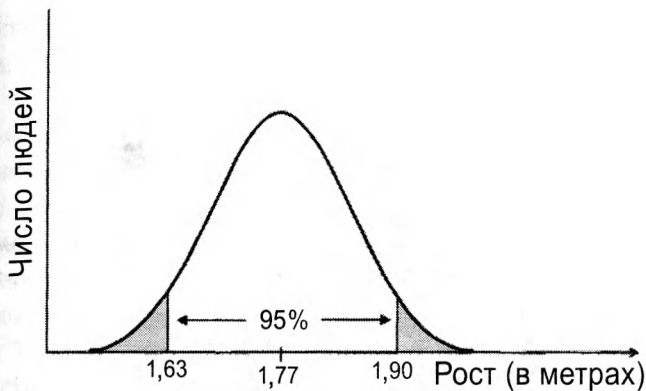


Рис. 14.1. Распределение американцев по росту. Число людей с ростом в определенном интервале пропорционально площади под соответствующим участком кривой. Серые “хвосты” колоколообразной кривой соответствуют 2,5% на нижнем и на верхнем краях распределения. Попадание в диапазон между этими отмеченными областями предсказывается с точностью 95%.

от Парижа. Мне нравится французская провинция, французское вино и — несмотря на всю ее калорийность — французская кухня. Знаменитый российский физик Лев Ландау часто говорил, что один бокал спиртного убивает его вдохновение на неделю. К счастью, это не мой случай. Вечером, воодушевленный замечательным ужином, я прогуливался по лугам вдоль берегов речки Иветт, а мои мысли постепенно вернулись к проблеме антропных предсказаний.

Допустим, что фундаментальная постоянная, назовем ее X , меняется от одной области Вселенной к другой. В некоторых областях присутствие наблюдателей невозможно, а в других они могут существовать, и значение X будет измерено. Предположим также, что некое Статистическое бюро Вселенной собирает и публикует результаты этих измерений. Распределение значений, измеренных различными наблюдателями, будет, скорее всего, иметь колоколообразную форму — подобную той, что на

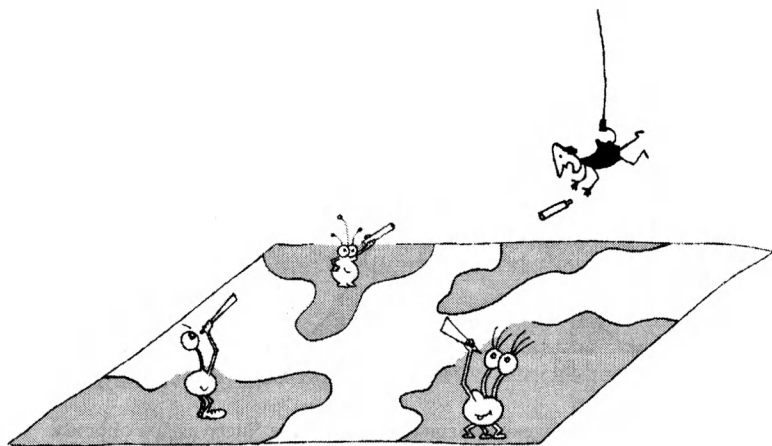


Рис. 14.2. Наблюдатель, случайным образом вброшенный во Вселенную.
Измеренные им значения постоянных могут быть предсказаны
по статистическому распределению.

рисунке 14.1. Тогда мы можем отбросить 2,5% с обоих концов распределения и предсказать значение X с точностью 95%.

Каков может быть смысл подобного предсказания? Если мы случайно вбросим наблюдателя во Вселенную, обнаруженное им значение X будет находиться в предсказанном интервале в 95% случаев. К сожалению, мы не можем проверить такого рода предсказание, поскольку все области с различными значениями X находятся далеко за горизонтом. Мы можем измерить X только в нашей местной области. Но что мы все-таки можем, так это считать свое положение случайным. Мы — лишь одна из множества цивилизаций, разбросанных по Вселенной. Априори у нас нет оснований считать, что значение X в нашей области очень редкое, иными словами, особое по сравнению с величинами, измеренными другими наблюдателями. Отсюда мы можем с точностью 95% предсказать, что наши измерения дадут значение в указанном диапазоне. Для данного подхода

ключевую роль играет предположение о нашей неискл^ючительности; я называю его “принципом заурядности”.

Некоторые мои коллеги возражают против такого наименования. Вместо этого они предлагают говорить о “принципе демократии”. Конечно, никто не хочет быть заурядным, но зато это слово выражает ностальгию по тем временам, когда люди находились в центре мира. Так заманчиво думать, что мы особенные, но в космологии предположение о нашей заурядности вновь и вновь оказывается очень плодотворной гипотезой.

Такого же рода рассуждения применимы и к предсказанию роста людей. Представьте на мгновение, что вы не знаете собственного роста. Тогда, чтобы предсказать его, вы можете использовать статистические данные для своей страны и пола. Если, например, вы взрослый мужчина, живущий в США, и у вас нет оснований считать себя необычно высоким или низким, то с 95-процентной уверенностью вы можете считать, что ваш рост лежит в интервале от 1,63 до 1,90 метра.

Позднее я узнал: сходные идеи уже высказывали философ Джон Лесли (John Leslie) и — независимо от него — принстонский астрофизик Ричард Готт (Richard Gott). Главным образом их интересовало предсказание долговечности человеческой расы. Они доказывали, что человечество вряд ли проживет намного дольше, чем уже существует, поскольку в противном случае мы находились бы на удивление близко к началу нашей истории. Это так называемый “аргумент судного дня”. Он восходит к Брэндону Картеру, изобретателю антропного принципа, который изложил данный аргумент на своей лекции в 1983 году, но никогда не публиковал его в печати (похоже, Картеру и без того хватало спорных идей)¹. Готт также использовал аналогичное рассуждение для предсказания падения Берлинской стены и срока жизни британского журнала *Nature*, где он опубликовал свою первую статью на эту тему. Последнее предсказание о том, что *Nature* будет выходить до 6800 года, пока остается непроверенным.

Если у нас есть статистическое распределение для фундаментальных постоянных, измеренных другими наблюдателями, мы можем, опираясь на принцип заурядности, сделать предсказание с заданным уровнем надежности. Но откуда мы получим это распределение? Вместо данных Статистического бюро Вселенной мы можем использовать результаты теоретических расчетов. Статистическое распределение нельзя узнать без теории, описывающей мультиверс с переменными константами. В настоящее время лучший кандидат на роль такой теории — это теория вечной инфляции. Как говорилось в предыдущей главе, квантовые процессы в инфлирующем пространстве-времени порождают множество доменов со всеми возможными значениями постоянных. Мы можем попробовать рассчитать распределение для констант, исходя из теории вечной инфляции, а затем — кто знает! — можем сопоставить результаты с экспериментальными данными. Тем самым, открывается захватывающая перспектива несмотря ни на что сделать вечную инфляцию объектом наблюдательной проверки. Конечно, я не мог упустить такую возможность.

ПОДСЧЕТ НАБЛЮДАТЕЛЕЙ

Рассмотрим большой объем пространства — настолько большой, что он охватывает области со всеми возможными значениями констант. Некоторые из этих областей плотно заселены разумными наблюдателями. Другие, менее благоприятные для жизни, больше в объеме, но при этом малонаселенные. Большая часть объема будет занята громадными пустынными доменами, где наблюдателей быть не может.

Число наблюдателей, которые обнаружат определенные значения констант, определяется двумя коэффициентами: объемом тех областей, где константы имеют указанные значения (в кубических световых годах, например), и числом наблюда-

телей на один кубический световой год. Долю объема можно определить на основе теории инфляции в совокупности с моделью физики элементарных частиц для переменных констант (такой как модель скалярного поля для космологической постоянной). Но второй коэффициент, плотность наблюдателей, вызывает гораздо больше трудностейⁱⁱ. Мы очень мало знаем о происхождении жизни, не говоря уже о разуме. Как тогда мы можем надеяться определить число наблюдателей?

Спасительным может стать тот факт, что некоторые константы не влияют непосредственно на физику и химию жизни. В качестве примеров можно привести космологическую постоянную, массу нейтрино и параметр, обычно обозначаемый Q , который характеризует величину первичных возмущений плотности. Изменения таких нейтральных в отношении жизни констант могут повлиять на образование галактик, но не на шансы развития жизни в конкретной галактике. Напротив, такие константы, как масса электрона или ньютоновская гравитационная постоянная, непосредственно влияют на жизненные процессы. Наше неведение относительно жизни и разума можно исключить, если мы сконцентрируемся на тех областях, где влияющие на жизнь константы имеют такие же значения, как и в наших окрестностях, а различаются только значения бионейтральных. Все галактики в таких областях будут содержать примерно одинаковое число наблюдателей, так что их плотность будет просто пропорциональна плотности галактикⁱⁱⁱ.

Итак, стратегия состоит в ограничении анализа бионейтральными константами. Проблема тогда сводится к вычислению количества галактик на единицу объема пространства — хорошо исследованной астрофизической задаче. Результат этих расчетов совместно с коэффициентом объема, выведенным из теории инфляции, как раз и даст нам нужное статистическое распределение.

НАСТУПЛЕНИЕ НА КОСМОЛОГИЧЕСКУЮ ПОСТОЯННУЮ

Пока я размышлял о наблюдателях в далеких доменах с другими фундаментальными постоянными, было трудно поверить, что уравнения, которые я писал в своем блокноте, имеют отношение к чему-то реальному. Но, оставив этот вопрос в стороне, я смело двинулся вперед: я хотел понять, может ли принцип заурядности пролить хоть какой-то свет на проблему космологической постоянной.

Первый шаг был уже сделан Стивеном Вайнбергом. Он изучил, как влияет космологическая постоянная на образование галактик, и установил антропные границы для этой константы: значение, выше которого энергия вакуума станет доминировать во Вселенной слишком быстро, не позволяя образоваться галактикам. Более того, как я уже отмечал, Вайнберг вывел из своего анализа *предсказание*. Если между нулем и антропной границей мы выберем произвольное значение, оно вряд ли будет много меньше этой границы — по той же причине, по которой первый встретившийся нам человек вряд ли окажется карликом. Таким образом, Вайнберг утверждал, что значение космологической постоянной в нашей части Вселенной должно быть сравнимо с антропной границей¹.

Хотя эти рассуждения звучат убедительно, я должен сделать некоторые оговорки. В областях, где космологическая постоянная

1 Антропная граница, полученная Вайнбергом, была слишком велика — примерно в 500 раз выше средней плотности вещества во Вселенной. В середине 1990-х наблюдательные данные уже говорили о том, что в нашей области пространства космологическая постоянная почти в 50 раз меньше. Кроме того, определение границы Вайнберга основывалось на данных о самых далеких галактиках, известных в конце 1980-х. На сегодня открыты еще более далекие галактики, и соответствующая граница была бы в 4000 раз больше средней плотности вещества.

ная сравнима с антропной границей, образование галактик вряд ли возможно и плотность наблюдателей очень низка. Большинство наблюдателей окажутся в областях, изобилующих галактиками, где космологическая постоянная заметно ниже границы и достаточно мала, чтобы начать доминировать во Вселенной только после того, как процесс формирования галактик будет более или менее завершен. Принцип заурядности говорит, что мы, скорее всего, обнаружим, что оказались именно среди этих наблюдателей.

Я грубо прикинул, что космологическая постоянная, измеренная типичным наблюдателем, не должна заметно — более чем в 10 раз — превышать среднюю плотность вещества. Намного меньшие значения тоже маловероятны — так же как встреча с карликом. Этот анализ я опубликовал в 1995 году, предсказав, что в нашем регионе мы должны получить значение примерно в десять раз больше плотности вещества^{iv}. Более тщательные расчеты, также основанные на принципе заурядности, были выполнены позднее оксфордским астрофизиком Джорджем Эфстатиу (George Efstathiou)^v и Стивеном Вайнбергом, к которым теперь присоединились Хьюго Мартел (Hugo Martel) и Пол Шапиро (Paul Shapiro). Они пришли к аналогичным выводам.

Я был крайне воодушевлен возможностью превратить антропные рассуждения в проверяемые предсказания. Но лишь очень немногие разделяли мой энтузиазм. Ведущий специалист по теории струн Джозеф Полчински (Joseph Polchinski) однажды сказал, что бросит физику, если будет открыто ненулевое значение космологической постоянной¹. Полчински понимал, что единственное объяснение малой космологической постоянной — антропное, и он просто не мог смириться с этой мыслью. Ответом на мои доклады об антропных предсказани-

¹ Об этом мне рассказал Шон Кэрролл (Sean Carroll) из Чикагского университета.

ях часто служила напряженная тишина. После одного из выступлений некий выдающийся принстонский космолог поднялся и сказал: “Если кто-то хочет работать над антропным принципом — пусть работает”. Тон этого замечания не оставлял сомнений в том, что такие люди зря теряют время.

СПАСИТЕЛЬНЫЕ СВЕРХНОВЫЕ

Как я уже упоминал в предыдущих главах, первая публикация данных о ненулевом значении космологической постоянной стала настоящим шоком для большинства физиков. Результаты основывались на изучении взрывов далеких сверхновых особого вида — так называемых сверхновых типа Ia.

Считается, что эти гигантские взрывы происходят в двойных звездных системах, состоящих из активной звезды и белого карлика — компактного остатка звезды, исчерпавшей свое ядерное топливо. Одиному белому карлику положено медленно затухать, но при наличии компаньона его жизнь может закончиться грандиозным фейерверком. Он должен захватывать часть газа, выбрасываемого звездой-компаньоном, так что его масса будет неуклонно расти. Между тем существует максимальная масса, которую может иметь белый карлик — так называемый предел Чандрасекара, — за которым гравитация вызывает коллапс, приводящий к колоссальному термоядерному взрыву. Именно его мы и наблюдаем как сверхновую типа Ia.

На небе появляется яркая точка — на пике своего блеска сверхновая может светить как 4 миллиарда звезд. В галактике вроде нашей сверхновые типа Ia вспыхивают примерно один раз в 300 лет. Чтобы засечь десятки таких взрывов, астрономы несколько лет следили за тысячами галактик. Но их усилия были вознаграждены. Сверхновые типа Ia очень близки к давней мечте астрономов о *стандартной свече* — клас-

се космических объектов, которые имеют в точности одинаковую мощность излучения. Расстояния до стандартных свеч можно определить по их видимому блеску — точно так же, как расстояние до 100-ваттной лампочки определяется по создаваемой ею освещенности. Без таких волшебных объектов определение расстояний в астрономии становится удручающе сложной задачей.

Сверхновые типа Ia имеют почти одинаковую мощность, поскольку взрывающиеся белые карлики обладают одинаковой массой, равной пределу Чандрасекара^{vi}. Зная эту мощность, можно определить расстояние до сверхновой, а раз нам известно расстояние, то легко найти и время взрыва — просто подсчитав, за какой срок свет покроет эту дистанцию. Кроме того, для определения скорости, с которой в то время расширялась Вселенная, можно использовать покраснение, или доплеровское смещение света^{vii}. Таким образом, анализируя свет далеких сверхновых, можно выяснить историю космологического расширения.

Этот метод был усовершенствован двумя конкурирующими группами астрономов, одна из которых называлась *Supernova Cosmology Project*, а другая *High-Z¹ Supernova Search Team*. Эти две группы соревновались в определении темпов замедления космологического расширения под действием гравитации. Но обнаружили они нечто совершенно иное. В 1998 году команда *High-Z* сообщила, что вместо замедления уверенно наблюдает ускорение расширения Вселенной на протяжении последних примерно пяти миллиардов лет. Чтобы сделать такое заявление, требовалась определенная смелость, поскольку ускоренное расширение было недвусмысленным признаком космологической постоянной. Когда одного из руководителей группы, Брайана Шмидта (*Brian Schmidt*), попросили выразить свое от-

¹ В космологии *Z* традиционно используется для обозначения красного смещения.

ношение к этому результату, он ответил: “Нечто среднее между удивлением и ужасом”^{viii}.

Несколько месяцев спустя команда Supernova Cosmology Project сообщила об очень похожих результатах. Как выразился руководитель этой группы Сол Перлмуттер (Saul Perlmutter), результаты двух команд находились “в отчаянной согласии”.

Открытие породило в физическом сообществе настоящую взрывную волну. Некоторые просто отказывались верить полученным результатам. Слава Муханов¹ предложил мне поспорить на бутылку бордо, что свидетельства космологической постоянной вскоре бесследно исчезнут. Когда в итоге Муханов выставил бутылку, мы вместе насладились вином, и, похоже, присутствие космологической постоянной не повлияло на его букет.

Было также предположение, что на яркость сверхновых могут влиять факторы, отличные от расстояния. Например, если бы свет рассеивался частицами пыли в межгалактическом пространстве, сверхновые выглядели бы более тусклыми, вводя нас в заблуждение и заставляя думать, что они находятся дальше, чем есть. Эти сомнения были рассеяны спустя несколько лет Адамом Райессом (Adam Riess) из Института космического телескопа в Балтиморе, который изучал самую далекую сверхновую, известную на тот момент, — SN 1997ff. Если бы ослабление было вызвано экранирующей пылью, эффект лишь возрастал бы с расстоянием. Но эта сверхновая была *ярче*, а не слабее, чем должна быть в “пограничной” Вселенной, которая не ускоряется и не тормозится. Объяснение состояло в том, что она взорвалась через 3 миллиарда лет ПБВ, в эпоху, когда энергия вакуума еще не доминировала, и ускоренное расширение не началось.

1 Муханов — тот самый человек, который первым вычислил плотность возмущений, возникающих вследствие квантовых флуктуаций в ходе инфляции (см. фото на с. 85).

По мере того как свидетельства в пользу ускоренного расширения становились все сильнее, космологи начинали понимать, что с определенной точки зрения возвращение космологической постоянной — не такая уж плохая вещь. Во-первых, как говорилось в главе 9, она обеспечивает недостающую массу, делая общую плотность Вселенной равной критической. А во-вторых, она разрешает давнюю проблему несоответствия космических возрастов. Возраст Вселенной, вычисленный без космологической постоянной, оказывался меньше возраста самых старых звезд. Если же космологическое расширение ускоряется, значит, в прошлом оно шло медленнее, и Вселенной потребовалось больше времени, чтобы расшириться до своего нынешнего размера¹. Космологическая постоянная делает Вселенную старше, устраняя несоответствие возрастов^{ix}.

Итак, спустя всего несколько лет после открытия космологического расширения было уже трудно представить себе, как мы вообще могли без него жить. И сегодня дебаты сместились к вопросу о том, что же оно собой представляет.

ОБЪЯСНЯЯ СОВПАДЕНИЕ

Наблюдавшееся значение плотности энергии вакуума — примерно втрое превосходящее среднюю плотность вещества — в первом приближении соответствовало значениям, которые тремя годами раньше были предсказаны на основе принципа заурядности. Обычно физики считают успешные предсказания сильным доводом в пользу теории. Но в этот раз они не спешили признавать антропную аргументацию. В первые годы после открытия многие физики прикладывали невероятные

¹ Здесь термин “Вселенная” используется в значении “видимая Вселенная”, а “возраст Вселенной” — в смысле “время, прошедшее с момента Большого взрыва в нашей области пространства”.

усилия в попытках объяснить ускоренное расширение без обращения к антропным аргументам. Самой популярной среди этих попыток была модель квинтэссенции, разработанная Полом Стейнхардтом (Paul Steinhardt) с коллегами^x.

Идея квинтэссенции состоит в том, что энергия вакуума не постоянна, а постепенно убывает с расширением Вселенной. Ныне она так мала потому, что Вселенная весьма стара. Точнее говоря, квинтэссенция — это скалярное поле, энергетический ландшафт которого будто специально спроектирован для скоростного лыжного спуска (рис. 14.3). Предполагается, что в ранней Вселенной поле было высоко на холме, но к настоящему времени скатилось вниз, что соответствует низкой плотности энергии вакуума.

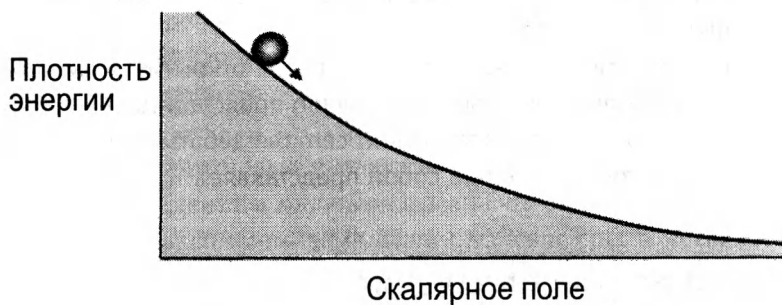


Рис. 14.3. Энергетический ландшафт квинтэссенции.

Недостаток этой модели состоит в том, что она не решает загадку совпадения — почему современная плотность энергии вакуума оказалась сравнимой с плотностью вещества (см. главу 12). Форму энергетического холма можно подобрать так, чтобы это произошло, но это будет простой подгонкой, а не объяснением данных^{xi}.

С другой стороны, антропный подход предлагает естественное решение. Согласно принципу заурядности, большинство наблюдателей живет в таких областях, где плотность материи сравнялась с космологической постоянной как раз вблизи эпо-

хи образования галактик. Формирование гигантских спиральных галактик, подобных нашей, завершилось в относительно недавнем космологическом прошлом — примерно через несколько миллиардов лет ПБВ^{xii}. С тех пор плотность вещества стала ниже, чем у вакуума, но не намного (в нашей области — примерно в три раза)^{xiii}.

Несмотря на многочисленные попытки, никакого другого способа правдоподобно объяснить это совпадение предложено не было. Постепенно коллективное сознание физиков стало привыкать к мысли, что антропная картина мира может закрепиться надолго.

ЗА И ПРОТИВ

Нетрудно понять, почему многие физики не хотят мириться с антропным объяснением. Стандарты точности в физике очень высоки, можно сказать, неограниченны. Впечатляющий пример дает вычисление магнитного момента электрона. Электрон можно рассматривать как крошечный магнит. Его сила характеризуется магнитным моментом, который впервые вычислил Поль Дирак в 1930-х годах. Результат очень точно согласовывался с экспериментом, но физики вскоре поняли, что имеется небольшая поправка к дираковскому значению, вызванная квантовыми флуктуациями вакуума. В результате началась гонка между теоретиками, которые выполняли все более точные расчеты, и экспериментаторами, измерявшими магнитный момент с все более и более высокой точностью. Самый последний результат измерений дает для поправочного множителя значение 1,001159652188 с погрешностью в последней цифре. Теоретическое значение еще точнее. Удивительно, что согласие между этими двумя величинами наблюдается до 11-го знака после запятой. На самом деле, если бы такого согла-

сия не было, пусть даже расхождение наблюдалось бы только в 11-м знаке, это стало бы сигналом тревоги, указывающим на пробел в нашем понимании электрона.

Антропные предсказания не таковы. Самое большее, на что мы можем надеяться, — это вычислить колоколообразную статистическую кривую. Но даже если рассчитать ее очень точно, мы сможем предсказать только диапазон, в который значение попадет с заданной вероятностью. Дальнейшее совершенствование вычислений не приведет к впечатляющему повышению точности предсказаний. Если наблюдаемая величина попадет в предсказанный интервал, все равно еще надолго останутся сомнения, не произошло ли это в результате чисто случайного совпадения. В случае же промаха можно допустить, что теория все же верна, просто нам довелось оказаться в числе немногих наблюдателей в хвостах колоколообразной кривой.

Неудивительно, что, стоя перед таким выбором, физики не спешат отказываться от своей старой парадигмы в пользу антропной селекции. Но природа уже сделала свой выбор. Мы только выяснили, каким же он был. Если фундаментальные постоянные меняются от одной части Вселенной к другой, то, нравится нам это или нет, лучшее, что можно сделать, — это дать статистическое предсказание на основе принципа заурядности.

Наблюдаемое значение космологической постоянной — сильный довод в пользу существования действительно колоссального мультиверса. Оно попадает в диапазон значений, предсказанный из антропных соображений, а правдоподобных альтернатив, по-видимому, нет. Конечно, это свидетельство в пользу мультиверса — не прямое и всегда останется таковым. Это дело построено на косвенных уликах, и в нем не предполагается заслушивать свидетелей-очевидцев или изучать орудие преступления. Но если при некотором везении мы сделаем еще несколько удачных предсказаний, то сможем считать дело раскрытым за отсутствием обоснованных сомнений.

ГЛАВА 15

Теория Всего

Что меня по-настоящему интересует —
мог ли Бог сотворить мир иным, то есть
оставляют ли требования логической
простоты хоть какую-то свободу.

АЛЬБЕРТ ЭЙНШТЕЙН

В ПОИСКАХ ОКОНЧАТЕЛЬНОЙ ТЕОРИИ

Антропная картина мира держится на предположении, что фундаментальные постоянные могут варьироваться от одного места к другому. Но действительно ли такое возможно? Это вопрос о фундаментальной физической теории: будет ли из нее вытекать один уникальный набор констант или она предоставит более широкий набор возможностей?

Неизвестно, что представляет собой фундаментальная теория, и нет никакой гарантии, что она вообще существует, но поиск окончательной объединенной теории вдохновляет многие современные исследования в области физики элементарных частиц. Есть надежда, что за многочисленностью частиц и раз-

личиями четырех фундаментальных взаимодействий стоит единый математический закон, которые управляет всеми первичными явлениями. Из этого закона могут вытекать все свойства частиц, а также законы гравитации, электромагнетизма, сильного и слабого взаимодействий — подобно тому, как все теоремы геометрии следуют из пяти аксиом Евклида.

Характер объяснения свойств элементарных частиц, которое физики надеются получить из окончательной теории, хорошо иллюстрируется тем, как квантовая механика объяснила химические свойства элементов. В начале прошлого века атомы считались фундаментальными кирпичиками материи. Каждый тип атомов представляет определенный химический элемент, и химики накопили огромный объем данных о свойствах каждого из них и об их взаимодействии друг с другом. К тому времени было известно 92 различных элемента — для фундаментальных строительных блоков это было многовато. К счастью, работа русского химика Дмитрия Менделеева в конце XIX века открыла некоторые закономерности в этой горе данных. Менделеев упорядочил элементы по возрастанию их атомного веса и заметил, что похожие химические свойства появляются в таблице через равные интервалы¹. Никто, однако, не мог объяснить, почему элементы следуют этому периодическому шаблону.

К 1911 году стало ясно, что атомы все-таки не являются фундаментальными частицами. Эрнест Резерфорд продемонстрировал, что атом состоит из роя электронов, обращающихся вокруг маленького тяжелого ядра. Количественное объяснение строения атомов было получено в 1920-х годах, после создания квантовой механики. Оказалось, что электроны, грубо говоря, образуют вокруг ядра серию концентрических оболочек. Каждая оболочка может содержать строго определенное число эле-

1 Другим важным вкладом Менделеева в культуру было совершенствование рецепта русской водки.

ктронов. С добавлением электронов оболочки постепенно заполняются. Химические свойства атома определяются в основном числом электронов на самой внешней его оболочке. Когда начинает заполняться новая оболочка, свойства элементов меняются аналогично — примерно так, как при заполнении предыдущей оболочки¹. Этим объясняется периодичность таблицы Менделеева.

В течение нескольких лет казалось, что фундаментальная структура материи наконец понята. Поль Дирак, один из основателей квантовой механики, заявил в статье 1929 года, что “все базовые физические законы, необходимые для построения математической теории большей части физики и всей химии, уже открыты”. Но затем одна за другой стали появляться новые “элементарные” частицы.

Для начала атомные ядра оказались составными, сложенными из протонов и нейтронов, удерживаемых вместе сильным ядерным взаимодействием. Затем был открыт позитрон, а за ним мюон². Когда протоны врезаются друг в друга на ускорителях, возникают новые виды короткоживущих частиц. Это вовсе не означает, что протоны состоят из них. Если столкнуть два телевизора, то можно быть уверенным, что разлетающиеся обломки — это части, из которых прежде состояли устройства. Но в случае столкновения протонов некоторые образующиеся частицы будут тяжелее самих протонов. Избыток массы возникает из кинетической энергии их движения. Так что эти эксперименты со столкновениями не раскрывали внутреннее устройство протона, а лишь пополняли зоопарк частиц. К концу 1950-х годов их количество превзошло число известных эле-

¹ Другими словами, любые два атома с различным числом населенных оболочек, но с одинаковым числом электронов на внешней оболочке демонстрируют сходное химическое поведение.

² Позитроны — это античастицы электронов. Мюоны — нестабильные частицы, очень похожие на электроны, но в 200 раз тяжелее.

ментов¹. Энрико Ферми, один из пионеров физики элементарных частиц, сказал, что если бы он мог запомнить названия всех частиц, то мог бы стать ботаником¹.

Прорыв, позволивший упорядочить эту хаотичную толпу частиц, совершили независимо друг от друга в начале 1960-х годов Мюррей Гелл-Манн из Калтеха и Ювал Нееман (Yuval Ne'eman), израильский офицер, который ушел в отставку для завершения своей диссертации по физике. Они заметили, что все сильно взаимодействующие частицы подчиняются двум типам симметрии. Позднее Гелл-Манн и — независимо — Георг Цвейг (George Zweig) из ЦЕРНа показали, что эти симметрии можно объяснить, если считать все частицы состоящими из более фундаментальных строительных блоков, которые Гелл-Манн назвал кварками. Это сократило количество элементарных частиц, но не радикально: кварки бывают трех “цветов” и шести “ароматов”, так что имеется 18 кварков и столько же антикварков. В 1969 году за открытие симметрии сильно взаимодействующих частиц Гелл-Манн получил Нобелевскую премию.

Параллельно с этим схожая симметрия обнаружилась и для частиц, участвующих в слабом и электромагнитном взаимодействиях. Ключевую роль в формулировании этой электрослабой теории сыграли гарвардские физики Шелдон Глзшоу (Sheldon Glashow) и Стивен Вайнберг, а также пакистанский физик Абдус Салам. За эту работу они разделили Нобелевскую премию 1979 года. Классификация частиц в соответствии с симметриями играет роль, аналогичную периодической таблице в химии. Вдобавок было выявлено три типа частиц-переносчиков для трех фундаментальных взаимодействий: фотоны для электромагнитных сил, W- и Z-частицы для слабого взаимодействия и

1 Большинство из этих новых частиц неустойчивы и быстро распадаются на уже знакомые нам стабильные частицы.

8 глюонов для сильного. Все эти ингредиенты легли в основу *Стандартной модели* физики элементарных частиц.

Разработка Стандартной модели была завершена в 1970-е годы. Получившаяся теория дала точную математическую схему, которая могла использоваться для определения результатов столкновения любых известных частиц. Эта теория проверена в бесчисленных экспериментах на ускорителях, и на сегодня она подтверждается всеми имеющимися данными. Стандартная модель предсказала свойства W- и Z-частиц, а также дополнительных кварков — все они были позднее открыты. По любым меркам это феноменально успешная теория.

И все же Стандартная модель очевидно слишком громоздкая, чтобы признать ее окончательной теорией. Модель включает более 60 элементарных частиц — не слишком большой шаг вперед по сравнению с числом элементов таблицы Менделеева. В модели (чтобы не путать с таблицей) 25 настраиваемых параметров, которые должны выводиться из экспериментов, но с позиций теории их значения совершенно произвольны. Более того, одно важнейшее взаимодействие — гравитация — осталось за бортом этой модели^{II}. Успех Стандартной модели говорит о том, что мы на правильном пути, но ее недостатки указывают, что поиск должен продолжаться^{III}.

ПРОБЛЕМА С ГРАВИТАЦИЕЙ

Отсутствие гравитации в Стандартной модели — это не просто упущение. На первый взгляд гравитация похожа на электромагнетизм. Например, ньютоновская сила тяготения, так же как и кулоновское электрическое взаимодействие, обратно квадратично зависит от расстояния. Однако все попытки разработать квантовую теорию гравитации по аналогии с теорией

электромагнитного и других взаимодействий в Стандартной модели сталкивались с непреодолимыми трудностями.

Сила электрического взаимодействия между двумя заряженными частицами возникает вследствие непрерывного обмена фотонами. Частицы подобны двум баскетболистам, которые бегут вдоль площадки, перебрасываясь мячом. Аналогично, гравитационное взаимодействие можно описать как обмен квантами гравитационного поля, которые называют *гравитонами*. И такое описание действительно работает довольно хорошо, пока взаимодействующие частицы находятся достаточно далеко. В этом случае гравитация слаба, а пространство-время почти плоское. (Помните — гравитация связана с искривлением пространства-времени.) Гравитоны можно представлять как маленькие бугорки, скачущие между частицами на этом плоском фоне. Однако на очень маленьких расстояниях ситуация совершенно иная. Как говорилось в главе 12, квантовые флуктуации на коротких расстояниях придают пространству-времени пенообразную геометрическую структуру (см. рис. 12.1). Мы не знаем, как описывать движение и взаимодействие частиц в такой хаотической среде. Картина частиц, движущихся сквозь гладкое пространство-время и стреляющих друг в друга гравитонами, очевидным образом не подходит к этому состоянию.

Эффекты квантовой гравитации становятся существенными на расстояниях меньше планковской длины — это невообразимо малая величина, в 10^{25} раз меньше размера атома. Для изучения таких расстояний частицы должны сталкиваться с колоссальной энергией, лежащей далеко за пределами возможностей самых мощных ускорителей. На гораздо больших расстояниях, доступных для наблюдения, квантовые флуктуации геометрии пространства-времени усредняются, и эффектами квантовой гравитации можно безболезненно пренебречь. Однако в поисках окончательных законов природы нельзя игнорировать конфликт между эйнштейновской общей теорией относительно-

сти и квантовой механикой. В окончательной теории должны найти отражение как гравитация, так и квантовые явления. Так что оставить гравитацию в стороне — это не выход.

ГАРМОНИЯ СТРУН

Большинство физиков ныне возлагает надежды на принципиально новый подход к квантовой гравитации — теорию струн. Она предлагает единое описание всех частиц и их взаимодействий. Это самый многообещающий из всех кандидатов на роль фундаментальной Теории Всего.

Согласно теории струн, частицы, подобные электронам или кваркам, которые кажутся точечными и потому считаются элементарными, на самом деле являются крошечными колеблющимися колечками из струн. Струны бесконечно тонки, а длина колечек сравнима с планковской. Частицы кажутся бесструктурными точками потому, что планковская длина крайне мала.

Струны в крошечных петлях очень сильно натянуты, и это натяжение заставляет их вибрировать подобно колеблющимся струнам скрипки или фортепьяно. На рисунке 15.1 показаны различные режимы вибраций прямой струны. В этих режимах, которые соответствуют разным музыкальным нотам, струна приобретает волнообразную форму с укладывающимися вдоль нее несколькими полуволнами. Чем больше число полуволн, тем выше нота. Режимы вибрации петель в теории струн весьма похожи (рис. 15.2), но теперь они соответствуют не различным нотам, а различным типам частиц. Все свойства частиц, такие как масса, электрический заряд и заряды, участвующие в слабом и сильном взаимодействиях, определяются точным вибрационным состоянием струнной петли. Вместо введения независимой новой сущности для каждого типа частиц мы

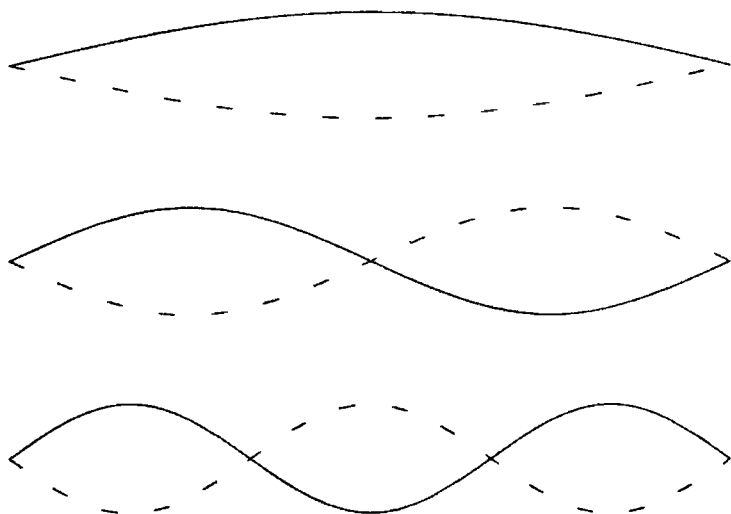


Рис. 15.1. Режимы колебаний струны.

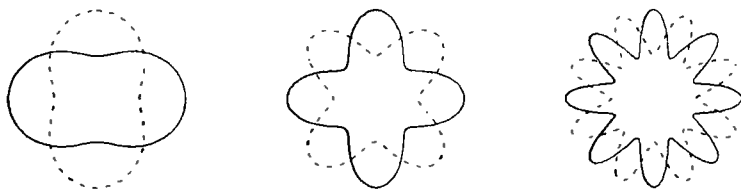


Рис. 15.2. Схематическое представление режимов вибрации струнной петли.

имеем единственную сущность — струны, из которых состоят все частицы.

Частицы-переносчики — фотоны, глюоны, W и Z — также представляют собой маленькие вибрирующие колечки, а взаимодействие частиц можно изобразить как разделение и слияние струнных петель. Что особенно замечательно, спектр состояний струн с необходимостью включает гравитон — части-

цу, переносящую гравитационное взаимодействие. В теории струн нет проблемы объединения гравитации с другими взаимодействиями; наоборот, теорию нельзя построить без гравитации.

Конфликт между гравитацией и квантовой механикой также исчезает. Как уже говорилось, эта проблема связана с квантовыми флуктуациями геометрии пространства-времени. Если частицы — это математические точки, то флуктуации в непосредственной близости от частиц идут вразнос, а гладкий континуум пространства-времени превращается в неистовую пространственно-временную пену. В теории струн крошечные струнные колечки имеют конечные размеры, заданные планковской длиной. Это как раз тот масштаб, ниже которого квантовые флуктуации выходят из-под контроля. Петли невосприимчивы к таким субпланковским флуктуациям: пространственно-временная пена укрощается как раз в тот момент, когда она должна была начать причинять неприятности. Таким образом, впервые мы получаем согласованную квантовую теорию гравитации.

Идею о том, что частицы могут втайне быть струнами, предложили в 1970 году Еитиро Намбу (Yoichiro Nambu) из Чикагского университета, Холгер Нильсен (Holger Nielsen) из Института Нильса Бора и Леонард Сасскинд (Leonard Susskind) из Ешивы-Университета. Первоначально теория струн задумывалась как теория сильного взаимодействия, но вскоре обнаружилось, что она предсказывает существование безмассового бозона, для которого нет соответствия среди сильно взаимодействующих частиц. На ключевую идею о том, что этот безмассовый бозон имеет все свойства гравитона, указали в 1974 году Джон Шварц (John Schwarz) из Калтеха и Джоэл Шерк (Joel Sherk) из Эколь Нормаль Сьюпериор. Потребовалось еще 10 лет, чтобы Шварц в сотрудничестве с Майклом Грином (Michael Green) из Колледжа королевы Марии в Лондоне справились

с рядом тонких математических проблем и показали, что теория действительно является непротиворечивой.

В теории струн нет произвольных констант, так что она не допускает никаких настроек и подгонок. Все, что мы можем сделать, — это открыть ее математическую структуру и посмотреть, соответствует она реальному миру или нет. К сожалению, математика этой теории невероятно сложна. Сегодня, после 20 лет штурма сотнями талантливых физиков и математиков, она все еще остается не до конца понятной. В то же время эти исследования открыли удивительно богатые и красивые математические структуры. Это в большей мере, чем что-либо другое, указывает физикам, что они находятся на верном пути^{IV}.

ЛАНДШАФТ

Как я только что сказал, в теории струн нет подстроечных параметров. Это не преувеличение: их действительно нет, ни одного. Теория жестко фиксирует даже число измерений пространства. Проблема в том, что ответ в результате получается неверный: она требует, чтобы пространство имело 9 измерений вместо 3.

Это звучит довольно странно: почему мы вообще должны рассматривать теорию, которая находится в столь вопиющем противоречии с реальностью? Противоречие это можно, однако, обойти, если 6 лишних измерений свернуты или, как говорят физики, компактифицированы. Соломинка для коктейля — простейший пример компактификации: у нее есть одно большое продольное измерение и другое, свернутое в маленькую окружность. Если смотреть издали, соломинка выглядит одномерной линией, но вблизи видно, что в действительности ее поверхность — это двумерный цилиндр (рис. 15.3). Совершенно аналогично компактные дополнительные измерения могут быть

Рис. 15.3. Соломинка для коктейля имеет двумерную поверхность. Большое измерение идет вдоль нее, а маленькое свернуто в окружность.

невидимы, если они достаточно малы. В теории струн предполагается, что они не намного превышают планковскую длину^У.

Главная проблема с дополнительными измерениями состоит в том, что неясно, каким именно образом они компактифицировались. Если бы существовало одно дополнительное измерение, оно могло бы компактифицироваться только одним способом: свернуться в окружность. Двумерная поверхность компактифицируется в сферу, в бублик или в более сложную поверхность с большим числом “ручек” (рис. 15.4). Количество вариантов растет с увеличением числа измерений. Колебательные состояния струн зависят от размеров и формы дополнительных измерений, так что каждая новая компактификация соответствует новому вакууму с иными типами частиц, имеющими другие массы и другие взаимодействия.

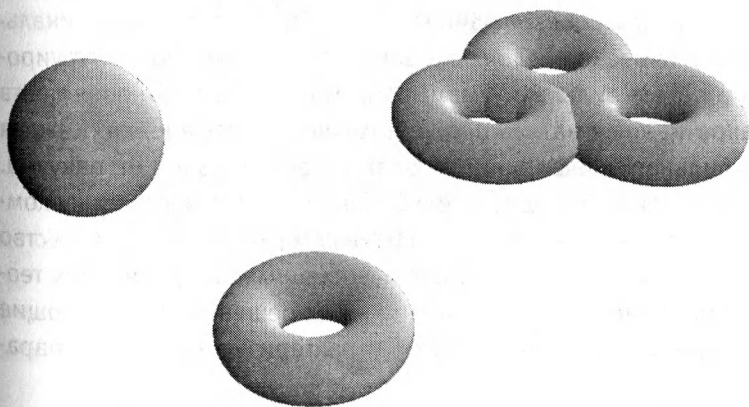


Рис. 15.4. Различные способы компактификации двух дополнительных измерений. Большие, некомпактифицированные измерения не показаны.

Струнные теоретики надеялись, что в итоге теория даст единственную компактификацию, которая описывает наш мир, и мы получим наконец объяснение наблюдаемых значений всех параметров элементарных частиц^{vi}. На волне энтузиазма, которая последовала за математическими прорывами 1980-х годов, казалось, что эта цель вот-вот будет достигнута, и теорию струн называли будущей “Теорией Всего” — высокое звание для концепции, которой еще только предстоит сделать свои первые наблюдаемые предсказания! Но постепенно стала вырисовываться совершенно иная картина: теория, как выяснилось, допускает тысячи различных компактификаций.

Это было бы полбеда, но в середине 1990-х годов ситуация еще ухудшилась из-за некоторых неожиданных открытий. По мере того как улучшалось понимание математики теории струн, становилось ясно, что вдобавок к одномерным струнам теория должна включать двумерные мембраны, а также их многомерные аналоги. Все эти новые объекты собирательно называются бранамиⁱ. Маленькие вибрирующие браны должны выглядеть как частицы, но они слишком массивны, чтобы рождаться на ускорителях^{vii}.

С бранами связан один неприятный эффект: они радикально увеличивают число способов, которыми можно конструировать новые виды вакуума. Брана может как резиновая лента накручиваться на некоторые компактные измерения. Каждая стабильная конфигурация браны дает новый тип вакуума. Можно накрутить одну, две и более бран на каждую ручку компактного пространства, и при большом числе ручек количество вариантов становится просто чудовищным. В уравнениях теории нет подстроечных констант, но их решения, описывающие различные состояния вакуума, характеризуются сотнями пара-

1 Теория также включает множество других сущностей (например, потоки, похожие на магнитные поля), но здесь я не буду о них рассказывать.

метров: размерами компактных измерений, расположением бран и т. п.

Если у нас есть один параметр, это очень похоже на скалярное поле в обычной физике элементарных частиц. Как говорилось в предыдущих главах, оно ведет себя подобно маленькому шарiku на энергетическом ландшафте и катится к ближайшему минимуму плотности энергии. С двумя параметрами ландшафт становится двумерным, как показано на рисунке 15.5. У него есть максимумы (пики) и минимумы (долины), причем последние соответствуют состояниям вакуума. Высота каждого минимума задает соответствующую плотность энергии вакуума (космологическую постоянную).

Действительный энергетический ландшафт теории струн гораздо сложнее, поскольку он включает куда больше парамет-

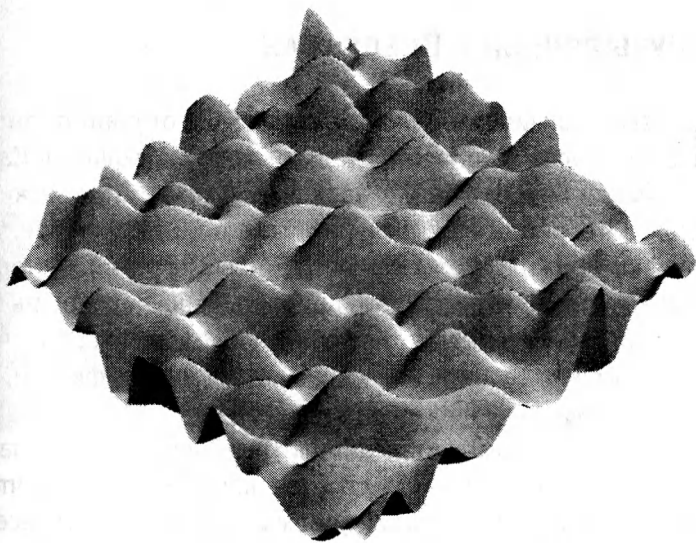


Рис. 15.5. Двумерный энергетический ландшафт. Каждое измерение (не путать с измерениями обычного пространства) представляет один параметр, характеризующий вакуум теории струн.

ров. Этот ландшафт нельзя изобразить на листе бумаги: чтобы учесть все параметры, нужно пространство с несколькими сотнями измерений. Но ландшафт можно анализировать математическими методами. Грубые оценки показывают, что он содержит около 10^{500} (гугол в пятой степени!) различных вакуумов. Некоторые из них похожи на наш; другие имеют совершенно иные значения фундаментальных постоянных. Третьи отличаются еще радикальнее: они поддерживают совершенно иные частицы и взаимодействия или имеют свыше трех больших измерений.

Когда стали проступать контуры этого ландшафта, надежда вывести из теории струн один уникальный тип вакуума быстро развеялась. Однако струнные теоретики это отрицали и были не готовы признать поражение.

ПУЗЫРЯЩАЯСЯ ВСЕЛЕННАЯ

Первыми физиками, которые откололись от стаи, были Рафаэль Буссо (Raphael Bousso), ныне работающий в Калифорнийском университете в Беркли, и Джозеф Полчински из Института теоретической физики Кавли в Санта-Барбаре. Помните Полчински? Это тот самый струнный теоретик, который на дух не переносил антропный принцип и обещал бросить физику, если будет открыта космологическая постоянная¹. К счастью, он изменил свое мнение как по части ухода из физики, так и в отношении антропного принципа.

Буссо и Полчински объединили картину струнного ландшафта с идеями инфляционной космологии и показали, что в ходе вечной инфляции будут рождаться области со всеми

¹ В значительной мере благодаря работам Полчински стало ясно, что теория струн должна включать браны разной размерности.

возможными вакуумами. Самый высокоэнергичный вакуум будет расширяться быстрее всех. На этом инфляционном фоне будут зарождаться пузырьки менее энергичных вакуумов (как в первоначальном инфляционном сценарии Гута, описанном в главах 5 и 6). Внутренние области пузырьков будут инфлировать в меньшем темпе, и в них будут появляться пузырьки с еще меньшей энергией (рис. 15.6)¹. В результате будет задействован весь ландшафт теории струн — образуется бесчисленное количество пузырьков со всеми возможными типами вакуума^{viii}.

Мы живем в одном из пузырьков, но теория не говорит, в каком именно. Лишь очень малая доля из них пригодна для

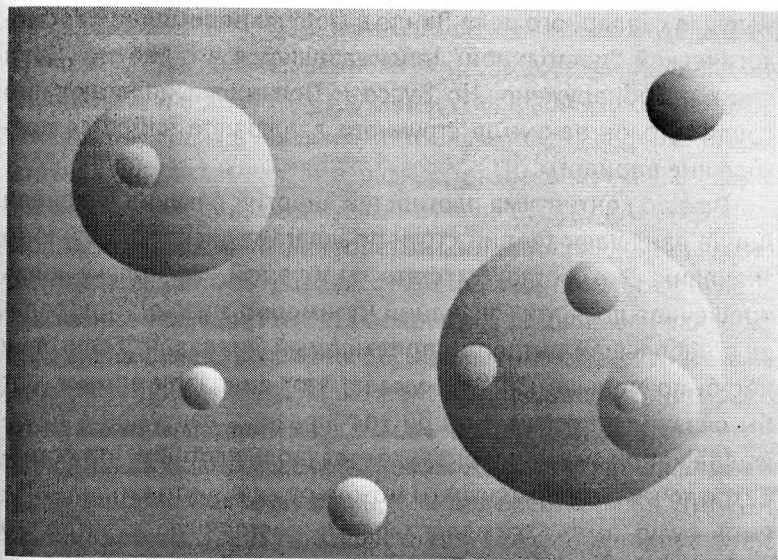


Рис. 15.6. Пузырьки, заполненные низкоэнергетическим вакуумом, зарождаются на расширяющемся высокоэнергетическом фоне, и еще менее энергичные пузырьки появляются внутри них.

¹ Формируются также и пузырьки с *более высокой* энергией, хотя вероятность этого намного ниже.

жизни, и мы должны оказаться именно в одном из таких редких пузырьков. То, что именно такая картина используется в антропных рассуждениях, стало большой неожиданностью для многих струнных теоретиков. Если теория струн действительно окончательная Теория Всего, то, по-видимому, антропное мировоззрение неизбежно.

Надо сказать, что еще далеко не весь ландшафт теории струн картирован. Чтобы получалась реалистичная космология, некоторые склоны должны быть очень пологими, допускающими медленно катящуюся инфляцию. Недавние работы показывают, что такие участки ландшафта действительно существуют. Но надо найти еще более пологие склоны, требуемые для скалярного поля Линде в модели переменной космологической “постоянной” (обсуждавшейся в главе 13). Пока таких не обнаружено. Но Буссо и Полчински полагают, что среди гуголов вакуумов струнного ландшафта найдутся подходящие варианты.

Вместо континуума плотностей энергий вакуума в модели Линде ландшафт теории струн предлагает дискретный набор значений. Это могло бы стать проблемой, поскольку лишь крошечная доля этих значений (примерно 1 из 10^{120}) попадает в небольшой антропно приемлемый диапазон. Если бы у нас было меньше 10^{120} вакуумов, этот диапазон вполне мог бы оказаться пустым. Но при 10^{500} разных вакуумов в ландшафте набор значений оказывается столь плотным, что становится почти непрерывным, и можно ожидать, что гуголы вакуумов будут иметь космологическую постоянную в антропно приемлемом интервале. Тем самым, принцип заурядности по-прежнему остается в силе, и в успешном предсказании наблюдаемого значения космологической постоянной ничего не меняется.

ПРОГРАММА НА XXI ВЕК

Статья Буссо и Полчински, появившаяся в 2000 году, вызвала подвигу, но настоящий обвал начался три года спустя, когда к ним присоединился изобретатель теории струн Леонард Сасскинд из Стэнфорда. Это на удивление независимый мыслитель, а также чрезвычайно привлекательный и харизматичный человек. У него феноменальная способность убеждать; словом, это тот человек, которого хочется иметь на своей стороне.

Сасскинд по-прежнему не соглашался с первой статьей Буссо и Полчински. Он чувствовал, что содержащееся в статье предположение о существовании множества вакуумов является скорее догадкой, чем математическим фактом. Но работы следующих нескольких лет показали, что догадки были весьма глубокими, и в 2003 году Сасскинд стал в полную силу поддерживать то, что он назвал “антропным ландшафтом теории струн”. Он доказывал, что разнообразие вакуумов в теории струн впервые дает серьезную научную основу для антропной аргументации. Струнные теоретики, говорил он, должны поэтому поддерживать антропный принцип, а не бороться с ним.

Менее чем через год все вокруг уже говорили о “ландшафте”. Число статей, в которых обсуждалась множественность вакуумов и другие антропные вопросы, выросло с четырех в 2002 году до тридцати двух в 2004-м. Конечно, не всем понравился такой поворот дел. “Я ненавижу новую идею ландшафта, — говорил Пол Стейнхардт, — и надеюсь, что она сгинет”^{ix}. Дэвид Гросс, лауреат Нобелевской премии 2004 года, считающий антропный принцип отступлением от идеала единственности, перефразировал Уинстона Черчилля, говоря: “Никогда, никогда, никогда не отступайте!”¹. Когда я беседовал

¹ Речь об известной фразе Черчилля: “Никогда не сдавайтесь — никогда, никогда, никогда, никогда...” (“Never give in — never, never, never, never...”). — *Примеч. перев.*

с ним на конференции в Кливленде, он жаловался, что антропный принцип подобен вирусу. Однажды заразившись, вы потенциально для сообщества. “Эд Виттен¹ терпеть не может эту идею, — говорит Сасскинд, описывая ситуацию, — но, по-моему, его очень беспокоит то, что она может оказаться верной. Ему это не нравится, но, я думаю, он понимает, что все к тому идет^x”.

Если ландшафтные идеи верны, объяснить наблюдаемые значения фундаментальных постоянных будет непросто. В-первых, нам нужна карта ландшафта. Какие типы вакуумов на ней есть и сколько объектов внутри каждого типа? Конечно, нельзя надеяться детально охарактеризовать все 10^{500} вакуумов, так что понадобится некое статистическое описание. Необходимо также оценить вероятности появления пузырьков с одним типом вакуума по сравнению с другим. После этого у нас будут все ингредиенты для разработки модели вечно инфлирующей Вселенной с пузырьками внутри пузырьков внутри пузырьков, как показано на рисунке 15.6. Построив эту модель, можно применить принцип заурядности для определения вероятности нашего существования в том или ином типе вакуума.

Сейчас мы делаем лишь первые пробные шаги в этой исследовательской программе, и впереди лежат труднопреодолимые препятствия. “Однако, — пишет Леонард Сасскинд, — я готов держать пари, что к началу XXII века философы и физики будут с ностальгией оглядываться на наше настоящее, вспоминая золотой век, когда узкая и ограниченная концепция Вселенной XX века уступила место гораздо более широкому и масштабному мегаверсу, населяющему ландшафт ошеломительных размеров^{xi}”.

1 Эдвард Виттен (Edward Witten) — один из ведущих специалистов по теории струн, награжденный в 1990 году Филдсовской медалью — эквивалентом Нобелевской премии для математиков.

{ ЧАСТЬ IV До начала

ГЛАВА 16

Было ли у Вселенной начало?

Источник, от которого берут начало все творения,
<...> он, который обзирает их все с высочайших небес.
он знает, или, быть может, даже он не знает.

РИГ-ВЕДА

ПРОБЛЕМА КОСМИЧЕСКОГО ЯЙЦА

Древние мифы о творении демонстрируют поразительное разнообразие, но на самом фундаментальном уровне они сводятся к одному из двух основных вариантов: либо Вселенная была создана конечное время назад, либо она существовала вечно¹.

Вот один из сценариев, взятый из священной индуистской книги “Упанишады”:

“В начале этот [мир] был несуществующим. Он стал существующим. Он превратился в яйцо. Яйцо лежало год. Затем оно раскрылось... И прямо из него родился Адитья-Солнце. Его рождение встретили возгласом “Ура!” все существа и все объекты желания”.

Эта идея выглядит довольно простой, но, к сожалению, имеет серьезный недостаток, который присущ и всем остальным историям творения. Древние хорошо понимали эту проблему; индийский поэт Джинасена писал в IX веке: “Некоторые глупцы утверждают, что мир создан Творцом. Учение о сотворении мира противоречит здравому смыслу и должно быть отвергнуто.

Если Бог создал мир, где он был до творения? <...>

Как мог Бог создать мир без всяких исходных материалов? Если вы скажете, что он сначала сделал их, а уже потом мир, вы приходите к бесконечной регрессии. <...>

Таким образом, учение о том, что мир был создан Богом, вовсе не имеет никакого смысла...

Знай, что мир не сотворен, как и само время, без начала и конца... Несотворимый и неразрушимый, он продолжает существовать, подчиняясь законам своей собственной природы...”

Эта критика в равной мере приложима к любым сценариям возникновения космоса — будь то сотворение Богом, как в истории с космическим яйцом, или “естественное” творение, как в модели Большого взрыва современной космологии”.

Согласно теории Большого взрыва, вся материя вокруг нас появилась из раскаленного космического огненного шара около 14 миллиардов лет назад. Но откуда появился огненный шар? Теория инфляции показала, что расширяющийся огненный шар может возникнуть из крошечного зародыша ложного вакуума. Но все равно остается вопрос: откуда взялся этот первоначальный зародыш? Что происходило до инфляции?

В большинстве своем космологи не спешат браться за эту щекотливую тему. И действительно, похоже, что здесь не может быть удовлетворительного ответа. Каков бы ни был ответ, всегда можно спросить: “А что было перед этим?” Это и есть “бесконечная регрессия”, о которой упоминает Джинасена. Однако в 1980-х годах, когда был разработан инфляционный сценарий, похоже, появилась привлекательная альтернатива.

Вселенная вечной инфляции состоит из расширяющегося “моря” ложного вакуума, в котором постоянно зарождаются “островные вселенные”, подобные нашей. Таким образом, инфляция — это никогда не прекращающийся процесс. Он закончился в нашей собственной островной вселенной, но будет неограниченно продолжаться в других отдаленных областях. Однако если инфляция бесконечна в будущем, то, вероятно, ей не нужно и начало в прошлом. Получается вечно инфлирующая вселенная без начала и конца, что исключает неразрешимые проблемы, связанные с происхождением космоса. Эта картина напоминает космологическую теорию стационарной вселенной 1940–50-х годов. Некоторые люди находили ее весьма привлекательной.

ЦИКЛИЧЕСКАЯ ВСЕЛЕННАЯ

Помимо стационарного состояния есть еще один способ сделать Вселенную вечной. И вновь индусы придумали его в далеком прошлом. Бесконечный цикл создания и уничтожения символизируется танцем Шивы. “Он приходит в состояние экстаза и, танцуя, посылает сквозь инертную материю пульсирующие волны пробуждающих звуков”. Вселенная оживает, но потом “на исходе времен, продолжая танцевать, он разрушает все формы и имена в огне и делает передышку”.

Параллельная идея в научной космологии — это представление о пульсирующей вселенной, которая проходит через циклы расширения и сжатия. В 1930-х годах она короткое время была популярна, но потом вышла из моды из-за очевидного противоречия со вторым началом термодинамики. Второе начало требует, чтобы энтропия, которая служит мерой беспорядка, возрастала с каждым циклом космической эволюции. Если Вселенная уже прошла через бесконечное число циклов, она

должна достичь состояния с максимальной энтропией — термодинамического равновесия. Однако очевидно, что мы не находимся в таком состоянии. Это проблема “тепловой смерти”, о которой я упоминал раньше.

Идея пульсирующей вселенной была отброшена больше чем полстолетия назад, но в 2002 году возродилась в новом образе благодаря Полу Стейнхардту и Нейлу Туроку из Кембриджа. Как и в ранних моделях, они предположили, что история Вселенной состоит из бесконечно повторяющихся циклов расширения и сжатия. Каждый цикл начинается с горячего расширяющегося огненного шара. Он расширяется и остывает, образуются галактики, и вскоре после этого во Вселенной начинает доминировать энергия вакуума. С этого момента Вселенная начинает расширяться экспоненциально, удваивая свои размеры примерно каждые 10 миллиардов лет. Спустя триллионы лет этой сверхмедленной инфляции Вселенная становится чрезвычайно однородной, изотропной и плоской. Наконец расширение замедляется и затем сменяется сжатием. Вселенная схлопывается и сразу же восстанавливается, давая старт новому циклу. Часть энергии, выделившейся при коллапсе, идет на создание горячего огненного шара веществаⁱⁱⁱ.

Стейнхардт и Турок доказывали, что в их сценарии не возникает проблемы начала. Вселенная всегда проходит один и тот же цикл, так что никакого начала попросту нет. Проблему тепловой смерти также удастся обойти, поскольку степень расширения в каждом цикле больше, чем степень сжатия, так что объем Вселенной с каждым циклом возрастает. Энтропия нашей наблюдаемой области сегодня такая же, как энтропия аналогичной области в предыдущем цикле, но энтропия Вселенной в целом возросла — просто потому, что ее объем стал больше. С течением времени как энтропия, так и объем неограниченно растут. Состояние максимальной

энтропии никогда не достигается, поскольку максимальной энтропии не существует.

Таким образом, есть две возможных модели вечной вселенной без начала: одна основана на вечной инфляции, а другая — на циклической эволюции. Но, оказывается, ни одна из них не обеспечивает полного описания Вселенной.

ПРОСТРАНСТВО ДЕ СИТТЕРА

Когда физик хочет понять какое-то явление, первым делом он максимально его упрощает, отбрасывая все, кроме самого существенного. В случае вечной инфляции можно отбросить островные вселенные, сохранив только море инфляции. Кроме того, можно предположить, что Вселенная однородна и изотропна, как в моделях Фридмана. С этими упрощениями нетрудно решить уравнения Эйнштейна для инфлирующей Вселенной.

Решение имеет геометрию трехмерной сферы, которая сжимается от очень большого радиуса в далеком прошлом. Сжатие замедляется отталкивающей гравитацией ложного вакуума, пока сфера на мгновение не остановится и не начнет затем расширяться. Силы гравитации теперь действуют в направлении движения, так что сфера расширяется с ускорением. Ее радиус растет экспоненциально, а время его удвоения определяется плотностью энергии ложного вакуума¹.

Это решение было найдено вскоре после создания теории относительности; оно называется *пространством-временем де Ситтера* в честь голландского астронома Виллема де Ситтера, который открыл его в 1917 году. Это пространство-время

¹ Минимальный радиус деситтеровской сферы примерно равен расстоянию, которое проходит свет за один период инфляционного удвоения.

изображено на рисунке 16.1. Инфляция начинается в пространстве-времени де Ситтера лишь после того, как сферическая вселенная достигнет своего минимального радиуса. Но когда она начинается, экспоненциальное расширение продолжается бесконечно, так что инфляция вечна в будущем.

Если допустить образование островных вселенных в сжимающейся части пространства-времени, они бы сталкивались и сливались. Острова тогда быстро заполнили бы все пространство, ложный вакуум полностью исчез, а Вселенная продолжила бы коллапсировать вплоть до большого сжатия. Таким образом, инфляцию нельзя бесконечно продолжить в прошлое. У нее должно быть какое-то начало.

Следует, однако, иметь в виду, что данный вывод основан на максимально упрощенной модели инфляции, в которой рассматривается однородная и изотропная вселенная. В действитель-

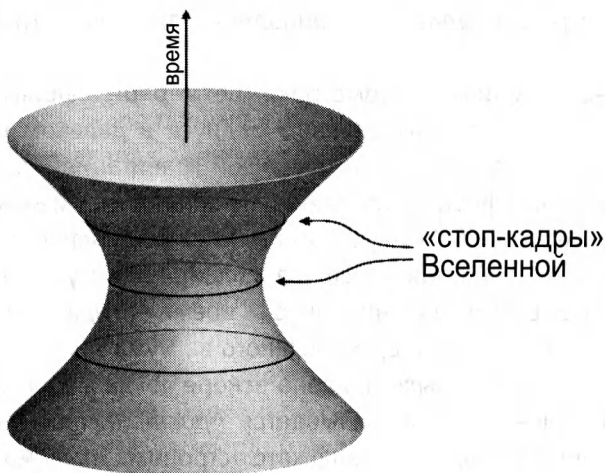


Рис. 16.1. Пространство де Ситтера без двух из трех пространственных измерений. Горизонтальные срезы пространства-времени дают «стоп-кадры» вселенной в различные моменты времени. В четырехмерном пространстве-времени эти срезы будут трехмерными сферами.

ности Вселенная на масштабах, значительно превышающих современный горизонт, может быть очень неоднородной и анизотропной. Не окажется ли так, что фаза сжатия пространства де Ситтера есть побочный эффект наших упрощений? Нельзя ли в пространстве-времени более общего вида обойтись без начала?

ЗА ПРЕДЕЛАМИ НЕРАЗУМНЫХ СОМНЕНИЙ

Эти сомнения удалось рассеять лишь недавно в статье, которую я написал в соавторстве с Эрвиндом Бордом (Arvind Borde) из Саутгемптонского колледжа и Аланом Гутом. Теорема, доказанная в этой статье, на удивление проста. Ее доказательство не выходит за рамки школьной математики, но для проблемы начала Вселенной она имеет важные следствия.

В статье мы исследовали, как выглядит расширяющаяся вселенная с точки зрения разных наблюдателей. Мы рассматривали воображаемых наблюдателей, движущихся сквозь вселенную под действием гравитации и инерции и регистрирующих, что они видят. Если вселенная не имеет начала, то истории всех таких наблюдателей должны уходить в бесконечное прошлое. Мы показали, что такое предположение приводит к противоречию.

Чтобы сделать разговор более конкретным, предположим, что в каждой галактике нашей области вселенной есть наблюдатель. Поскольку вселенная расширяется, каждый такой наблюдатель будет видеть, что остальные удаляются от него. В некоторых областях пространства и времени может не быть галактик, но мы все равно мысленно “рассеём” наблюдателей по всей вселенной таким образом, чтобы они удалялись друг от друга¹. Будем называть этих наблюдателей “зрителями”.

¹ Существование такого класса наблюдателей может считаться определением расширяющейся вселенной.

Введем теперь другого наблюдателя, который движется относительно зрителей. Назовем его космическим путешественником. На протяжении целой вечности он летит по инерции, выключив двигатели своего космического корабля. Когда он пролетает мимо зрителей, те регистрируют его скорость.

Поскольку наблюдатели разлетаются, скорость космического путешественника относительно каждого следующего зрителя будет меньше, чем относительно предыдущего. Предположим, например, что путешественник только что пронесся мимо Земли со скоростью 100 000 километров в секунду и сейчас движется в направлении далекой галактики примерно в миллиарде световых лет от нас. Эта галактика улетает от нас со скоростью 20 000 километров в секунду, так что, когда путешественник доберется до нее, тамошние наблюдатели увидят, что он движется со скоростью 80 000 километров в секунду. Если в будущем скорость космического путешественника относительно зрителей становится все меньше и меньше, это значит, что по мере углубления в историю его скорость должна становиться все больше и больше. В пределе она должна стать сколь угодно близкой к скорости света.

Ключевая идея нашей с Бордом и Гутом статьи состоит в том, что по мере движения назад, к бесконечному прошлому, время, прошедшее по часам космического путешественника, остается *конечным*. Все дело в том, что, согласно эйнштейновской теории относительности, движущиеся часы замедляются, и чем ближе вы к скорости света, тем медленнее они идут. Чем дальше мы уходим назад во времени, тем ближе космический путешественник к скорости света, а его часы практически замирают. Так это выглядит для зрителей. Но сам космический путешественник не замечает ничего необычного. То, что кажется зрителям застывшим мгновением, растянувшимся на целую вечность, для него — обычный момент времени, кото-

рому предшествуют другие моменты. Как и истории зрителей, история космического путешественника должна продолжаться в бесконечное прошлое.

■ Сам факт конечности времени, прошедшего по часам космического путешественника, указывает на то, что мы имеем дело с неполной его историей. Это означает, что часть прошлой истории вселенной отсутствует; она не включена в нашу модель. Таким образом, предположение, что все пространство-время можно покрыть расширяющейся пылью из наблюдателей, приводит к противоречию и поэтому не может быть истинным^{IV}.

■ Замечательная особенность этой теоремы — широта ее охвата. Мы не использовали никаких допущений о материальном наполнении вселенной. Мы даже не предполагали, что гравитация описывается уравнениями Эйнштейна. Так что, если потребуются внести изменения в теорию гравитации, наши выводы не изменятся. Единственное сделанное нами предположение состояло в том, что скорость расширения вселенной никогда не была ниже некоторого ненулевого значения — неважно, насколько малого^V. Это предположение, очевидно, должно выполняться в инфлирующем ложном вакууме. Отсюда вытекает невозможность вечной в прошлом инфляции, не имеющей начала.

■ А что же с циклической вселенной? В ней есть чередующиеся периоды расширения и сжатия. Помогут ли они этой вселенной вырваться из когтей данной теоремы? Как выяснилось, ответ будет отрицательным. Существенная особенность циклического сценария, позволяющая обойти проблему тепловой смерти, состоит в том, что объем вселенной с каждым циклом возрастает, так что в среднем вселенная расширяется. В нашей статье было показано, что в результате такого расширения скорость космического путешественника в среднем возрастает по мере движения назад во времени и по-прежнему в пределе стремится к скорости света. Так что выводы остаются неизменными^{VI}.

Говорят, что аргумент — это то, что убеждает разумного человека, а доказательство — то, что способно убедить даже неразумного. После публикации данного доказательства космологи не могли больше прятаться за возможностью вечной в прошлом Вселенной. Выхода не было: пришлось лицом к лицу встретиться с проблемой космического начала.



Совместная с Аланом Гутом работа над этой статьей принесла мне незабываемые впечатления. Идея доказательства возникла в переписке по электронной почте между мной, Аланом и Арвиндом, а детали были доработаны за два часа, проведенных у доски, когда в августе 2001 года мы втроем встретились в моем кабинете в Тафтсе. Примерно через месяц мы написали статью и подали ее в *Physical Review Letters*. Я был поражен. Что случилось с Аланом и его легендарной склонностью все откладывать? Но в итоге он меня не разочаровал. Через несколько месяцев редактор прислал нам отзывы рецензентов, которые просили прояснить некоторые моменты в доказательстве. И вот тогда старый добрый Алан показал все, на что способен. Все с большими и большими интервалами от него приходили электронные письма с заголовками “Погрыз в делах” или “Пока ничего не сделал”. Когда он нашел немного времени для работы над статьей, то, похоже, потратил большую его часть на выяснение вопросов вроде того, как следует благодарить “анонимного рецензента” за его или ее замечания. Он дал подробный разбор всех “за” и “против” каждого варианта. Видимо, Алан подозревал, что редактирование статьи несколько затянулось, и в какой-то момент написал: “Я должен поблагодарить вас, ребята, что вы меня не пристрелили”. Справедливости ради надо признать, что он потратил некоторое время и на более существенные вопросы, так

что затянувшийся процесс редактирования статьи привел к значительным улучшениям. Она наконец была опубликована в апреле 2003 года^{vii}.

ДОКАЗАТЕЛЬСТВО БЫТИЯ БОЖИЯ?

Теологи весьма благосклонны к любым свидетельствам существования у Вселенной начала, считая их аргументами в пользу бытия Божия. Накопление данных о Большом взрыве в 1950-х годах вызвало энтузиазм в теологических кругах и среди религиозно настроенных ученых. “Что касается первопричины Вселенной, — писал британский физик Эдвард Милн, — то в контексте ее расширения окончательное решение, конечно, за читателем, однако наша картина будет неполна без Него”^{viii}. Теория Большого взрыва даже снискала официальное одобрение церкви. В своем послании к Папской академии наук в 1951 году папа Пий XII писал, что “получены... надежно подтвержденные результаты относительно эпохи, когда Космос вышел из рук Творца. Значит, Творение имело место. Значит, существует Творец. Значит, существует Бог!”^{ix}

В силу той же причины, которая вызвала восторг у папы, естественный инстинкт большинства ученых отвергает идею наличия у Космоса начала. “Чтобы отрицать бесконечную длительность времени, — писал нобелевский лауреат, немецкий химик Вальтер Нернст, — придется отбросить самые основания науки”. Начало Вселенной слишком похоже на божественное вмешательство; кажется невозможным описать его научно. Это единственная мысль, на которой, по-видимому, сходятся ученые и теологи.

Итак, что же нам делать с доказательством неизбежности начала? Доказывает ли оно существование Бога? Такой взгляд был бы слишком упрощенным. Всякий, кто пытается понять

происхождение Вселенной, должен быть готов встретиться с логическими парадоксами. В этом отношении теорема, которую мы с коллегами доказали, не дает теологам существенных преимуществ перед учеными. Как следует из приведенного выше замечания Джинасены, религия не защищена от парадоксов творения.

Впрочем, и ученые, возможно, слишком торопятся признавать, что начало космоса нельзя описать с чисто научных позиций. Да, действительно, трудно понять, как это можно было бы сделать. Но кажущаяся невозможность часто отражает лишь ограниченность нашего воображения.

ГЛАВА 17

Сотворение вселенных из ничего

Из ничего не творится ничто...
ЛУКРЕЦИЙ, "О ПРИРОДЕ ВЕЩЕЙ" (ПЕР. Ф.А. ПЕТРОВСКОГО)

ИНФЛЯЦИЯ В КОНЦЕ ТУННЕЛЯ

Вернемся в 1982 год, когда инфляция еще оставалась совсем свежей темой, полной неисследованных идей и требующих напряженной работы задач, — в общем, золотой жилой для молодого честолюбивого космолога. Самым интригующим и, пожалуй, наименее связанным с современным состоянием Вселенной был вопрос о том, как инфляция могла начаться. Инфляционная вселенная быстро “забывает” свои начальные условия, и состояние, с которого она стартовала, слабо влияет на то, что происходит потом. Так что, если вы хотите проверить инфляцию наблюдениями, не стоит тратить время на вопрос о ее начале. Но загадка начала все равно остается, и ее нельзя избежать. Она притягивает к себе как магнит.

На первый взгляд проблема кажется довольно простой. Мы знаем, что небольшой области пространства, заполненной ложным вакуумом, достаточно, чтобы запустить инфляцию. Поэтому все, что нужно придумать, — это как такая область могла появиться из некоего предшествующего состояния Вселенной.

В те годы доминировало представление, основанное на фридмановской модели, в которой Вселенная расширялась из сингулярного состояния с бесконечной кривизной и бесконечной плотностью материи. Если предположить, что Вселенная заполнена высокоэнергичным ложным вакуумом, любое вещество, которое в ней изначально присутствовало, становится разреженным, что приводит к доминированию энергии вакуума. С этого момента его отталкивающая гравитация берет верх, и начинается инфляция.

Все это хорошо, но с чего бы Вселенной начинать расширяться? Одним из достижений теории инфляции было объяснение расширения Вселенной. Однако, похоже, нам нужно получить расширение еще до того, как начнется инфляция. Притягивающая гравитация вещества первоначально намного сильнее гравитационного отталкивания вакуума, так что, если не постулировать мощную первоначальную вспышку расширения, Вселенная просто сколлапсировала бы, и инфляция никогда бы не началась.

Я некоторое время размышлял над этими аргументами, но логика была очень простой, и никакого выхода не просматривалось. И тогда я неожиданно понял, что вместо коллапса Вселенная может совершить нечто намного более интересное и драматичное...

Рассмотрим замкнутую сферическую вселенную, заполненную ложным вакуумом и содержащую некоторое количество обычной материи. Предположим также, что в некоторый момент она находится в покое, не расширяясь и не сжимаясь. Если ее радиус мал, вещество сжато до высокой плотности, и все-

ленная сколлапсирует в точку. Если радиус велик, доминирует энергия вакуума, и начнется инфляция. Малые и большие радиусы разделяет барьер, который нельзя пересечь, не придав вселенной высокой скорости расширения.

И вот неожиданно до меня дошло, что коллапс маленькой вселенной был неизбежным только в классической физике. В квантовой теории вселенная может *туннелировать* под энергетическим барьером и появиться по другую сторону — как это происходит с ядерными частицами в гамовской теории радиоактивного распада.

Это выглядело изящным решением проблемы. Вселенная возникает чрезвычайно маленькой и с очень высокой вероят-

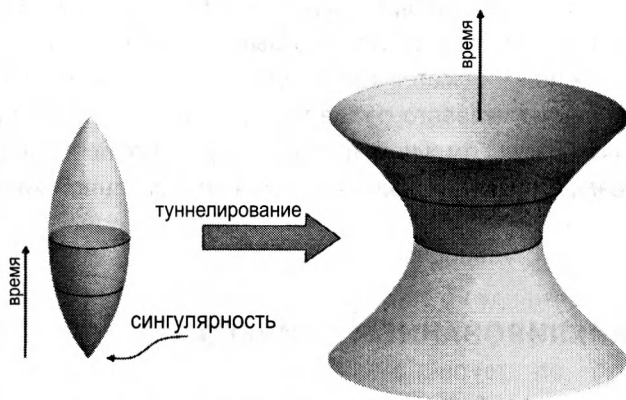


Рис. 17.1. Слева: пространственно-временная диаграмма замкнутой фридмановской вселенной, расширяющейся от сингулярности, достигающей максимального радиуса и вновь коллапсирующей. Время растет в вертикальном направлении, а горизонтальные окружности — это стоп-кадры вселенной в разные моменты времени. Справа: вселенная с доминированием энергии вакуума, сжимающаяся и вновь расширяющаяся (пространство-время де Ситтера). Вселенная слева может вместо коллапса туннелировать через энергетический барьер в область больших радиусов и начать расширяться.

История пространства-времени вселенной будет тогда включать только затонированные части двух пространств-времен.

ностью вновь коллапсирует в сингулярность. Но есть крошечный шанс, что вместо этого она туннелирует сквозь барьер, приобретет больший радиус и начнет инфляционно расширяться (рис. 17.1). Таким образом, в этой грандиозной картине мира будет масса вселенных-неудачниц, живущих лишь неуловимое мгновение, но будут и те, что сумеют сделаться большими.

Почувствовав, что достиг прогресса, я стал торопиться. Существуют ли для размера первичной вселенной какие-то ограничения снизу? Что случится, если мы позволим ей становиться все меньше и меньше? К моему удивлению, выяснилось, что даже при начальных размерах, стремящихся к нулю, шансы на туннелирование не исчезают. Я также заметил, что вычисления значительно упрощаются, если позволить начальному радиусу вселенной обратиться в нуль. Это была по-настоящему безумная идея: я получил математическое описание вселенной, туннелирующей из нулевого размера — из ничего! — в состояние с конечным радиусом и начинающей инфляционно расширяться. Похоже, никакого исходного состояния вселенной вовсе не требовалось!

ТУННЕЛИРОВАНИЕ ИЗ НИЧЕГО

Идея вселенной, материализующейся из ничего, подвергает в недоумение. Что в точности означает “ничто”? Если это “ничто” способно туннелировать в нечто, что может вызвать первичный акт туннелирования? И что происходит с законом сохранения энергии? Но чем дольше я думал над этим, тем более важной казалась мне эта идея.

Начальное состояние, предшествующее туннелированию, — это вселенная с нулевым радиусом, то есть попросту отсутствие вселенной. В этом очень странном состоянии нет мате-

рии, нет пространства. Нет также и времени. Время имеет смысл, только если во вселенной что-то происходит. Мы измеряем время, используя периодические процессы, такие как вращение Земли вокруг своей оси или вокруг Солнца. Невозможно определить время в отсутствие пространства и материи.

И вместе с тем состояние “ничто” нельзя определить как *абсолютное* небытие. Туннелирование описывается законами квантовой механики, а значит, “ничто” должно подчиняться этим законам. Законы физики должны существовать, несмотря на отсутствие вселенной. Я коснусь этого вопроса подробнее в главе 19.

В результате акта туннелирования из ниоткуда рождается вселенная конечных размеров и немедленно начинает инфляционно расширяться. Радиус новорожденной вселенной определяется плотностью энергии вакуума: чем выше плотность, тем меньше радиус. Для вакуума Великого объединения это одна стотриллионная сантиметра. Вследствие инфляции эта крошечная вселенная растет с ошеломительной скоростью и за малую долю секунды намного превосходит размер наблюдаемой сегодня области.

Если до возникновения вселенной ничего не было, тогда что же вызвало туннелирование? Как это ни удивительно, ответ состоит в том, что никакой причины для этого не требовалось. В классической физике причинность диктует, что случится в каждый следующий момент времени, однако в квантовой механике поведение физического объекта по сути непредсказуемо, и некоторые квантовые процессы совершенно беспричинны. Возьмем, к примеру, радиоактивный атом. У него есть некоторая вероятность распада, остающаяся неизменной от минуты к минуте. В конце концов он распадется, но нет никакой причины, которая заставила бы его распасться в какой-то определенный момент. Зарождение вселенной также является квантовым процессом и не требует причины.

Большинство наших представлений неразрывно связаны с пространством и временем, и непросто создать мысленную картину вселенной, возникающей из ничего. Невозможно представить себя сидящим посреди “ничего” и ожидающим материализации вселенной, поскольку нет ни пространства, чтобы в нем сидеть, ни времени.

В некоторых недавно предложенных моделях, основанных на теории струн, наше пространство представляет собой трехмерную мембрану (брану), плавающую в многомерном пространстве. В таких моделях можно представить многомерного наблюдателя, следящего за маленькими пузырьками вселенных — “мирами на бране”, — появляющимися то здесь, то там, как пузырьки пара в кипящем чайнике. Мы живем на одном из таких пузырьков, который является расширяющейся трехмерной сферической браной. Для нас эта брана — единственное существующее пространство. Мы не можем оторваться от нее и не замечаем дополнительных измерений. Если проследить историю нашей пузырьковой вселенной назад в прошлое, мы достигнем момента зарождения. За ним наше пространство и время исчезают.

От этой картины всего один маленький шаг до той, что я первоначально предложил. Просто уберите многомерное пространство. С нашей внутренней точки зрения ничего не изменится. Мы живем в замкнутом трехмерном пространстве, но это пространство не простирается повсюду. Если мы двинемся назад во времени, то обнаружим, что наша Вселенная имеет начало. И за ним нет пространства-времени.

Эlegantное математическое описание квантового туннелирования можно получить, используя так называемое евклидово время. Это не то время, которое измеряется по часам. Оно выражается при помощи мнимых чисел, таких как квадратный корень из -1 , и вводится лишь для удобства вычислений. Превращение времени в евклидово странным образом влияет на

пространство-время: различие между временем и тремя пространственными измерениями полностью исчезает, так что вместо пространства-времени получается четырехмерное пространство. Если бы мы могли жить в евклидовом времени, то измеряли бы его линейкой в точности так, как мы измеряем длину. Это может показаться довольно странным, однако описание, сделанное в евклидовом времени, очень полезно: оно обеспечивает удобный способ определения вероятности туннелирования и начального состояния вселенной в момент, когда она обретает существование.

Графически рождение вселенной можно изобразить пространственно-временной диаграммой на рисунке 17.2. Темная полусфера в нижней части отвечает квантовому туннелированию (в этой части пространства-времени время евклидово).

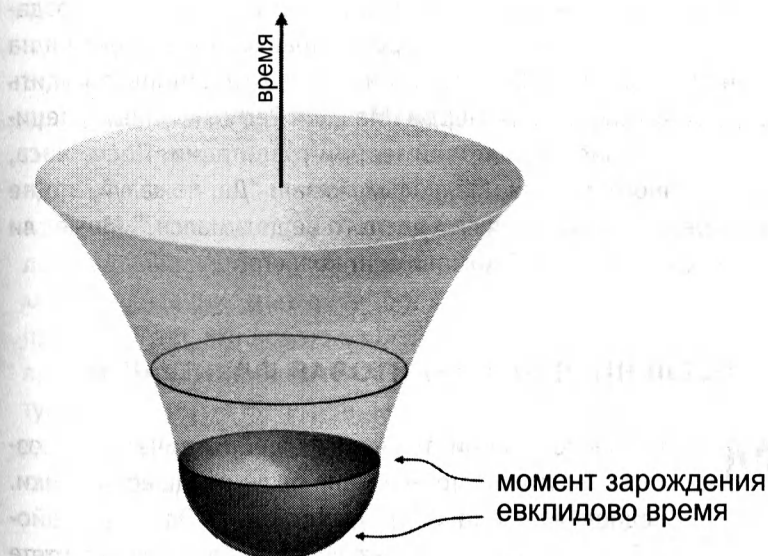


Рис. 17.2. Пространственно-временная диаграмма вселенной, туннелирующей из ничего.

Светлая верхняя часть — это пространство-время инфляционной вселенной. Граница между этими двумя областями пространства-времени — это вселенная в момент зарождения.

Замечательная особенность этого пространства-времени заключается в отсутствии сингулярностей. Фридмановское пространство-время имеет в начале сингулярную точку с бесконечной кривизной, где перестает работать математика эйнштейновских уравнений. Этой точке соответствует острый угол внизу левой схемы на рисунке 17.1. Напротив, в сферической евклидовой области нет таких точек; она повсюду имеет одинаковую конечную кривизну. Это было первое математически последовательное описание того, как могла родиться Вселенная. Пространственно-временная диаграмма на рисунке 17.2, напоминающая по форме бадминтонный волан, теперь стала логотипом Института космологии в Тафтсе.

Я описал все это в короткой статье, озаглавленной “Создание вселенных из ничего”¹. Перед отправкой ее в журнал я на один день заехал в Принстонский университет, чтобы обсудить эти идеи с Малкольмом Перри (Malcolm Perry), крупным специалистом в области квантовой теории гравитации. После часа, проведенного у доски, Малкольм сказал: “Да, пожалуй, это не столь безумно... И как я сам до этого не додумался?” Может ли физик сделать лучший комплимент коллеге!

ВСЕЛЕННАЯ КАК КВАНТОВАЯ ФЛУКТУАЦИЯ

Моя модель вселенной, туннелирующей из ничего, не возникла на пустом месте — у меня были предшественники. Первое предположение такого рода восходит к Эдварду Трайону (Edward Tryon) из Хантеровского колледжа при Университете Нью-Йорка. Он выдвинул идею, что Вселенная возникла из вакуума благодаря квантовой флуктуации.

Эта мысль впервые пришла к нему в 1970 году во время физического семинара. Трайон сказал, что она поразила его подобно вспышке света — как будто перед ним раскрылась некая глубочайшая истина. Когда докладчик сделал паузу, чтобы собраться с мыслями, Трайон выпалил: “Может быть, Вселенная — это вакуумная флуктуация!” Аудитория разразилась хохотом.

Как уже говорилось раньше, вакуум вовсе не мертвый и статичный; это арена бешеной деятельности. В субатомных масштабах электрическое, магнитное и другие поля постоянно флуктуируют из-за непредсказуемых квантовых толчков. Геометрия пространства-времени также флуктуирует, неистово взбивая пространственно-временную пену на планковском масштабе расстояний. Вдобавок пространство полно так называемых *виртуальных* частиц, которые спонтанно появляются то здесь, то там и немедленно исчезают. Виртуальные частицы существуют очень недолго, поскольку живут за счет заемной энергии. Энергетические кредиты приходится отдавать, и, согласно принципу неопределенности Гейзенберга, чем больше энергии заимствуется у вакуума, тем быстрее ее надо вернуть. Виртуальные электроны и позитроны обычно появляются и исчезают примерно за одну триллионную долю наносекунды. Более тяжелые частицы живут и того меньше, поскольку для их материализации требуется больше энергии. И вот Трайон предполагает, что вся наша Вселенная с ее колоссальным количеством материи является лишь огромной квантовой флуктуацией, которая почему-то не может исчезнуть вот уже более десяти миллиардов лет. Все подумали, что это просто очень смешная шутка.

Трайон, однако, не шутил. Он был настолько подавлен реакцией коллег, что забыл о своей идее и выбросил из памяти весь этот инцидент. Но мысль продолжала вариться в глубине его сознания и вновь появилась на поверхности три года спустя. В тот

раз Трайон решил ее опубликовать. Его статья вышла в 1973 году в британском научном журнале *Nature* под заголовком “Является ли Вселенная вакуумной флуктуацией?”

Предположение Трайона основывалось на хорошо известном математическом факте: энергия замкнутой вселенной всегда равна нулю. Энергия материи положительна, гравитационная энергия — отрицательна, и оказывается, что в замкнутой вселенной их вклады в точности сокращаются. Так что, если замкнутая вселенная возникнет как квантовая флуктуация, вакууму ничего не понадобится отдавать, а время жизни флуктуации может быть сколь угодно большим.

Создание замкнутой вселенной из вакуума проиллюстрировано на рисунке 17.3. Область плоского пространства начинает вспучиваться, пока не приобретает форму шара. В тот же самый момент в этой области рождается колоссальное количество частиц. Наконец шар отделяется, и — вуаля! — мы получили замкнутую вселенную, которая совершенно не связана с исходным пространствомⁱⁱ. Трайон предположил, что наша Вселенная могла возникнуть именно таким образом, и подчеркнул, что подобное творение не требует причины. “На вопрос, почему это случилось, — писал он, — я отвечаю скромным предположением, что наша Вселенная — из числа тех вещей, что время от времени случаются”ⁱⁱⁱ.

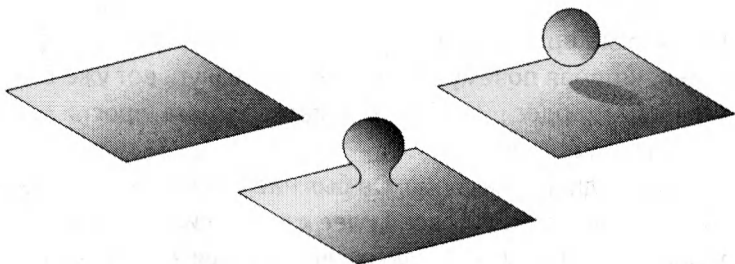


Рис. 17.3. Замкнутая вселенная отделяется от большой области пространства.

Главная проблема с трайоновской идеей состоит в том, что она не объясняет, почему Вселенная такая большая. Крошечные замкнутые вселенные постоянно отделяются от любой крупной области пространства, но вся эта деятельность протекает в планковском масштабе размеров в форме пространственно-временной пены, изображенной на рисунке 12.1. Образование большой замкнутой вселенной в принципе возможно, но вероятность того, что это случится, гораздо ниже, чем вероятность для обезьяны случайно напечатать полный текст шекспировского “Гамлета”.

В своей статье Трайон доказывал, что, даже если большинство вселенных чрезвычайно малы, наблюдатели могут появиться только в больших вселенных, а значит, мы не должны удивляться, что живем в одной из них. Но этого недостаточно, чтобы справиться с данным затруднением, поскольку наша Вселенная гораздо больше, чем нужно для развития жизни.

Более глубокая проблема трайоновского сценария состоит в том, что он в действительности не объясняет происхождение Вселенной. Квантовая флуктуация вакуума предполагает наличие вакуума в некоем исходно существующем пространстве. А мы теперь знаем, что понятия “вакуум” и “ничто” очень сильно различаются. Вакуум, или пустое пространство, обладает энергией и натяжением, он может сгибаться и искривляться, а значит, это, безусловно, *нечто*^{iv}. Как писал Алан Гут, “в данном контексте предположение о том, что Вселенная была создана из пустого пространства, не более фундаментально, чем предположение, что она была выдута из куска резины. Это может оказаться правдой, но люди все равно будут спрашивать, откуда появился этот кусок резины”^v.

В картине квантового туннелирования из ничего нет ни одной из этих проблем. Сразу после туннелирования Вселенная имеет крошечные размеры, но она заполнена ложным вакуумом и немедленно начинает инфляционно расширяться. За долю секунды она раздувается до гигантских размеров.

До туннелирования пространства и времени не существует, так что вопрос о том, что было раньше, не имеет смысла. *Ничто* — состояние без материи, без пространства и без времени — по-видимому, единственное, что удовлетворяет требованиям к начальной точке творения.



Через несколько лет после публикации моей статьи о туннелировании из ничего я узнал, что упустил в ней важную ссылку. Обычно такие вещи всплывают гораздо быстрее в электронных письмах от авторов, которых забыли упомянуть. Но этот автор не написал мне, и на то была уважительная причина: он умер более 1500 лет назад. Его звали Блаженным Августином, и он был епископом Гиппо, одного из крупнейших городов Северной Африки.

Августина чрезвычайно интересовал вопрос, что делал Бог до творения, — поиски ответа он красноречиво описал в своей “Исповеди”. “Если Он ничем не был занят... и ни над чем не трудился, почему на всё время и впредь не остался Он в состоянии покоя, в каком всё время пребывал и раньше?” Августин полагал, что для ответа на этот вопрос он сначала должен понять, что такое время: “Что же такое время? Если никто меня об этом не спрашивает, я знаю, что такое время; если бы я захотел объяснить спрашивающему — нет, не знаю”. Четкий анализ привел его к пониманию, что время может быть определено только через движение, а значит, не может существовать прежде Вселенной. Окончательный вывод Августина: “Мир был создан не во времени, но вместе со временем. Не было времени до мира”. А потому бессмысленно спрашивать, что тогда делал Бог. “Если не было времени, то не было “тогда”^{vi}”. Это очень близко к тому, что я обосновывал в своем сценарии туннелирования из ничего.

Об идеях Августина мне стало известно случайно, из беседы с моей коллегой по Тафтсу Кэтрин Маккарти (Kathryn McCarthy). Я прочел “Исповедь” и сослался на святого Августина в моей следующей статье^{vii}.

МНОЖЕСТВО МИРОВ

Вселенная, возникающая в результате квантового туннелирования, не будет идеально сферической. Она может иметь множество различных форм и быть заполнена разными типами ложного вакуума. Как обычно, в квантовой теории нельзя сказать, какие из этих возможностей реализовались, а можно только подсчитать их вероятности. Может ли тогда оказаться, что существует множество других вселенных, которые стартовали иначе, чем наша?

Этот вопрос тесно связан с острейшей проблемой интерпретации квантовых вероятностей. В главе 11 были описаны две основные альтернативы. Согласно копенгагенской интерпретации, квантовая механика приписывает вероятности всем возможным исходам эксперимента, но лишь один из них на самом деле реализуется. Напротив, эвереттовская интерпретация утверждает, что все возможные исходы реализуются в несвязанных “параллельных” вселенных.

Если принимать копенгагенскую интерпретацию, то творение было однократным событием, в котором из ничего появилась единственная Вселенная. Это, однако, приводит к проблеме. С наибольшей вероятностью из ничего возникает крошечная вселенная планковских размеров, которая не станет туннелировать, а немедленно сколлапсирует и исчезнет. Туннелирование в большие размеры имеет низкую вероятность, а значит, требует большого числа попыток. По-видимому, это совместимо только с интерпретацией Эверетта.

В эвереттовской картине мира существует ансамбль вселенных со всеми начальными состояниями. Большинство из них — “мерцающие” вселенные планковского размера, мгновенно возникающие и прекращающие существование. Но помимо них есть и вселенные, которые туннелировали в большие размеры и стали инфляционно расширяться. Ключевое отличие от копенгагенской интерпретации состоит в том, что все эти вселенные не просто возможные, а реальные^{viii}. Однако наблюдать могут только большие вселенные, поскольку в “мерцающих” невозможно появление наблюдателей.

Все входящие в ансамбль вселенные совершенно независимы друг от друга. Каждая имеет собственное пространство и собственное время. Вычисления показывают, что наиболее вероятными — а значит, и самыми многочисленными — среди туннелирующих вселенных являются те, что имеют наименьший начальный радиус и наивысшую плотность энергии ложного вакуума. Есть все основания предполагать, что наша Вселенная зародилась как раз такой.

В моделях инфляции со скалярным полем наивысший уровень плотности энергии вакуума достигается на вершине энергетического холма, и потому в большинстве зарождающихся вселенных скалярное поле будет находиться в этой области. Это самая предпочтительная стартовая точка для инфляции. Помните, я обещал объяснить, как поле попадает на вершину холма? В сценарии туннелирования из ничего это как раз то состояние, в котором Вселенная обретает существование.

Зарождение Вселенной по сути есть квантовая флуктуация, и ее вероятность быстро убывает с ростом охваченного ею объема. Вселенные, имеющие при возникновении больший начальный радиус, менее вероятны, а в пределе бесконечного радиуса вероятность стремится к нулю. Бесконечная открытая вселенная имеет строго нулевую вероятность зарождения, а значит, в ансамбле должны быть только замкнутые вселенные.

ФАКТОР ХОКИНГА

В июле 1983 года несколько сотен физиков со всего мира собрались в итальянском городе Падуе на 10-ю конференцию по общей теории относительности и гравитации. Конференция проходила в Палаццо делла Раджоне — старинном здании суда XIII века в самом сердце Падуи. Первый его этаж занят знаменитым базаром, который продолжается снаружи на прилегающей площади. На верхнем этаже располагается вместительный зал, украшенный по периметру фресками со знаками Зодиака. В него и проходили выступления. Гвоздем программы был доклад Стивена Хокинга, озаглавленный “Квантовое состояние Вселенной”. Чтобы попасть в лекционный зал, нужно подняться по длинной лестнице, так что доставить туда Хокинга в его инвалидном кресле было непростой задачей. Мне повезло, что я пришел заранее, поскольку к началу доклада зал был полностью забит.

В своем выступлении Хокинг предложил совершенно новый взгляд на квантовое происхождение Вселенной, основанное на работе, выполненной им совместно с Джеймсом Хартлом (James Hartle) из Университета Калифорнии в Санта-Барбаре^{ix}. Вместо того чтобы сконцентрироваться на первых моментах творения, он задался более общим вопросом: как вычислить квантовую вероятность пребывания Вселенной в некотором конкретном состоянии? К данному состоянию Вселенная может прийти посредством огромного множества возможных историй, и квантовая механика позволяет определить, каков вклад каждой из них в его вероятность¹. Итоговое значение вероятности зависит от того, какие классы историй включены в расчет. Хартл и Хокинг предложили включать только истории, в которых пространство-время не имеет границ в прошлом.

¹ Точнее, путем суммирования вкладов различных историй определяется величина, называемая волновой функцией. Вероятность данного состояния равна квадрату волновой функции.

Пространство без границ нетрудно себе представить: это просто означает замкнутую вселенную. Но Хартл и Хокинг потребовали, чтобы пространство-время не имело также границы или края во времени со стороны прошлого. Оно должно быть замкнуто во всех четырех измерениях, за исключением границы, соответствующей настоящему моменту (рис. 17.4).

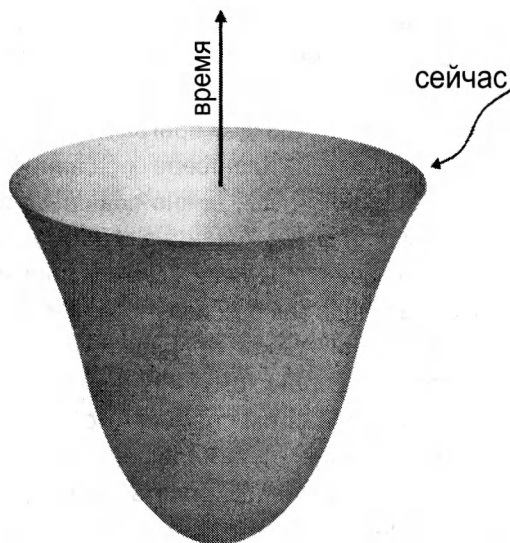


Рис. 17.4. Двумерное пространство-время без границ в прошлом.

Граница в пространстве означает, что существует нечто за пределами вселенной, так что вещи могут уходить за границу и появляться из-за нее. Граница во времени соответствует началу вселенной, где должны быть заданы начальные условия. Согласно предложению Хартла и Хокинга, Вселенная не имеет таких границ; она “полностью самодостаточна и не испытывает никаких воздействий извне”. Это кажется очень простой и при-

влекательной идеей. Единственная проблема состоит в том, что пространств-времен, замкнутых со стороны прошлого — таких, как на рисунке 17.4, — не существует. У пространства-времени должно быть три пространственно-подобных и одно времени-подобное измерение в каждой точке, а в замкнутом пространстве-времени обязательно есть аномальные точки с более чем одним времени-подобным направлением (рис. 17.5).

Чтобы справиться с этим затруднением, Хартл и Хокинг предложили перейти от реального времени к евклидовому. Как говорилось в прошлой главе, евклидово время не отличается от других пространственных измерений, так что пространство-время просто становится четырехмерным пространством, и его без проблем можно сделать замкнутым. Таким образом, пред-

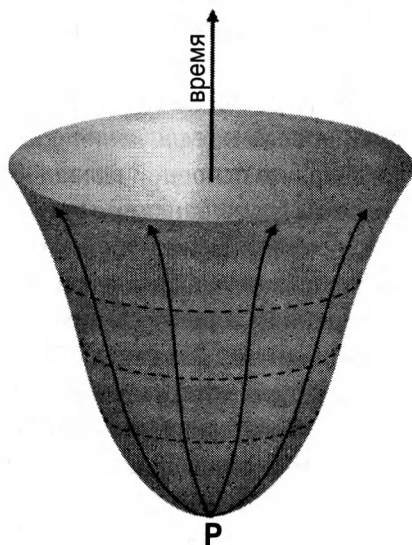


Рис. 17.5. То же, что и на рисунке 17.4, с времени- и пространственно-подобными направлениями, отмеченными соответственно сплошными и пунктирными линиями. Точка P является аномальной, поскольку все направления в ней являются времени-подобными.

ложение состояло в том, чтобы вычислять вероятности суммированием вклада всех евклидовых пространств-времен без границ. Хокинг подчеркивал, что это было лишь предложение. У него не было доказательства его корректности, и единственным способом получить его была проверка: удастся или нет сделать на данном пути разумные предсказания.

Предложение Хартла–Хокинга обладает определенной математической красотой, но я думаю, что после перехода к евклидовому времени оно в значительной мере теряет свою интуитивную привлекательность. Вместо суммирования по всем возможным историям Вселенной нам предлагается суммировать по историям, которые заведомо невозможны, поскольку мы не живем в евклидовом времени. Так что после того, как убираются строительные леса первоначальной мотивации, мы остаемся с довольно формальным рецептом вычисления вероятностей^{*}.

В конце своего доклада Хокинг коснулся тех следствий, которые вытекали из нового предложения для инфляционной вселенной. Он показал, что основной вклад в сумму по историям дается евклидовым пространством-временем, имеющим форму полусферы, — точно так же, как и в моих расчетах туннелирования, — и что последующая эволюция описывается инфляционным расширением в обычном времени. (Переключение от евклидова формализма обратно к обычному времени — довольно хитрая процедура, которую я не стану пытаться здесь описать.) Результатом была такая же история пространства-времени, как и на моем рисунке 17.3, но полученная из совершенно других посылок.

Я ожидал, что Хокинг упомянет мою работу по квантовому туннелированию из ничего, и был разочарован, когда он этого не сделал. Но я был уверен, что теперь, когда на площадку вышел Хокинг, вся тема квантовой космологии, в том числе и моя работа, получит значительно больше внимания, чем прежде.

МНОГО ШУМА ИЗ НИЧЕГО

Важное различие между “туннелированием из ничего” и предложением об “отсутствии границ” состоит в том, что они дают сильно различающиеся, в некотором смысле противоположные, предсказания для вероятностей. Предположение о туннелировании благоприятствует зарождению вселенной наименьшего размера и с наивысшей энергией вакуума. Из требования отсутствия границ, наоборот, вытекает, что наиболее вероятной стартовой точкой является вселенная с наименьшей энергией вакуума и наибольшим возможным размером. Самым вероятным будет появление из ничего бесконечного пустого плоского пространства. Мне кажется, в это очень трудно поверить!

Конфликт между этими двумя подходами стал очевиден только после одного первоначального недоразумения. В моей статье 1982 года делался вывод, что крупные вселенные имеют *более высокую* вероятность зарождения, так что казалось, будто два предложения согласуются друг с другом. Я продолжал возвращаться к тем своим выкладкам, поскольку этот вывод резко противоречил интуиции. В 1984 году я обнаружил ошибку, которая изменила расклад вероятностей на противоположный. Когда Хокинг посетил Гарвард, я поспешил переговорить с ним и поделиться своим новым пониманием. Однако убедить Стивена не удалось, и он по-прежнему считал, что правильным является мой первоначальный результат¹.

Хокинг стал настоящей легендой в кругу физиков, да и за его пределами. Я восхищаюсь как его научными результатами, так и его силой духа и очень дорожу возможностями побеседовать с ним. Поскольку общение требует от него столь больших усилий,

¹ Ошибку в моей первоначальной статье независимо заметили и исправили Андрей Линде, Валерий Рубаков, а также Яков Зельдович с Алексеем Старобинским.

люди часто стесняются к нему обращаться. Мне потребовалось время, чтобы понять: Стивен действительно получает удовольствие от диалога и даже не обижается, когда над ним подшучивают. У нас очень разные взгляды на вечную инфляцию и квантовую космологию, но это делает дискуссию только интереснее.

В 1988 году я вступил в схватку на хокинговской территории и сделал доклад перед его группой в Кембриджском университете, подчеркивая преимущества моего подхода. Когда выступление закончилось, Хокинг подкатился ко мне на своем кресле. Я ожидал критических замечаний, но вместо этого он пригласил меня поужинать вместе... После утки с картошкой и пирога со сливами, приготовленных его матерью, мы заговорили об использовании “кротовых нор” — туннелей в пространстве-времени — для межгалактических путешествий. Таково представление физиков о светской беседе после ужина. Что же касается предложения об отсутствии границ, Стивен не изменил своего мнения.

Спор между сторонниками этих двух подходов продолжается до сих пор. Состоялись даже “официальные” дебаты на конференции COSMO-98 в Монтеррее, Калифорния, где Хокинг защищал предложение об отсутствии границ, а я — о туннелировании¹. Правда, большой полемики в действительности не получилось. Хокингу требовалось много времени, чтобы составить фразу при помощи своего синтезатора речи, так что мы не смогли далеко уйти от заранее заготовленных тезисов.

Разрешить этот спор удалось бы, если изобрести наблюдательный тест, позволяющий выбрать между двумя предположениями. Это, однако, весьма маловероятно по причине вечной инфляции. Квантовая космология дает предсказания о начальном состоянии Вселенной, но в ходе вечной инфляции любые проявления начальных условий полностью стираются. Возь-

1 На следующий день у Хокинга было другое важное дело: он поехал в Голливуд, чтобы записать свой электронный голос для специального эпизода сериала “Симпсоны”.



Рис. 17.6. Дискуссия с Хокингом о квантовой космологии.

Слева направо: автор, Билл Анрух (Bill Unruh) из Университета Британской Колумбии и Стивен Хокинг (пьющий чай с помощью своей сиделки).

Фото Анны Житков.

мом, к примеру, ландшафт теории струн, который мы обсуждали выше. Можно начать с одного инфляционного вакуума или с другого, но неизбежно станут образовываться пузыри иных вакуумов, так что задействованным окажется весь ландшафт. Свойства результирующего мультиверса не будут зависеть от того, как началась инфляция^{xi}.

Таким образом, квантовая космология пока не собирается становиться наблюдательной наукой. Дискуссия о двух подходах, возможно, разрешится теоретическими выкладками, а не наблюдательными данными. Например, если окажется, что квантовое состояние Вселенной определяется неким новым, еще не открытым принципом теории струн. И оно может, конечно, оказаться отличным от обоих нынешних предложений. Но определенность с этим вопросом вряд ли будет достигнута в скором времени.

ГЛАВА 18

Конец света

Одни говорят, мир погибнет в огне,
Другие — во льдах.

РОБЕРТ ФРОСТ

Мое описание Вселенной было бы неполным без рассказа о том, какой конец ее ждет. Теория инфляции говорит нам, что Вселенная как целое будет существовать вечно, но наша местная область — наблюдаемая Вселенная — вполне может иметь конец. Этот вопрос был в центре внимания космологов на протяжении большей части прошлого столетия, и за это время наши представления о конце света несколько раз менялись. Я не буду касаться истории данного вопроса, а изложу современное состояние космической эсхатологии.

БЕЗЖАЛОСТНЫЕ ВАРИАНТЫ

После того как Эйнштейн отказался от космологической постоянной в начале 1930-х годов, предсказания фридмановских однородных и изотропных моделей стали простыми и

понятными: Вселенная подвергнется коллапсу и большому сжатию, если ее плотность больше критической, и продолжит вечно расширяться в противном случае. Все, что нужно сделать для определения судьбы Вселенной, — это тщательно измерить среднюю плотность материи и посмотреть, превосходит ли она критическую. Если да, то расширение Вселенной будет постепенно замедляться и затем сменится сжатием. Сначала медленным, потом все ускоряющимся. Галактики станут сходить все ближе, пока не сольются в огромный конгломерат звезд. Небо будет делаться все ярче, но не из-за звезд — все они, скорее всего, умрут к тому времени, — а из-за растущей интенсивности космического микроволнового излучения. Оно разогреет остатки звезд и планет до весьма неприятных температур, и любые существа, ухитрившиеся дожить до этих последних дней, почувствуют себя лобстерами в кипящей воде.

Наконец, звезды разрушатся в столкновениях друг с другом или испарятся под действием мощного теплового излучения. Образовавшийся горячий огненный шар будет похож на тот, что существовал в ранней Вселенной, за исключением того, что теперь он станет сжиматься, а не расширяться. Еще одно отличие от Большого взрыва состоит в том, что сжимающийся огненный шар сильно неоднороден. Сначала более плотные области сожмутся в черные дыры, которые затем будут сливаться и укрупняться, пока все они не объединятся в одном большом сжатии.

В противоположном варианте — при плотности меньше критической — гравитационное притяжение вещества слишком слабо, чтобы обратить расширение вспять. Вселенная будет расширяться вечно. Менее чем через триллион лет все звезды исчерпают свое ядерное топливо, и галактики превратятся в скопища холодных звездных остатков — белых карликов, нейтронных звезд и черных дыр. Вселенная станет совер-

шенно темной, с призрачными галактиками, разлетающимися прочь в расширяющейся пустоте.

Такое положение дел сохранится по меньшей мере 10^{31} лет, но в конце концов нуклоны, из которых состоят звездные остатки, распадутся, превратившись в легкие частицы — позитроны, электроны и нейтрино. Электроны и позитроны аннигилируют в фотоны, и мертвые звезды медленно растворяются. Даже черные дыры не существуют вечно. Согласно знаменитой хокинговской догадке, из них должна происходить утечка излучения, а значит, они постепенно потеряют свою массу или, как говорят физики, “испарятся”. Так или иначе, менее чем через гугол лет все знакомые нам структуры во Вселенной перестанут существовать. Звезды, галактики и их скопления исчезнут без следа, оставив после себя лишь становящуюся все более разреженной смесь нейтрино и излучения¹.

Судьба Вселенной закодирована параметром, называемым омега, который определяется как отношение средней плотности Вселенной к критической плотности. Если омега больше 1, Вселенная завершит свое существование большим сжатием; если он меньше 1, следует ожидать замерзания и медленного распада. При пограничном значении, если параметр омега равен 1, расширение будет бесконечно замедляться, но никогда полностью не остановится. Вселенная на пределе избежит большого сжатия, но лишь затем, чтобы превратиться в замерзшее кладбище.

Более полувека астрономы пытались измерить значение омега. Однако природа была не склонна раскрывать свои долгосрочные планы. Параметр омега был на удивление близок к 1, но точности измерений не хватало, чтобы сказать, больше он или меньше.

ИНФЛЯЦИОННЫЙ ПОВОРОТ

Представления о конце Вселенной изменились в 1980-х годах, когда на сцену вышла идея инфляции. Прежде большое сжатие и неограниченное расширение априори казались равновероятными, но теперь новая теория инфляции дала весьма определенные предсказания.

Во время инфляции плотность Вселенной становится предельно близкой к критической. В зависимости от квантовых флуктуаций скалярного поля некоторые области приобретают плотность выше или ниже критической, но в среднем она почти точно критическая. Те, кого мучают кошмары, вызванные грядущим через несколько триллионов лет большим сжатием, могут расслабиться. Конец будет медленным и невпечатляющим: холодный остаток Солнца будет целые зоны висеть в пустоте, дожидаясь, пока распадутся все его нуклоны.

Характерная особенность критической плотности состоит в том, что процесс образования структур растягивается на огромный отрезок времени, поскольку более крупные структуры требуют больше времени на формирование. Сначала возникают галактики, затем они сбиваются в скопления, а те впоследствии образуют сверхскопления. Если средняя плотность в наблюдаемой части Вселенной выше критической, то примерно через сотню триллионов лет вся эта область превратится в огромное супер-пупер-скопление. К этому времени все звезды уже прогорят, а все наблюдатели, вероятно, вымрут, но образование структур будет продолжаться, охватывая все большие и большие масштабы. Оно остановится, только когда космические структуры исчезнут из-за распада нуклонов и испарения черных дыр.

Другое изменение, связанное с инфляцией, состоит в том, что конец Вселенной в целом никогда не наступит. Инфляция вечна. В других частях инфлирующего пространства-времени

будут формироваться бесчисленные области, похожие на нашу, а их обитатели будут пытаться понять, как все это началось и чем закончится.

ГАЛАКТИЧЕСКОЕ ОДИНОЧЕСТВО

Фридмановская взаимосвязь между плотностью Вселенной и ее окончательной судьбой работает, только если плотность энергии вакуума (космологическая постоянная) равна нулю. Это было стандартным предположением до 1998 года, но когда были обнаружены свидетельства обратного, все прежние предсказания будущего Вселенной пришлось пересмотреть. Главный прогноз, согласно которому конец света (локальный) будет ледяным, а не огненным, сохранился, но некоторые детали изменились.

Как уже отмечалось, расширение Вселенной начинает ускоряться, как только плотность вещества становится ниже, чем у вакуума. В этот момент всякое гравитационное сгущивание останавливается. Скопления галактик, которые уже связаны друг с другом гравитационно, сохраняются, но более рыхлые группы рассеиваются отталкивающей гравитацией вакуума.

Наш Млечный Путь связан с так называемой Местной Группой, включающей гигантскую спиральную галактику в Андромеде и около 20 карликовых галактик. Туманность Андромеды держит курс на столкновение с Млечным Путем; они сольются примерно через 10 миллиардов лет. Галактики за пределами Местной Группы, двигаясь все быстрее и быстрее, улетят прочь. Одна за другой они будут пересекать наш горизонт и исчезать из виду. Этот процесс завершится через несколько сотен миллиардов лет. В ту далекую эпоху астрономия станет очень скучным делом. Кроме гигантской галактики, образовавшейся по-

сле слияния Туманности Андромеды с ее карликовыми спутниками, на небе не будет практически ничего¹¹. Так что порадуемся небесному шоу, пока еще есть такая возможность!

ОКОНЧАТЕЛЬНЫЙ ВЕРДИКТ

Наш прогноз для Вселенной был бы завершен, если бы космологическая постоянная действительно была константой. Но, как мы знаем, есть серьезные основания считать, что плотность энергии вакуума меняется в очень широком диапазоне, принимая различные значения в разных частях Вселенной. В некоторых областях она имеет большое положительное значение, в других — большое отрицательное, и лишь в редких местах, где она близка к нулю, есть существа, которые знают об этом.

Таким образом, наблюдаемое нами значение не является наименьшей возможной плотностью энергии, а значит, в будущем она неизбежно станет меньше. Рассмотрим, например, модель Линде, в которой энергия вакуума объясняется скалярным полем с очень пологим энергетическим ландшафтом (см. рис. 13.1). Уклон столь мал, что поле очень незначительно изменилось за 14 миллиардов лет, прошедших после Большого взрыва. Но в конце концов оно начнет катиться вниз, и космическое ускорение станет замедляться. В некоторый момент поле опустится ниже нулевой отметки, к отрицательным значениям плотности энергии. Отрицательная энергия вакуума дает гравитационное притяжение, так что долгое космическое расширение остановится и сменится сжатием.

Другой сценарий, вытекающий из представления о ландшафте теории струн, говорит, что в классическом смысле наш вакуум стабилен и имеет постоянную плотность энергии, но квантовомеханически он может распадаться, образуя пузырь-

ки. Те из них, в которых вакуум имеет отрицательную энергию, однажды появившись, будут расширяться с околосветовой скоростью. Стенка пузыря может надвигаться на нас прямо сейчас. Мы не узнаем о ее подходе: она движется так быстро, что свет не намного ее опережает. Приход стенки приведет к полному уничтожению нашего мира. Даже частицы, составляющие звезды, планеты и наши тела, не смогут существовать в новом типе вакуума. Все знакомые объекты мгновенно разрушатся и превратятся в сгустки какой-то неизвестной нам материи.

Так или иначе, но энергия вакуума станет в конце концов отрицательной в нашей области Вселенной. Тогда здесь начнет уплотнение с последующим коллапсом большого сжатияⁱⁱⁱ.

Вряд ли можно предсказать, когда именно это случится. Темп зарождения пузырьков может быть очень низким, поэтому не исключено, что пройдут гуголы лет, пока на наши окрестности надвинется стенка пузыря. В моделях скалярного поля время апокалипсиса зависит от уклона энергетического холма и может наступить довольно скоро, всего, например, через 20 миллиардов лет.

ГЛАВА 19

Огонь в уравнениях

Что вдыхает огонь в уравнения и создает вселенную,
чтобы они описывали ее?

СТИВЕН ХОКИНГ

СОВЕТ АЛЬФОНСА

Альфонс Мудрый, правивший Кастилией в XIII веке, глубоко уважал астрономию. На то имелись совершенно прагматические причины: знание точного положения планет на небе было жизненно необходимо для составления точных гороскопов. Для повышения их качества Альфонс заказал новые астрономические таблицы, основанные на теории Птолемея — последнем слове тогдашней космологии. Но когда ему объяснили тонкости птолемеевой системы, он отреагировал весьма скептически: “Если бы Всемогущий Бог посоветовался со мной перед творением, я бы порекомендовал что-нибудь попроще”¹.

Король Альфонс мог бы сказать то же самое и о той картине мира, которую я нарисовал в этой книге. Она говорит о существовании бесконечного ансамбля вселенных, каждая из которых пестрит

областями с разной физикой элементарных частиц. Области, где могут жить разумные существа, редки и разделены громадными расстояниями. Еще реже встречаются области, совершенно идентичные между собой, но даже их существует бесконечное множество. Какое расточительство пространства, материи и вселенных!

Однако нам не стоит слишком беспокоиться о количестве вселенных. Новая картина мира экономит куда более ценный товар: она значительно снижает число произвольных предположений, которые делаются о Вселенной. Лучшая теория — та, которая объясняет мир, опираясь на минимальные и простейшие предположения.

Ранние космологические модели исходили из того, что Творец тщательно сконструировал и тонко настроил Вселенную. Каждая деталь в физике элементарных частиц, каждая фундаментальная постоянная и все первичные возмущения нужно было выставить строго определенным образом. Представьте только бесчисленные тома спецификаций, которые Творец вручал своим ассистентам для выполнения работы! Новая картина мира предлагает совершенно иной образ Творца. После некоторого раздумья он пришел к набору уравнений фундаментальной теории всей природы. Этим запускается процесс неукротимого творения. Никаких дальнейших инструкций не требуется: теория описывает квантовое зарождение вселенных из ничего, процесс вечной инфляции и создание областей со всеми возможными типами физики элементарных частиц — *до бесконечности*. Каждый конкретный элемент ансамбля вселенных невероятно сложен, и для его описания понадобилось бы огромное количество информации. Но весь ансамбль в целом можно закодировать относительно простым набором уравнений¹.

- 1 Подобная ситуация, когда бесконечный ансамбль оказывается много проще отдельного члена, очень часто встречается в математике. Рассмотрим, например, множество всех целых чисел: 1, 2, 3, ... Его можно сгенерировать простой компьютерной программой, занимающей всего несколько строк. С другой стороны, число битов, необходимых для записи конкретного большого целого числа, равно количеству цифр в его двоичной записи и может оказаться гораздо больше.

БОГ КАК МАТЕМАТИК

Как узнать, что наш портрет Творца близок к истине? Пытался ли он оптимизировать использование “ресурсов”, таких как пространство и материя, или больше заботился о сжатости математического описания природы? К сожалению, он не дает интервью, но продукт его работы — Вселенная — не оставляет сомнений на этот счет.

Поверхностного взгляда на Вселенную достаточно, чтобы убедиться, с какой великой расточительностью растрачивались материя и пространство. Бесчисленные галактики разбросаны в пустом космосе на колоссальных расстояниях друг от друга. Галактики делятся на несколько типов, среди которых спиральные и эллиптические, карликовые и гигантские. Но за исключением этого все они очень похожи друг на друга. Творец ясно дает понять, что не стесняется бесконечно повторять свои работы.

Более внимательный анализ открывает нам, что Творец без ума от математики. Пифагор в VI веке до нашей эры, вероятно, впервые предположил, что математические соотношения лежат в основе всех физических явлений. Его догадка была подтверждена веками научных исследований, и теперь мы считаем само собой разумеющимся, что природа подчиняется математическим законам. Но если остановиться и задуматься, то этот факт выглядит крайне странным.

Математика кажется продуктом чистого мышления, очень слабо связанным с опытом. Но почему же тогда она так идеально подходит для описания физической Вселенной? Это именно то, что физик Юджин Вигнер называл “непостижимой эффективностью математики в естественных науках”. Рассмотрим в качестве простого примера *эллипс*. Он был известен древним грекам как кривая, которая получается при разрезании конуса плоскостью под определенным углом. Архимед и другие грече-

ские математики изучали свойства эллипса просто из интереса к геометрии. Затем, более 2000 лет спустя, Иоганн Кеплер открыл, что планеты в своем движении вокруг Солнца с высокой точностью описывают эллипсы. Но что общего у движений Марса и Венеры с коническими сечениями?

Ближе к нашему времени, в 1960-х годах, мой друг математик Виктор Кац (Victor Kac) исследовал класс замысловатых математических структур, известных как алгебры Каца–Мули. Единственным мотивом для этого был его нюх, который подсказывал: эти структуры пахнут чем-то интересным и могут привести к красивым математическим результатам. Никто не мог предсказать, что через пару десятилетий эти алгебры станут играть ключевую роль в теории струн.

Эти примеры не являются исключениями. Чаще случается именно так, а не наоборот: физики обнаруживают, что математические построения, необходимые им для описания нового класса явления, уже исследованы математиками по причинам, не имеющим ничего общего с обсуждаемыми явлениями. Похоже, что Творцу присуще математическое чувство красоты. Многие физики, полагаясь на эту его черту, используют математическую красоту в качестве путеводной нити в поисках новых теорий. Согласно Полю Дираку, одному из основоположников квантовой механики, “красота уравнений важнее их соответствия эксперименту, потому что расхождения могут быть вызваны второстепенными причинами, которые проявятся по мере развития теории”ⁱⁱ.

Математическую красоту определить ничуть не проще, чем в красоту в искусствеⁱⁱⁱ. Примером того, что математики считают красивым, может служить формула Эйлера: $e^{i\pi} + 1 = 0$. Один из критериев красоты — это простота, но одной простоты недостаточно. Формула $1 + 1 = 2$ проста, но не особо красива, поскольку тривиальна. Напротив, формула Эйлера демонстрирует весьма неожиданную связь между тремя, казалось бы, неза-

висимыми числами: числом e , известным как основание натуральных логарифмов, “мнимым” числом i — квадратным корнем из -1 и числом π — отношением длины окружности к ее диаметру. Это свойство можно назвать глубиной. Красивая математика соединяет простоту и глубину.

Если и в самом деле Творец имеет математический склад ума, тогда уравнения окончательной Теории Всего должны быть поразительно простыми и невероятно глубокими. Некоторые считают, что эта окончательная теория есть теория струн, которую мы сейчас открываем. Безусловно, она очень глубока. Простой ее не назовешь, но простота может проявиться, когда теория будет лучше понята.

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ ДЕМОКРАТИЯ

Если мы когда-нибудь откроем окончательную Теорию Всего, останется вопрос: почему именно эта теория? Математическая красота может быть полезна как путеводная нить, но трудно себе представить, что ее достаточно для выбора единственной теории из бесконечного множества возможностей. Говоря словами физика Макса Тегмарка, “почему одна, и только одна, математическая структура должна быть наделена физическим существованием?” Тегмарк, работающий ныне в Массачусетском технологическом институте, предложил путь для выхода из этого тупика^{iv}.

Его предложение столь же простое, сколь и радикальное: он отстаивает идею, что для любой и каждой математической структуры должна существовать отвечающая ей вселенная^v. Существует, например, ньютоновская вселенная, подчиняющаяся законам евклидовой геометрии, классической механики и теории гравитации Ньютона. Есть также вселенные, в которых пространство имеет бесконечное число измерений, и другие —

с двумя измерениями времени. Еще труднее представить себе вселенную, управляемую алгеброй кватернионов, не имеющую ни пространства, ни времени.

Тегмарк утверждает, что все эти вселенные существуют “где-то”. Мы не знаем о них точно так же, как не знаем о других вселенных, зарождающихся из ничего. Математические структуры в некоторых из этих вселенных достаточно изощренны, чтобы допустить возникновение “самосознающих подструктур”, подобных вам и мне. Такие вселенные редки, но, конечно, только они могут быть наблюдаемы.

У нас нет фактов в поддержку столь радикального расширения реальности. Единственная причина повышать статус вселенных с другими математическими структурами до реального существования — это обход необходимости объяснять, почему они не существуют. Возможно, это удовлетворило бы некоторых философов, но физикам нужно что-то более существенное. В духе принципа заурядности можно было бы попробовать показать, что фундаментальная теория нашей Вселенной — в некотором роде типичная среди всех теорий, достаточно богатых, чтобы содержать наблюдателей. Это могло бы поддержать расширенный мультиверс Тегмарка.

В случае успеха эта программа полностью вывела бы Творца за рамки картины мира. Инфляция оставляет ему лишь работу по заданию начальных условий в момент Большого взрыва, квантовая космология снимает с него бремя создания пространства, времени и запуска инфляции, а теперь его изгоняют и из последнего прибежища — выбора фундаментальной теории.

Предложение Тегмарка сталкивается, однако, с очень серьезной проблемой. Число математических структур увеличивается с ростом сложности, а значит, “типичная” структура должна ужасать своей тяжеловесностью и громоздкостью. Очевид-

но, это противоречит простоте и красоте теорий, описывающих мир. Так что непосредственной угрозы безопасности Творца, похоже, пока нет^{VI}.

МИР МНОГИХ МИРОВ

На протяжении веков философы и теологи пытались обосновать, что Вселенная конечна или бесконечна, неизменна или развивается, вечна или преходяща. Может показаться, что все возможные ответы на эти вопросы уже рассмотрены. Однако никто не предвосхитил картину мира, родившуюся из последних достижений космологии. Вместо выбора между противоречащими друг другу вариантами она допускает, что в каждом из них есть некоторая доля правды.

В центре новой системы мира лежит картина вечной инфляционно расширяющейся Вселенной. Она состоит из изолированных “островных вселенных”, где инфляция закончилась, окруженных инфляционным морем ложного вакуума. Границы этих постинфляционных островов быстро расширяются, но разделяющие их расстояния растут еще быстрее. Так что всегда есть место для образования новых островных вселенных, и их число безгранично увеличивается.

При взгляде изнутри каждый остров представляется самодостаточной бесконечной вселенной. Мы живем в одной из таких островных вселенных, и наблюдаемая нами область — лишь один из бесконечного числа содержащихся в ней О-регионов. Можно фантазировать на тему того, как спустя миллиарды лет наши далекие потомки будут путешествовать в другие О-регионы, однако добраться в другую островную вселенную невозможно принципиально. Неважно, как долго и насколько быстро мы будем лететь, — мы навсегда связаны с нашей островной вселенной.

В целом все вечно инфлирующее пространство-время возникло из крошечной замкнутой вселенной. Она квантовомеханически туннелировала из ничего и сразу оказалась ввергнута в никогда не прекращающуюся бешеную инфляцию. Таким образом, Вселенная вечна, но у нее было начало.

Инфляция быстро раздула Вселенную до огромного размера, но глобально она всегда остается замкнутой и конечной. Причем из-за особой структуры инфляционного пространства-времени она содержит неограниченное количество бесконечных островных вселенных.

Фундаментальные постоянные, определяющие характер нашего мира, получают различные значения в разных островных вселенных. Большинство из этих вселенных кардинально отличаются от нашей, и лишь малая часть из них пригодна для жизни¹. Наблюдатели каждого такого обитаемого острова обнаружат, что их вселенная развивается от Большого взрыва к большому сжатию. Однако с глобальной точки зрения все типы островов на всех стадиях своей эволюции существуют одновременно. Эта ситуация подобна человеческой популяции на Земле. Каждая личность начинает жизнь ребенком и со временем становится старше, но население в целом в каждый момент включает людей всех возрастов. Хотя общий объем Вселенной растет со временем, часть пространства, занятая каждым типом островов, не меняется. В этом смысле вечно инфлирующая Вселенная является стационарной.

Поразительная особенность новой картины мира — это существование за пределами наблюдаемой области множества “других миров”. Реальность некоторых из них достаточно несомненна. Мало кто, например, будет сомневаться в реальности других О-регионов, несмотря на то что они недоступны для на-

¹ В зависимости от фундаментальной теории константы могут меняться и внутри отдельной островной вселенной. Наша собственная островная вселенная будет тогда по большей части пустынной с редкими обитаемыми анклавами.

блюдения. Имеются косвенные доказательства множественности островных вселенных с различными свойствами. Что же касается других несвязанных пространств-времен, зародившихся из ничего, то нет никаких идей относительно возможности наблюдательной проверки их существования.

Картина квантового туннелирования из ничего наводит на другой интригующий вопрос. Процесс туннелирования управляется теми же фундаментальными законами, которые описывают последующую эволюцию Вселенной. Следовательно, законы должны быть “на месте” еще до того, как возникнет сама Вселенная. Означает ли это, что законы — не просто описания реальности, а сами по себе имеют независимое существование? В отсутствие пространства, времени и материи на каких скрижалях могут быть они записаны? Законы выражаются в форме математических уравнений. Если носитель математики — это ум, означает ли это, что ум должен предшествовать Вселенной?

Эти вопросы ведут нас вглубь непознанного, в самую бездну величайшей из тайн. Трудно представить себе, что когда-либо мы сможем ее раскрыть. Но, как и прежде, возможно, это просто свидетельствует об ограниченности нашего воображения.

Эпилог

От: WSX-23EDJ

Кому: Галактическому Совету

Приветствую! Согласно Протоколу, я завершил инспекцию планеты Земля, расположенной в секторе S-16 в периферийной зоне Галактики. Человеческий вид, населяющий эту планету, добился значительного прогресса за 1000 земных лет, прошедших с момента прошлой инспекции. Я повысил его статус с “подающего надежды” до “технологически перспективного”.

Вы будете рады узнать, что люди полагают, будто близки к открытию окончательной теории Вселенной. Завидую их юношескому задору... В некоторых аспектах они подошли вплотную к правильным ответам, что, на мой взгляд, удивительно для столь примитивной цивилизации. В других вопросах они весьма значительно отстают и даже не догадываются о правильных ответах.

В целом эта раса остается незрелой. В настоящее время я выступаю против их вступления в Галактический Союз. Дальнейшие подробности будут представлены в моих регулярных отчетах.

*Искренне ваш,
WSX-23EDJ*

Примечания

Часть I. Сотворение мира

ГЛАВА 1. Что взорвалось, как взорвалось и что послужило причиной взрыва

- i А.Х. Гут, Инфляционная Вселенная, Addison-Wesley, Reading, 1997, p. 2.

ГЛАВА 2. Взлет и падение отталкивающей гравитации

- i J. Williams, R. Abrashkin, *Danny Dunn and Anti-gravity Paint* (“Дэнни Данн и антигравитационная краска”), McGraw Hill, New York, 1957.
- ii Письмо Эйнштейна Эренфесту. Цит. По A. Pais. *Subtle is the Lord* (Oxford University Press, Oxford, 1982).
- iii Письмо Эйнштейна Зоммерфельду, 8 февраля 1916 г.
- iv Позднее стало понятно, что эйнштейновская статическая космологическая модель неприемлема даже чисто теоретически, поскольку равновесие притягивающей и отталкивающей гравитации в этой модели является неустойчивым. Если по какой-то причине размеры вселенной Эйнштейна немного увеличатся, плотность вещества уменьшится (поскольку вырастут расстояния между галактиками), тогда как

плотность энергии вакуума останется неизменной, будучи зафиксированной космологической постоянной. Следовательно, отталкивающая гравитация вакуума станет теперь сильнее притягивающей гравитации вещества и заставит вселенную расширяться. Это приведет к дальнейшему увеличению объема и еще большей разбалансировке притягивающих и отталкивающих сил. Вселенная, таким образом, войдет в режим ускоряющегося расширения. Аналогично, если размеры статической вселенной немного уменьшатся, притягивающая гравитация вещества победит отталкивание вакуума, и вселенная сколлапсирует в точку. Согласно квантовой теории, небольшие флуктуации размеров вселенной неизбежны, и поэтому вселенная Эйнштейна не может оставаться в равновесии бесконечно долго.

ГЛАВА 3. Творение и его недостатки

- i Цит. по: Э.А. Тропп, В.Я. Френкель, А.Д. Чернин, “Александр Александрович Фридман”, М., “Наука”, 1988, с. 133.
- ii Фридман не рассматривал случай плоской вселенной. Он был изучен Эйнштейном и де Ситтером в 1932 году.
- iii Достойным внимания исключением была реакция Эйнштейна на работу Фридмана. Сначала Эйнштейн думал, что Фридман ошибся, и написал короткую заметку в журнал о том, что он считал ошибкой. Однако менее чем через год, после беседы с другом Фридмана Юрием Крутковым, он отказался от своих возражений. Крутков сообщил домой, что он победил в споре с Эйнштейном и что “честь Петрограда спасена!”. Но хотя Эйнштейн и согласился с математическими выкладками Фридмана, он по-прежнему верил, что Вселенная статична, а работа Фридмана представляет лишь чисто формальный интерес. В своей второй заметке в журнале он писал, что “убедился в том, что результаты г-на Фридмана корректны и ясны”. В первоначальном черновике он добавил, что эти результаты вряд ли могут иметь какое-то значение для физики, но потом зачеркнул данную фразу, видимо, поняв, что она основана в большей мере на его философских предубеждениях, чем на каких-то известных фактах.
- iv Источник энергии звезд не был известен во времена Гельмгольца, но теперь мы знаем, что они сжигают ядерное топливо, превращая во-

дород в гелий, а затем и в более тяжелые ядра. Это необратимый процесс, сопровождаемый повышением энтропии, и в конце концов звезды исчерпывают свое ядерное топливо. Некоторые звезды выключают свои ядерные двигатели без большой помпы и потом постепенно остывают, другие взрываются, распыляя газ по межзвездному пространству и оставляя после себя компактный остаток (нейтронную звезду или черную дыру). Выброшенный газ может повторно послужить для формирования нового поколения звезд, но раньше или позже поступления газа иссякнут, поскольку все большая его часть будет заканчивать свой путь в компактных звездных остатках. Спустя триллион лет галактики, вероятно, значительно потускнеют. Процесс постепенного угасания огней может порядком затянуться, но одно ясно: Вселенная, какой мы ее знаем, не может существовать вечно.

- v Идея больцмановских флуктуаций — это, возможно, первый пример того, что позже стали называть антропной аргументацией (см. главу 13).
- vi Первое убедительное свидетельство галактической эволюции было представлено в 1950-х годах кембриджским астрономом Мартином Райлом (Martin Ryle). Он обнаружил, что несколько миллиардов лет назад мощное радиоизлучение встречалось у галактик гораздо чаще, чем ныне.
- vii Артур Конан Дойл, “Знак четырех”, пер. М. Литвиновой.

ГЛАВА 4. Современная история сотворения мира

- i Чит. по статье Р.Г. Стьюера (R.H. Stuewer) в сб. “Калейдоскоп науки” (*The Kaleidoscope of Science*, ed. By E. Ullmann-Margalit, Reidel, Dordrecht, 1986, p. 147).
- ii Описание жизни Гамова в этой главе основано по большей части на его неоконченной автобиографии “Моя мировая линия” (*My World Line*, Viking Press, New York, 1970).
- iii Атомы состоят из маленьких положительно заряженных ядер и отрицательно заряженных электронов, “обращающихся” вокруг них. (Я помещаю слово “обращающихся” в кавычки, поскольку в атомах существует квантовая неопределенность, так что вместо картины электронов, упорядоченно движущихся вдоль своих орбит, подобно планетам

вокруг Солнца, более точным было бы рисовать их “размазанными” вокруг этих орбит.) Ядра состоят из двух типов субатомных частиц: протонов, несущих положительный электрический заряд, и нейтронов, которые электрически нейтральны. Химические свойства атома определяются исключительно числом электронов (которое равно числу протонов, так что атомы электрически нейтральны).

- iv Происхождение этого дисбаланса между веществом и антивеществом — один из активно исследуемых вопросов в современной космологии. Ее обсуждение см. в книге A.H. Guth, *The Inflationary Universe* (Addison-Wesley, Reading, 1997).
- v Более подробное обсуждение горячего огненного шара и образования элементов можно найти в классическом бестселлере Стивена Вайнберга “Первые три минуты” (РХД, 2000) (Steven Weinberg, *The First Three Minutes*, Bantam, New York, 1977).
- vi M.J. Rees, *Before the Beginning* (“До начала”), Addison-Wesley, Reading, 1997, p. 17).
- vii S. Weinberg, там же, с. 123.

ГЛАВА 5. Инфляционная Вселенная

- i Все подробности пути Алана Гута к открытию инфляции описаны в его блестящей книге “Инфляционная Вселенная: в поисках новой теории происхождения космоса” (*The Inflationary Universe: The Quest for a New Theory of Cosmic Origins*, Addison-Wesley, Reading, 1997).
- ii Вполне возможно, что наш вакуум не является самым низкоэнергетическим. Теория струн, которая на сегодня является основным кандидатом на роль самой фундаментальной физической теории, предполагает существование вакуумов с отрицательной энергией. Если они действительно существуют, то наш вакуум спонтанно распадется с катастрофическими последствиями для всех содержащихся в нем материальных объектов. Мы обсудим теорию струн в главе 15, а возможность распада вакуума — в главе 18. А пока будем предполагать, что обитаем в истинном вакууме.
- iii Этот вывод легко понять из простых энергетических соображений. Сила всегда действует на физический объект в направлении уменьшения его энергии. (Точнее, *потенциальной* энергии, которая пред-

ставляет собой составляющую энергии, не связанную с движением.) Например, сила гравитации тянет объекты вниз, в направлении убывания их энергии. (Гравитационная энергия растет с высотой над землей.) Для ложного вакуума энергия пропорциональна объему, который он занимает, и может быть уменьшена только сокращением объема. Поэтому должна существовать сила, вызывающая сжатие вакуума. Эта сила и есть натяжение.

ГЛАВА 6. Слишком хорошо, чтобы быть ошибкой

- i А.Н. Guth, "The inflationary universe: A possible solution to the horizon and flatness problems" ("Инфляционная Вселенная: возможное решение проблемы горизонта и плоской геометрии"), *Physical Review*, vol. D23, p. 347 (1981).
- ii Модель Старобинского основывается на модифицированных уравнениях гравитации Эйнштейна. Данная модификация становится существенной только при очень высокой кривизне пространства-времени. Величина этой кривизны играет в данной теории роль скалярного поля.
- iii В истинно русском стиле Муханов и Чибисов написали свою статью "для Ландау", приведя в ней свой результат и минимум пояснений о том, как он был получен. Некоторые участники Наффилдовского симпозиума считают, что в этих выкладках могли быть пропущены важные шаги, и поэтому получение данного результата нельзя полностью отнести на счет Муханова и Чибисова. Я не буду пытаться разрешить здесь этот вопрос.

Часть II. Вечная инфляция

ГЛАВА 8. Вечная инфляция

- i A. Vilenkin, "The birth of inflationary universes" ("Рождение инфляционных вселенных"), *Physical Review*, vol. D27, p. 2848 (1983). Это статья о квантовой космологии; вечная инфляция обсуждается в последнем разделе.

- ii Экспоненциально раздувающаяся область быстро заполнила бы компьютерный экран, заставив нас остановить моделирование. Мы справились с этой проблемой, используя расширяющуюся шкалу расстояний, которая росла в том же темпе, что и область инфляции. Если пользоваться такой растягивающейся линейкой, величина объема инфлирующего ложного вакуума не меняется во времени, и он занимает постоянную площадь на экране. В аналогии с экономической инфляцией, которую мы использовали в главе 5, этот способ измерения соответствует выражению цен в “первоначальных долларах”, благодаря чему эффект инфляции исключается.
- iii M. Aryal and A. Vilenkin, “The fractal dimension of the inflationary universe” (“Фрактальная размерность инфляционной вселенной”), *Physics Letters*, vol. B199, p. 351 (1987).
- iv A.D. Linde, “Eternally existing self-reproducing chaotic inflationary universe” (“Вечно существующая самовоспроизводящаяся хаотическая инфляционная вселенная”), *Physics Letters*, vol. B175, p. 395 (1986). Термин “вечная инфляция” был введен Линде в этой статье.

ГЛАВА 9. Говорящие небеса

- i Ускоренное расширение Вселенной было открыто Группой по сверхновым с большими красными смещениями (High-Z Supernova Search Team) под руководством гарвардского астронома Роберта Киршнера (Robert Kirshner) и Брайана Шмидта (Brian Schmidt) из обсерватории Сайдинг Спрингс в Австралии, а также Проектом по сверхновым в космологии (Supernova Cosmology Project), возглавляемым Солом Перлмуттером (Saul Perlmutter). Из первых рук об этом открытии можно прочесть в остроумной книге Роберта Киршнера “Экстравагантная Вселенная: взрывающиеся звезды, темная энергия и ускоряющийся космос” (*The Extravagant Universe: Exploding Stars, Dark Energy, and the Accelerating Cosmos*, Princeton University Press, Princeton, 2004).
- ii Инфляцию можно примирить с плотностью ниже критической ценой увеличения сложности и уменьшения привлекательности теории. Для этого требуется энергетический ландшафт скалярного поля строго определенного вида. В нем должен быть барьер, как в первоначаль-

ной модели Гута (рис. 6.2). Однако вместо крутого спада к минимуму за этим барьером должен быть очень пологий спуск. Получаемая модель сочетает особенность старого инфляционного сценария Гута с усовершенствованным сценарием Линде и других. Поле туннелирует под барьером, приводя к появлению пузырьков, а затем медленно катится вниз в каждом отдельном пузырьке. В своем анализе вакуумных пузырей Сидней Коулман показал, что изнутри они выглядят как открытые фридмановские вселенные с плотностью ниже критической. Тщательно подобрав высоту и уклон холма, можно добиться плотности близкой, но все же отличной от критической. Физикам такая тонкая подстройка кажется безвкусицей, и они надеются, что прибегать к ней не потребуется.

Если же, с другой стороны, наблюдения покажут, что плотность превышает критическую более чем на одну стотысячную, следствием будет то, что Вселенная представляет собой относительно небольшую трехмерную сферу, ненамного крупнее современного горизонта. Для инфляции это создаст очень серьезные проблемы.

- iii Происхождение гравитационных волн аналогично появлению возмущений плотности (см. главу 6). Они порождаются квантовыми флуктуациями в ходе инфляции, амплитуда которых не зависит от линейного масштаба. Предсказание относительно гравитационных волн вытекает из работы Алексея Старобинского, выполненной в 1980 году, еще до того, как Гут предложил идею инфляции.
- iv QUIET начал работу в ноябре 2009 года. Он способен детектировать гравитационные волны, порожденные инфляцией, но только если ложный вакуум имел энергетический масштаб Великого объединения. Для не столь энергичного вакуума потребуются более чувствительные инструменты.

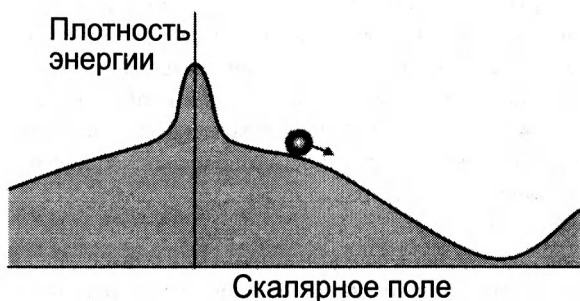
ГЛАВА 10. Бесконечные острова

- i A.D. Linde, "Life after inflation" ("Жизнь после инфляции"), *Physics Letters*, vol. B211, p. 29, 1988.
- ii В плоском пространстве-времени квадрат интервала между двумя событиями определяется как $(\text{разность во времени})^2 - (\text{расстояние в пространстве})^2$. За исключением знака "минус" это очень похоже на

вычисление квадрата гипотенузы по теореме Пифагора. Для вычисления интервала расстояния в пространстве и времени должны выражаться в совместимых единицах. Например, если время измеряется в годах, то мерой длины должны быть световые годы. Интервал времени-подобен, если его квадрат положителен, и пространственно-подобен, если отрицателен. Для встречи класса и матча по суперболу, которые обсуждаются в тексте, разница во времени составляет 3 года, а расстояние в пространстве — 4 световых года. Значит, квадрат интервала будет $3^2 - 4^2 = -7$. Поэтому интервал является пространственно-подобным.

ГЛАВА 11. Да здравствует короли!

- i J. Garriga and A. Vilenkin, “Many worlds in one” (“Много миров в одном”), *Physical Review*, vol. D64, p. 043511 (2001).
- ii A.D. Sakharov, in *Alarm and Hope* (в сб. “Тревога и надежда”), eds. Yankelevich and A. Friendly (Knopf, New York, 1978).
- iii G.F.R. Ellis and G.B. Brundrit, *Life in the infinite universe* (“Жизнь в бесконечной Вселенной”), *Quarterly Journal of the Royal Astronomical Society*, vol. 20, p. 37 (1979).
- iv Глубокое обсуждение многомировой интерпретации, стимулирующее ее дальнейшее осмысление, можно найти в книге David Deutsch, *The Fabric of Reality* (Дэвид Дойч, “Ткань реальности”), Penguin, New York, 1997.
- v Цитируется по: G. Edelman, *Bright Air, Brilliant Fire: On the Matter of the Mind*, Penguin, New York, 1992, p. 216.
- vi По выражению Дэвида Мермина (David Mermin), см. *Physics Today*, April 1989, p. 9.
- vii Из свидетельских показаний президента Клинтона перед большим жюри 17 августа 1998 года.
- viii Пример энергетического ландшафта, предназначенного для того, чтобы избежать вечной инфляции, показан на следующем рисунке (сравните с рис. 6.4).
Плоская вершина холма, ответственная за вечную инфляцию, заменена крутым пиком. В то же время пологий склон должен быть сохранен, поскольку без него инфляции не будет вовсе. Такие ландшафты



вряд ли могут появиться в физике элементарных частиц. Практически во всех предложенных на сегодня моделях инфляция вечна.

- ix** Некоторые этические следствия новой картины мира обсуждаются в статье “Philosophical implications of inflationary cosmology” (“Философские следствия инфляционной космологии”), написанной мною в соавторстве с философом Джошуа Ноубом (Joshua Knobe) и моим коллегой по Тафтсу Кеном Оламом (Ken Olum), которая опубликована в марте 2006 года в *The British Journal of the Philosophy of Science*.

Часть III. Принцип заурядности

Глава 12. Проблема космологической постоянной

- i** Первое надежное измерение флуктуаций электромагнитного вакуума выполнено только в 1990-х годах методом, предложенным десятилетиями назад голландским физиком Хендриком Казимиром. Две металлические пластины помещают в вакууме параллельно друг другу. Металл подавляет электромагнитные колебания, и это приводит к уменьшению вакуумных флуктуаций между пластинами. Давление флуктуирующих полей на внешние поверхности пластин оказывается больше, чем на внутренние, что приводит к появлению силы, прижимающей пластины друг к другу. Эта сила очень мала и быстро спадает с увеличением расстояния между пластинами. Измерения проводились с пластинами, разделенными интервалом в один микрон (миллионную долю метра).

- ii Именно это происходит в тех теориях элементарных частиц, где есть особый вид симметрии, называемый *суперсимметрией*. Бозоны и фермионы в таких теориях появляются парами, так что каждая бозе-частица имеет фермионного партнера и наоборот. Частицы-партнеры в каждой паре имеют одинаковую массу, а вакуумные энергии фермионов и бозонов в точности сокращаются. Поэтому полная плотность энергии вакуума равна нулю.

Это могло бы оказаться изящным решением проблемы космологической постоянной, но беда в том, что наш мир определенно не суперсимметричен. В противном случае на ускорителях наблюдалось бы рождение многочисленных партнеров электронов, кварков и фотонов. Кроме того, даже в суперсимметричном мире космологическая постоянная сокращается только в отсутствие гравитации. Если же принять ее в расчет, то энергия вакуума приобретает большое отрицательное значение.

Глава 13. Антропные владения

- i Craig J. Hogan, "Quarks, electrons and atoms in closely related universes", in *Universe or Multiverse*, ed. by B.J. Carr, Cambridge University Press, Cambridge, 2006 (Крэйг Хоган, "Кварки, электроны и атомы в тесно связанных вселенных" в сб. "Вселенная или мультиверс" под редакцией Б.Дж. Карра).
- ii Многочисленные наглядные примеры тонкой настройки фундаментальных постоянных обсуждаются в статье Бернарда Карра и Мартина Риса в журнале *Nature* (Bernard J. Carr and Martin J. Rees in *Nature*, vol. 278, p. 605, 1979), и в книгах "Случайная Вселенная" Пола Дэвиса (Paul C.W. Davies, *The Accidental Universe*, Cambridge University Press, Cambridge, 1982), "Антропный космологический принцип" Джона Барроу и Фрэнка Типлера (John D. Barrow, Frank J. Tipler, *The Anthropic Cosmological Principle*, Oxford University Press, Oxford, 1986) и "Вселенные" Джона Лэсли (Universes, Routledge, London, 1989). Легко доступные для понимания популярные обзоры даны в книгах Мартина Риса "До начала: наша Вселенная и другие" (Martin Rees, *Before the Beginning: Our Universe and Others*, Addison-Wesley, Reading, 1997) и "Всего шесть чисел" (Martin Rees, *Just Six Numbers*, Basic Books, New York, 2001).

- iii B. Carter, "Large number coincidences and the anthropic principle in cosmology", in *Confrontation of Cosmological Theories with Observational Data*, ed. By M.S. Longair, Reidel, Boston, 1974, p. 132. (Б. Картер, "Совпадение больших чисел и антропный принцип в космологии" в сб. "Сопоставление космологических теорий с наблюдательными данными" под ред. М.С. Лонгэйра).
 - iv Звезды менее массивные, чем Солнце, живут дольше. Однако они склонны к нестабильности и подвержены вспышкам, способным уничтожить жизнь на планетах. Мы предполагаем, что планеты, обращающиеся вокруг таких звезд, не годятся на роль дома для потенциальных наблюдателей.
 - v Дикке обнаружил этот аргумент в 1961 году в ответ на захватывающую гипотезу, выдвинутую знаменитым британским физиком Полом Дираком. Дирак был поражен слабостью гравитации, которая в 1040 раз слабее электромагнитного взаимодействия. Он также заметил, что видимая Вселенная в 1040 раз больше протона. Мысль Дирака состояла в том, что это не может быть простым совпадением, и предположил, что эти два числа должны быть каким-то образом связаны. Но размер наблюдаемой Вселенной увеличивается во времени, и поэтому его отношение к размерам протона в последующие эпохи будет расти. Это привело Дирака к заключению, что другое число, выражающее слабость гравитации, тоже должно увеличиваться: гравитация должна становиться все слабее.
- Аргумент Дикке дал совершенно иной взгляд на совпадение больших чисел. Мы наблюдаем Вселенную не в произвольную эпоху, а в то время, когда ее возраст сравним со временем жизни звезд. Дикке показал, что именно в это время дираковские большие числа действительно близки друг к другу. (Это не совпадение: видимая Вселенная велика, поскольку велика продолжительность жизни звезд, а она, в свою очередь, связана со слабостью гравитации, что и задает связь между двумя большими числами.) Таким образом, совпадение автоматически обеспечивается в эпоху, когда могут существовать наблюдатели, и не требуется постулировать никакого ослабления гравитации. Точные астрономические измерения позднее показали, что сила гравитации остается постоянной с очень высокой точностью. Если и есть изменения, они должны быть меньше, чем 1 к 10¹¹ в год, — гораздо меньше, чем требует гипотеза Дирака.

- vi N. Bostrom, *Anthropic Bias* (Ник Бостром, “Антропный уклон”), Routledge, New York, 2002.
- vii Цитируется по: A.L. Macay, *A Dictionary of Scientific Quotations* (А.Л. Макей, “Словарь научных цитат”), Institute of Physics Publishing, Bristol, 1991, p. 244.
- viii Дэвид Гросс (David Gross), цитируется по статье Денниса Овербая “Мириады вселенных? Или нашей повезло?” в газете “Нью-Йорк Таймс” (Dennis Overbye “Zillions of universes? Or did ours get lucky?”, *The New York Times*, October 28, 2003).
- ix Пол Стейнхардт (Paul Steinhardt), цитируется по статье “Холодный прием” Маркуса Чоуна (Marcus Chown, “Out in the cold”, *New Scientist*, June 10, 2000).

Глава 14. Заурядность, возведенная в принцип

- i Аргумент судного дня — захватывающий и противоречивый предмет. Более глубоко он обсуждается в книгах Джона Лесли “Конец света” (John Leslie, *The End of the World*, Routledge, London, 1996) и Ричарда Готта “Путешествия во времени в эйнштейновской вселенной” (Richard Gott, *Time Travel in Einstein's Universe*, Houghton Mifflin Company, Boston, 2001).
- ii В бесконечной вселенной коэффициент объема можно определить как долю, занятую областями данного типа. Но это определение приводит к неоднозначности. Чтобы проиллюстрировать природу проблемы, зададимся вопросом: какова доля нечетных чисел среди целых? Четные и нечетные числа чередуются в последовательности 1, 2, 3, 4, 5, ..., и можно подумать, что ответом, очевидно, будет половина. Однако целые числа можно упорядочить другим способом. Например, так: 1, 2, 4, 3, 6, 8, Эта последовательность по-прежнему включает все целые числа, но теперь за каждым нечетным числом следует два четных, и кажется, что только треть целых чисел являются нечетными. Такого же рода неопределенность возникает при вычислении объемного коэффициента в моделях вечной инфляции. Чтобы справиться с этой проблемой, был предложен ряд интересных идей, но пока она остается неразрешенной.
- iii Это, конечно, чрезмерное упрощение. Галактики бывают разных раз-

меров — от карликовых до гигантских, с весьма различным числом звезд, а значит, и наблюдателей. Тем не менее абсолютное большинство звезд находится в гигантских галактиках, подобных нашей. Так что задачу можно решить, подсчитывая только такие галактики и не обращая внимания на остальные.

Более серьезная проблема связана с тем, что плотность вещества и другие характеристики галактик могут меняться из-за вариаций бионейтральных констант. Например, если параметр плотности возмущений Q делается больше, галактики образуются раньше и имеют более высокую плотность вещества. Как результат, тесные сближения звезд, нарушающие орбиты планет и уничтожающие жизнь, становятся чаще. (На это указали Макс Тегмарк (Max Tegmark) и Мартин Рис в статье, опубликованной в 1998 году в *Astrophysical Journal*). Даже если сближения не настолько тесны, чтобы влиять на планеты, они могут возмущать облака комет на окраинах звездных систем, посылая смертельные кометные дожди на внутренние планеты. Еще одна опасность в более плотных галактиках — это потенциально опустошительное воздействие близких взрывов сверхновых. Количественно оценить влияние всех этих факторов на плотность обитаемых звездных систем — крайне сложная, хотя в принципе разрешимая задача. Но пока в этом деле трудно пойти дальше порядковых оценок.

- iv A. Vilenkin, "Predictions from quantum cosmology" (А. Виленкин, "Предсказания квантовой космологии"), *Physical Review Letters*, vol. 74, p. 846, 1995.
- v Подход Эфстатию несколько отличался от моего. Он предполагал, что мы типичны только среди ныне существующих наблюдателей (галактик), тогда как я считал нужным учитывать всех наблюдателей — современных, прошлых и будущих. Если мы действительно типичны и живем в ту же эпоху, что и большинство наблюдателей, эти методы должны давать сходные результаты, как фактически и получается. Но в общем случае выбор референтного класса наблюдателей, в котором мы ожидаем оказаться типичными, — это важный вопрос. Он подробно обсуждался философом Ником Бостромом.
- vi На самом деле мощность сверхновых типа Ia несколько варьируется, вероятно, из-за различий в химическом составе белых карликов. Но эти вариации можно учесть, измеряя длительность вспышки: зависимость мощности от длительности хорошо изучена.

- vii Доплеровское смещение — это изменение частоты электромагнитных волн при движении источника и приемника волн друг относительно друга. Если вы приближаетесь к источнику света, частота волн увеличивается, подобно тому как лодка встречает больше волн, когда движется им навстречу. Такой же эффект имеет место, когда источник света приближается к неподвижному наблюдателю: важно только их относительное движение. Подобным же образом частота света, испускаемого галактикой, становится ниже (свет смещается к красному концу спектра), когда она удаляется от наблюдателя.
- viii Цит. по R. Krishner, *The Extravagant Universe* (Р. Кришнер, “Экстравагантная Вселенная”), University Press, Princeton, 2002, p. 221.
- ix Возможность благодаря космологической постоянной избавиться от несоответствия возрастов старейших звезд и Вселенной отмечал еще в 1980-х годах Жерар де Вокулер (Gerard de Vaucouleurs). Позднее на это наряду с другими потенциальными преимуществами указывали Лоуренс Краусс (Lawrence Krauss) и Майкл Тернер (Michael Turner) в статье “Космологическая постоянная возвращается” (“The cosmological constant is back”, *General Relativity and Gravitation*, vol. 27, p. 1137, 1995).
- x Популярный обзор идеи квинтэссенции содержится в книге Лоуренса Краусса “Квинтэссенция: Загадка недостающей массы” (Lawrence Krauss, *Quintessence: The Mystery of the Missing Mass*, Basic Books, New York, 2000).
- xi Другое затруднение модели квинтэссенции состоит в том, что плоское подножие холма, как считается, лежит на нулевом уровне плотности энергии. Это эквивалентно предположению о том, что энергии флуктуирующих фермионов и бозонов чудесным образом компенсируют друг друга (см. главу 12).
- xii По-видимому, мы не случайно обитаем в диске гигантской галактики. Образование галактик — это иерархический процесс, в ходе которого небольшого размера плотные объекты сливаются, формируя более крупные и рыхлые. Ранние плотные галактики меньше подходили для жизни по причинам, отмеченным в примечании ii.
- xiii Такое объяснение совпадения приведено в статье, написанной мной совместно с Хауме Гарригой и Марио Ливьо (Mario Livio) “Космологическая постоянная и время ее доминирования” (*Physical Review*,

vol. D61, p. 023503, 2000). Независимо эта идея была предложена Сиднеем Бладменом (Sidney Bludman) в *Nuclear Physics*, vol. A663, p. 865, 2000.

ГЛАВА 15. Теория Всего

- i Цит. по книге Найджела Калдера, “Ключ ко Вселенной” (Nigel Calder, *The Key to the Universe*, Penguin Books, New York, 1977, p. 69).
- ii В 1970–1980-х годах физики пытались достичь более единообразного описания частиц и их взаимодействий в рамках так называемых теорий Великого объединения. Первая модель этого типа была предложена Говардом Джорджи (Howard Georgi) и Шелдоном Глэшоу из Гарварда, которые показали, что всю Стандартную модель вместе с ее отдельными симметриями для сильного и электрослабого взаимодействий можно элегантно вписать в теорию, которая имеет одну, но более мощную симметрию. Более того, эта модель дала единое описание для трех фундаментальных взаимодействий. Великое объединение — очень привлекательная идея, и многие физики верят, что она сохранится как часть окончательной теории. Однако в теории Великого объединения сохраняются почти все недостатки Стандартной модели. В частности, она требует еще большего числа подстраиваемых параметров, а гравитация по-прежнему остается за бортом.
- iii Широкий круг вопросов, касающихся существования (или несуществования) окончательной теории, обсуждается в книге Стивена Вайнберга “Мечты об окончательной теории” (Steven Weinberg, *Dreams of a Final Theory*, Vintage, New York, 1994).
- iv Космология дает интересную возможность наблюдательной проверки теории струн. В результате высокоэнергетических процессов в конце инфляции могли образоваться струны астрономического размера. Подобно “обычным” космическим струнам (см. главу 6) эти фундаментальные струны будут впоследствии доступны для наблюдения. Струны не испускают света и потому непосредственно не видны, но их присутствие может быть обнаружено по гравитационным эффектам. Световые лучи далеких галактик, расположенных позади длинной струны, искривляются ее притяжением, и мы можем видеть по соседству два изображения галактики, образованных лучами,

прошедшими с двух сторон от струны. Колеблющиеся струнные петли служат мощными источниками гравитационных волн. Существующие и перспективные детекторы гравитационных волн будут искать характерные для них сигналы.

- v Недавние работы Наймы Аркани-Хамеда (Nima Arkani-Hamed) из Гарварда, Гии Двали (Gia Dvali) из Нью-Йоркского университета и Саваса Димипоулоса (Savas Dimopoulos) из Стэнфорда говорят о том, что компактные измерения могут быть гораздо больше, чем считалось прежде. В этом случае размеры вибрирующих струнных петель также значительно возрастают. Это означает, что следующее поколение ускорителей может оказаться достаточно мощным, чтобы открыть “струнную” природу частиц.
- vi Яркое изложение этой философии, а также более подробное описание теории струн можно найти в книге Брайана Грина “Элегантная Вселенная” (Brian Greene, *The Elegant Universe*, Vintage Books, New York, 2000).
- vii В присутствии бран струны могут образовывать замкнутые петли, но могут также быть и открытыми, с концами, присоединенными к бранам. Такие открытые сегменты струн могут двигаться вдоль бран, но никогда их не покидают. Браны играют центральную роль в так называемом “мире бран” — космологической модели, которая предполагает, что мы живем на трехмерной бране, плавающей в многомерном пространстве. Знакомые нам частицы, такие как электроны и кварки, представляются тогда открытыми струнами, концы которых присоединены к нашей бране.
- viii Пространственно-временная структура расширяющихся пузырьков напоминает островные вселенные, описанные в главе 10. Пузырьки конечны, когда рассматриваются снаружи, но изнутри каждый пузырек выглядит самодостаточной бесконечной вселенной. Вечная инфляция с пузырьками островных вселенных упомянута Ричардом Готтом в 1982 году, а более реалистичная ее модель обсуждалась в 1983 году Полом Стейнхардтом.
- ix Цит. по статье Davide Castelvecchi, “The growth of inflation” (“Рост инфляции”), *Free Republic*, December 2004.
- x Интервью с Джоном Брокманом (John Brockman), *Edge*, 2003.
- xi Там же.

ГЛАВА 16. Было ли у Вселенной начало?

- i Интересные параллели между древними мифами и современной космологией обсуждаются в книге Марчело Глизера “Танцующая Вселенная: от мифов о творении до Большого взрыва” (Marcelo Gleiser, *The Dancing Universe: From Creation Myths to the Big Bang*, Dutton, New York, 1997).
- ii Эта же критика применима к идее Вселенной, рождающейся из хаоса, как в модели хаотической инфляции. Этот момент обыгрывается в “шутке”, приводимой в книге Тимоти Ферриса “Целая история” (Timothy Ferris, *The Whole Shebang*, Simon & Schuster, New York, 1997). Атеист заявляет, что мир появился из хаоса, на что верующий отвечает: “Но кто же навел этот хаос?”
- iii Для реализации этого сценария Стейнхардт и Турок ввели скалярное поле с тщательно подобранным энергетическим ландшафтом. Космологи обычно скептически относятся к их модели, поскольку этот ландшафт выглядит довольно искусственно. Кроме того, значение плотности энергии вакуума, которое играет ключевую роль в этой модели, просто устанавливается “руками” без всякого объяснения, почему оно столь мало или почему оно доминирует во Вселенной в эпоху формирования галактик.
- iv Этот метод доказательства неполноты пространства-времени путем демонстрации того, что определенные истории имеют конечную длительность в прошлом или будущем, восходит к работам Хокинга и Пенроуза 1960–70-х годов.
- v Один из способов обойти вывод данной теоремы — допустить, что по мере движения назад во времени темп расширения все замедляется и замедляется и в бесконечном прошлом вселенная становится статической. Но тогда вселенная должна была бы оставаться статической в течение бесконечного времени и достигла бы термодинамического равновесия.
- vi Другая интересная попытка избавиться от начала Вселенной принята в 1998 году в статье принстонских ученых Дж. Ричарда Готта и Ли-Синь Ли “Может ли Вселенная создать саму себя?” (J. Richard Gott, Li-Xin Li, “Can the universe create, itself?”, *Physical Review D*,

vol. 58, p. 023501.) Готт и Ли предположили, что при движении в прошлое мы попадаем во временную петлю, прокручивая снова и снова одни и те же события. Эйнштейновская теория относительности действительно в принципе допускает существование временных петель. (Увлекательное обсуждение этого см. в отличной книге Ричарда Готта “Путешествия во времени в эйнштейновской вселенной”.) Однако, как отмечают сами Готт и Ли, вдобавок к историям, закрученным в петлю, придуманное ими пространство-время с необходимостью содержит некоторые неполные истории, подобные истории космического путешественника, обсуждаемой в основном тексте. Это означает, что само пространство-время неполно в прошлом, а значит, не обеспечивает удовлетворительной модели для вселенной, не имеющей начала.

- vii A. Borde, A.H. Guth, A. Vilenkin, “Inflationary spacetimes are not past-complete” (“Инфляционное пространство-время не является полным в прошлом”), *Physical Review Letters*, vol. 90, p. 151301 (2003).
- viii E.A. Milne, *Modern Cosmology and the Christian Idea of God* (“Современная космология и христианская идея Бога”), Clarendon, Oxford, 1952.
- ix Pope Pius XII, Address to the Pontifical Academy of Sciences, November 1951; перевод на англ. в P.J. McLaughlin, *The Church and Modern Science* (“Церковь и современная наука”), Philosophical Library, New York (1957). Не все духовенство разделяло энтузиазм папы. В частности, Жорж Леметр, который был одновременно католическим священником и знаменитым космологом, считал, что религия должна ограничиться духовным миром, оставив материальный науке. Леметр даже пытался отговорить папу от одобрения Большого взрыва. Похоже, что позднее папа изменил свое мнение. Ни он сам, ни его последователи больше не предпринимали попыток прямой научной верификации религии.

Глава 17. Сотворение вселенных из ничего

- i A. Vilenkin, “Creation of universes from nothing” (“Создание вселенных из ничего”), *Physics Letters*, vol. 117B, p. 25, 1982. Позднее я узнал, что возможность спонтанного зарождения Вселенной из ничего обсужда-

лась примерно годом раньше Леонидом Грищуком и Яковом Зельдовичем в Московском государственном университете. Однако они не предложили никакого математического описания процесса зарождения.

- ii Примерно в то же время идею, очень похожую на трайоновскую, высказал Петр Фомин из Харьковского государственного университета на Украине. Фактически последовательность шагов, показанная на рис. 17.3, не была четко изложена Трайоном и впервые появилась именно в статье Фомина. К сожалению, Фомин не смог найти журнал, который опубликовал бы его работу. В итоге он напечатал ее в малоизвестном украинском физическом журнале.
- iii Е.Р. Tryon, "Is the universe a vacuum fluctuation?" ("Является ли Вселенная вакуумной флуктуацией?"), *Nature*, vol. 246, p. 396, 1973.
- iv В конце 1970-х и начале 1980-х было предпринято несколько попыток разработки математических моделей квантового творения из вакуума. Ричард Броут (Richard Brout), Франсуа Энглер (Francois Englert) и Эдгар Гунциг (Edgard Gunzig) из Брюссельского университета предположили в 1978 году, что в вакууме может спонтанно возникнуть сверхтяжелая частица с массой в 1020 раз больше, чем у протона. Такая частица искривила бы пространство, растущая кривизна запустила дальнейшее рождение частиц, и процесс стал бы распространяться все дальше и дальше, как расширяющийся пузырь. Внутри пузыря тяжелые частицы будут быстро распадаться на более легкие и излучение, заполняя материей расширяющуюся вселенную. Эта модель сталкивается с той же проблемой, что и сценарий Трайона: в действительности она не объясняет происхождение Вселенной. Если пустое плоское пространство действительно настолько неустойчиво, оно быстро заполнилось бы растущими пузырями. Такое нестабильное пространство не могло бы существовать вечно, а значит, не могло бы служить начальной точкой творения.

Дэвид Аткац (David Atkatz) и Хайнц Пейджелс (Heinz Pagels) из Рокфеллеровского университета в статье, написанной в 1982 году, предположили, что перед Большим взрывом Вселенная существовала в форме своеобразного "космического яйца" — маленького сферического пространства, заполненного необычной высокоэнергичной материей. Они построили модель, в которой "яйцо" было классически стабильным, но могло туннелировать в состояние с большим радиу-

сом и расширяться. (Насколько я знаю, это было первое упоминание о квантовом туннелировании вселенной как целого.) И вновь проблема в том, что нестабильное “яйцо” не могло существовать вечно, следовательно, оставалась проблема, откуда оно взялось.

- v A.H. Guth, *The Inflationary Universe* (“Инфляционная Вселенная”), Addison-Wesley, Reading, 1997, p. 273.
- vi St. Augustine, *Confessions* (Святой Августин, “Исповедь”), Sheed and Ward, NY, 1948.
- vii A. Vilenkin, “Quantum origin of the universe” (“Квантовое происхождение Вселенной”), *Nuclear Physics*, vol. B252, p. 141, 1985.
- viii Я благодарен Эрнану Макмаллину (Ernan McMullin) который обратил мое внимание на важность требования, что вселенные ансамбля должны существовать реально, а не быть только возможными вселенными.
- ix J.B. Hartle, S.W. Hawking, “The wave function of the universe” (“Волновая функция Вселенной”), *Physical Review*, vol. D28, p. 2960, 1983. Хокинг наметил основную идею этой работы примерно годом раньше в сб. “Астрофизическая космология: доклады недели космологии и фундаментальной физики” (*Astrophysical Cosmology: Proceedings of the Study Week on Cosmology and Fundamental Physics*, edited by H.A. Bruck, G.V. Coyne, and M.S. Longair, Pontifica Academia, Vatican, 1982), но тогда он не раскрыл никаких математических подробностей.
- x Познакомиться с предположением об отсутствии границ можно в бестселлере Хокинга “Краткая история времени”, Амфора, 2003. (Hawking S., *A Brief History of Time*, Bantam, New York, 1988, p. 136). (О современном состоянии этих идей рассказывается в новой научно-популярной книге Хокинга “Мир в ореховой скорлупке”, Амфора, 2007. — *Примеч. перев.*).
- xi Следует сделать оговорку, что ландшафт теории струн состоит из нескольких не связанных доменов и пузыри из одного домена не могут зарождаться в другом. В таком случае пузыри, возникающие в ходе бесконечной инфляции, будут содержать только вакуумы, принадлежащие тому же домену, что и первоначальный вакуум, заполнявший вселенную в момент ее возникновения. В этом случае природа мультиверса будет зависеть от начального состояния, и проверка квантовой космологии становится принципиально возможной.

ГЛАВА 18. Конец света

- i Физические процессы в отдаленном будущем Вселенной среди прочих анализировали Мартин Рис и Дон Пейдж (Don Page). Популярный обзор дан в книге Пола Дэвиса “Последние три минуты: догадки о конечной судьбе Вселенной” (Paul Davies, *The last three minutes: conjectures about the ultimate fate of the universe*, Basic Books, New York, 1994).
- ii Этот сценарий основан на анализе К. Нейджамайна и А. Лоэба в статье “Будущая эволюция окружающей крупномасштабной структуры во Вселенной с доминирующей космологической постоянной” (Nagamine K., Loeb A., “Future evolution of nearby large-scale structure in a universe dominated by a cosmological constant”, *New Astronomy*, vol. 8, p. 439, 2003).
- iii Предсказание о том, что местная область Вселенной подвергнется коллапсу и большому сжатию, сделано в статье “Проверяемые антропные предсказания для темной энергии”, написанной мною с Хаме Гарригой (“Testable anthropic predictions for dark energy”, *Physical Review*, vol. D67, p. 043503, 2003). Мы отмечали, однако, что это предсказание вряд ли удастся проверить в обозримое время.

ГЛАВА 19. Огонь в уравнениях

- i Alan L. Mackay, *A Dictionary of Scientific Quotations* (“Словарь научных цитат”), Institute of Physics Publishing, Bristol, 1991.
- ii P.A.M. Dirac, “The evolution of the physicist’s picture of nature” (“Эволюция физической картины мира”), *Scientific American*, May 1963.
- iii Интересную дискуссию о красоте научных теорий можно найти в книге Марис Ливио “Ускоряющаяся Вселенная: бесконечное расширение, космологическая константа и красота космоса” (Mario Livio, *The Accelerating Universe: Infinite Expansion, the Cosmological Constant, and the Beauty of the Cosmos*, Wiley, New York, 2000).
- iv M. Tegmark, “Parallel universes” (“Параллельные вселенные”), *Scientific American*, May 2003.
- v Тегмарк не делает различий между математическими структурами и вселенными, которые они описывают. Он полагает, что математичес-

кие уравнения описывают все аспекты физического мира, так что каждый физический объект отвечает определенной сущности платоновского мира математических структур и наоборот. В этом смысле два мира эквивалентны друг другу, и, согласно Тегмарку, наша собственная Вселенная *есть* математическая структура.

- vi Чтобы справиться с этой проблемой, Тегмарк предполагает, что не все математические структуры равноценны; им можно назначить разные “веса”. Если веса быстро убывают с нарастанием сложности, то наиболее вероятными могут оказаться простейшие структуры, которые все же способны содержать наблюдателей. Это введение весов может разрешить проблему сложности, но тогда мы встаем перед вопросом: кто определяет веса? Должны ли мы вернуть из изгнания Творца? Или нам следует еще больше расширить ансамбль, чтобы включить все возможные назначения весов? Я даже не уверен, что представление о весах на множестве всех математических структур логически не противоречиво: оно похоже на введение дополнительной математической структуры, но все они, как предполагается, уже включены в рассматриваемое множество.

ИМЕННОЙ И ПРЕДМЕТНО- ТЕМАТИЧЕСКИЙ УКАЗАТЕЛЬ

Алхимия 51, 52
Альфа, Центавра 130, 131
Альфер Ральф 53, 57, 58, 59
Альфонс Мудрый, король Касти-
лии 265
Андреас, Олбрехт 87, 90,
аннигиляция пар 50
Анрух, Билл 257
антигравитация 20, 21, 70, 73,
104, 105, 106
антикварки 51
античастицы 50, 51, 207
антропная селекция
 космологическая постоянная
 и 187
 предсказания, вытекающие
 из 188, 190, 195
 теория струн и 220, 221, 222
аргумент "судного дня" 192, 286
Аристотель 24, 25
Архимед 268
Astrophysical Journal (журнал) 287

Атказ, Дэвид 293
атомные ядра
 образование 18
 последствия разогрева 48
атомы
 образование 51, 57
 см. также атомные ядра

бактерия, воспроизводство 112
Бардин, Джим 90
Барроу, Джон 284
Барселонский университет 141
Бекенштейн, Якоб 148
Bell Telephone Laboratories 58
белые карлики 197, 198, 259, 287
Бете, Ганс 52
Бладмен, Сидней 289
Блаженный Августин 248, 249
Бог
 и сценарий космического яй-
 ца 225, 226, 293, 294
 как математик 267-269

- Бозе, Шатъендранат 167
 бозоны 167, 183, 213, 284, 288
 Больцман, Людвиг 39
 “большое схлопывание” 34, 41
 Большой взрыв
 послесвечение 12, 125
 образовавшиеся элементы 53, 54, 56
 решения Фридмана для уравнений Эйнштейна 35, 36, 37, 41, 50
 инфляционная Вселенная 66, 110, 116, 237, 244, 254
 космическое излучение 18, 57, 58, 60, 62, 63, 66, 67, 124, 125
 отталкивающая гравитация 19, 20, 21, 31, 32, 42, 70, 73, 97, 103, 106, 122
 Бонди, Герман 42
 Бор, Нильс 14, 45, 47, 157, 213
 Борд, Эрвинд 231, 232
 Бостром, Ник 181, 286, 287
 Брандрит, Дж. 155
 браны 216, 217, 218, 242, 290
 Брут, Роберт 96
 Брюссельский Свободный университет 293
 Буссо, Рафаэль 218, 220, 221
 Буш, Джордж 154
 Бэбсон, Роджер У. 103, 104, 105, 106
- Вайнберг, Стивен 59, 185, 186, 187, 195, 208, 278
 Вакуум
 распад 73, 76, 78, 79, 81, 112, 114, 263
 создание вещества из 42, 246, 293
- теории струн, в 215-220, 221, 278
 тяготение 31, 73
 флуктуации 164, 168, 202, 245, 246, 247, 283, 293
см. также ложный вакуум
- Ванчури, Виталий 106
 Великая депрессия 104
 Великого объединения, вакуум 72, 76, 110, 166, 241
 Великого объединения, теория 87, 289
 вечная инфляция
 варианты конца Вселенной 258, 261, 263, 264
 компьютерное моделирование 116, 117, 118
 необходимость начала 227-229
 островные вселенные 113, 117, 118, 129, 13-139, 156, 227, 229, 230, 271-273, 290
 параллельные вселенные 156-158, 249, 295
 теория струн и 218-220
- Вигнер, Юджин 267
 видимый свет 48, 56, 57
 Вильсон, Роберт 58-60
 Виноцкий, Сергей 117
 Виттен, Эдвард 222
 водород 51, 52, 53, 55, 56, 73, 175, 176, 186
 возмущения плотности
 параметр Q 287
 расчет 89, 90, 92, 93
- Вокулер, Жерар де 288
 время
 евклидово 242, 243, 244, 253, 254
 см. также пространство-время

- Галилей, Галилео 24, 25
 гамма-лучи 56, 57,
 Гамов, Георгий 26, 44-47, 51-54,
 56, 57, 59, 60, 95, 239, 277
 Гамова, Любовь 46
 Гарвардский университет 17, 74,
 103, 255, 289
 Гаррига, Хауме 140-142, 288, 295
 Гейзенберг, Вернер 146, 147
 гелий 51, 52, 53, 54, 55, 56, 114,
 176, 277
 Гелл-Манн, Мюррей 151, 208
 Гельмгольц, Герман фон 38, 39,
 276
 Геттингенский университет 45
 гигантские галактики 202, 262,
 267, 287, 288
 Глизер, Марчело 291
 Глинер, Эраст 96
 Глэшоу, Шелдон 208, 289
 глюоны 208, 212
 Голд, Томас 42
 Гор, Эл 154
 горизонт Вселенной 13, 40, 67, 68
 Готт, Ричард 192, 286, 291, 292
 гравитация
 квантовая 209, 210, 211, 213,
 244
 нестабильность 21
 ньютоновская теория 27
 отталкивающая, см. отталки-
 вающая гравитация
 сила взаимодействия 173, 176,
 177
 скорость космологического
 расширения и 20, 21, 36, 68,
 74, 76, 77, 122, 126, 198, 262,
 276
 темной материи 64, 122
 в теории струн 31, 73, 97, 106,
 123, 229, 238, 276
 гравитоны 210, 212, 213
 Грассман, Герман 167
 грассмановы числа 167, 168
 Грин, Брайан 290
 Грин, Майкл 213
 Гриффитс, Роберт 151
 Грищук, Леонид 293
 Гросс, Дэвид 221, 286
 Группа по сверхновым с больши-
 ми красными смещениями (High-
 Z Supernova Search Team) 280
 гугол 75, 76, 148, 167, 168, 184,
 186, 218, 220, 260, 264
 гуголплекс 152, 153
 Гунциг, Эдгар 293
 Гут, Алан 17-21, 70, 73, 74, 75, 77,
 80, 89, 90, 91, 92, 93, 95, 96, 103,
 107, 113, 114, 115, 121, 219, 231,
 232, 234, 247, 275, 278, 281
 Дали, Сальвадор 144, 154
 Дамур, Тибо 189
 Дарвин, Чарльз 96
 Двали, Гия 290
 движение
 по инерции 25, 231, 232
 планет 27, 268
 двухщелевой эксперимент 150, 151
 де Ситтер, Виллем 229, 276
 дейтерий 176
 Джинасена 226
 Джорджа Вашингтона, Универси-
 тет 47
 Джорджи, Говард 289
 Дикке, Роберт 59, 179, 180, 285

Димипоулос, Савас 290

Дирак, Поль 202, 207, 268, 285

ДНК 172

Дойч, Дэвид 282

доплеровское смещение 122, 198, 288

Дэвис, Пол 295

$E = mc^2$ 20, 24, 50

евклидова геометрия 36, 121, 206, 270

евклидово время 242, 243, 244, 253, 254

Европейский центр ядерных исследований (ЦЕРН) 208

Ешива-Университет 213

железо 55, 176

закрытая модель вселенной 31, 36, 37

зарождение пузырьков 219, 222, 242

заурядности, принцип 161, 192, 193, 195, 196, 200, 202, 220-222, 270, 283, 286

Звезды

возраст 200, 285, 288

массы 177

образование 61, 129, 131

образование элементов 52, 53, 54, 55, 56, 179

смерть 39, 55, 128, 259, 260, 261, 277, 285

темная материя 122

звуковые волны 71

Зельдович, Яков 255

Земля

бесконечные двойники 11, 12, 153, 154, 155, 160, 266

магнитное поле 81, 164

развитие разумной жизни 177

человеческое население 160, 192, 272, 274

золото 52

Зоммерфельд, Арнольд 28, 275

измерения, дополнительные 214, 215, 216, 217, 218, 242

изящного выхода, проблема 78, 80, 87, 88, 96

индуизм 225, 226, 227

Институт им. П.Н. Лебедева 93

интерференция, квантовая 151

инфлатон 183

инфляция

возмущения плотности 88, 90, 92, 93, 94, 107, 108, 124, 145, 194, 281, 287

вечная, см. вечная инфляция
квантовые флуктуации 244, 245, 261

отталкивающая гравитация 185, 31, 73, 97, 106, 123, 229, 238, 276

проблема изящного выхода 78, 80, 87, 88, 96

туннелирование и 45, 82, 239, 241, 242, 243, 247, 249, 254, 272, 273, 294

успех теории 95, 96, 124

хаотическая 118-120, 280, 291

Казимир, Хендрик 283

калибровочная симметрия 168

Калифорнийский университет
 Беркли, в 218
 Санта-Барбаре, в 251
 карликовые галактики 262, 263,
 267, 287
 карманные вселенные, *см.* ост-
 ровные вселенные
 Карр, Бернард 284
 Картер, Брэндон 178, 180, 181,
 192, 285
 Кац, Виктор 268
 квантовая теория
 вакуума 163, 164, 247, 263, 293
 вероятности, в 49, 83, 157, 249,
 251
 гравитация, в 209, 210, 211,
 213, 244
 истории, в 148, 149, 151, 152
 неопределенность в 49, 146,
 149, 157, 277
 параллельные вселенные, в
 152, 153, 156, 157
 туннелирование, в, *см.* тунне-
 лирование, квантовое
 QUIET обсерватория 126, 281
 кварки
 массы 50, 175
 теории струн, в 211, 290
 квартернионы 270
 квинтэссенции, модель 201, 288
 Кембриджский университет 42,
 87, 256
 Кеплер, Иоганн 40, 268
 кикспэн 110, 111
 Киршнер, Роберт 280
 кислород 176
 Клинтон, Билл 156, 282
 Книга рекордов Гиннеса 189

колоколообразная кривая 188,
 190, 191, 203
 коммунистическая партия, Фран-
 цузская 47
 компактификация 214, 215, 216
 конференция по общей теории
 относительности и гравитации
 (Падуа, 1983) 251, 252, 253
 копенгагенская интерпретация
 157, 158, 249, 250
 Коперник, Николай 160
 королевы Марии, Колледж 213
 Космического телескопа,
 Институт 199
 космическое яйцо 225, 226, 293,
 294
 COSMO-98 конференция
 (Монтерей) 256
 космологическая постоянная
 антропная селекция и 187, 201
 принцип заурядности 161, 192,
 193, 195, 196, 200, 202, 220,
 222, 283
 ускоренное расширение и
 199, 200
 Эйнштейн и 30, 31, 34, 123,
 258
 Коулман, Сидней 80, 116, 281
 красное смещение 57, 122, 198,
 280, 288
 Краусс, Лоуренс 288
 крах фондового рынка 104
 кривизна пространства-времени
 26, 28, 244, 279
 кротовые норы 98, 256
 крупнозернистое описание 147,
 151, 152
 Круктов, Юрий 276

Кулон, Шарль Огюстен де 209
Кюри, Мария 47

Ландау, Лев 90, 91, 190, 279

Ланжевен, Поль 47

Леметр, Жорж 30, 37, 292

Лесли, Джон 192, 286

Ли, Ли-Синь 291

Ливио, Марио 288, 295

Линде, Андрей 84, 85, 86, 87, 90,
96, 117, 118, 119, 120, 129, 182, 183,
185, 220, 255, 263, 280, 281

литий 53, 54, 176

логарифмы натуральные 269

ложный вакуум

островные вселенные 113, 117,
118, 129, 13-139, 156, 227, 229,
230, 271-273, 290

отталкивающая гравитация
31, 73, 97, 106, 123, 229, 238,
276

параллельных вселенных, в
156-158, 249, 295

плотность энергии 126, 182,
183, 184, 185, 200, 201, 217
распад 73, 76, 78, 79, 81, 112,
114, 263

струны из 92

туннелирование и 45, 82, 239,
241, 242, 243, 247, 249, 254,
272, 273, 294

“хаотической” инфляции, в
118, 119, 120, 280, 291

Лозб, А. 295

Лу Герига, болезнь 91

Луна 125, 177

Людвига-Максимилиана, Универ-
ситет 93, 96

Маккарти, Кэтрин 249

Макмаллин, Эрнан 294

марксизм-ленинизм 46

Мартел, Хьюго 196

Массачусетский технологический
институт (МТИ) 75, 77, 269

математика (и природа) 267-273

маятника, динамика 45

Международный конгресс по
ядерной физике (Рим, 1930) 45,
46

Мейер, Джин 105

Менделеев, Дмитрий 206, 207

Мермин, Дэвид 282

Местная Группа галактик 262

Милн, Эдвард 235

Минковский, Герман 25

Млечный Путь, галактика 107, 153,
262

мнимые числа 242, 269

Московский государственный
университет 293

Мохаммед, Гал 189

Мукунда, Арьял 116, 117

мультиверса, гипотеза 178-180,
203, 204, 284

Муханов, Слава 85, 93, 199, 279

мюоны 51, 207

Найма, Аркани-Хамед 290

Намбу, Ёитиро 213

наносекунда 164, 245

Nature (журнал) 192, 193, 246,
284, 293

натяжение 30, 31, 73, 74, 97, 98,
211, 247, 279

Наффилдовский симпозиум (Кем-
бридж, 1982) 87-95, 279

- Нееман, Ювал 208
 Нейджамайн, К. 295
 нейтрино 71, 72, 174, 176, 194, 260
 нейтрона масса 172, 173, 174, 175
 нейтронные звезды 259, 277
 неопределенность, квантовая 49, 146, 149, 157, 277
 Нернст, Вальтер 235
 неустойчивость, гравитационная 61
New Scientist (журнал) 154, 286
 Нильса Бора, Институт 213
 Нильсен, Холгер 213
 Нобелевская премия 53, 58, 59, 60, 90, 155, 182, 208, 221, 235
 Ноуб, Джошуа 283
 ночного неба, парадокс 40
 нуклонов распад 48, 260, 261
 Нью-Йоркский университет 244, 290
 Ньютон, Исаак 27, 28, 104, 270

 обратных квадратов, закон 28
 общая теория относительности, см. теория относительности, общая
 объединенная теория, см. окончательная теория всего
 окончательная теория всего
 гравитация 210, 211
 математика 267-269
 см. также теория струн
 Олам, Кен 106, 283
 омега, параметр 260
 Омнэ, Ролан 151
 О-регионы
 истории 145, 148, 151, 152, 153
 возможные состояния 145, 148, 153, 154, 155

 островные вселенные
 компьютерное моделирование 116-118
 границы 98, 117, 129, 131, 133, 136, 137, 138, 271
 отталкивающая гравитация
 антропная селекция и 185
 ложного вакуума 31, 73, 97, 106, 123, 229, 238, 276

 Папская академия наук 235
 параллельные вселенные 156-158, 249, 295
 Пейдж, Дон 295
 Пейджелс, Хайнц 293
 Пензиас, Арно 58-60
 Пенроуз, Роджер 42, 291
 периодическая таблица 206, 207, 208
 Перлмуттер, Сол 199, 280
 Перри, Малколм 244
 Петроградский университет 33
 Пи, Со-Янг 89,
 Пий XII, папа 235
 Пифагор 267
 планеты
 движение 27, 268
 образование 170
 "Планк", спутник 126
 Планк, Макс 60, 126
 планковская длина 165, 166, 210, 211, 215, 245, 249, 250
 Платон 23
 позитроны
 аннигиляция в фотоны 50, 51, 175, 260
 виртуальные 245

Полчински, Джозеф 196, 218, 220, 221
 поляризация 126
 Поппер, Карл 180
 “Порт-Альгеро (Кадакес)” (Дали) 144
 последнее рассеяние 63, 68
 Принстонский университет 58, 63, 157, 244
 принцип неопределенности Гейзенберга 146, 245
 проблема совпадения 169, 170
 проблема тепловой смерти 39, 228, 233
 Проект по сверхновым в космологии (Supernova Cosmology Project) 198, 199, 280
 пространственно-временная пена 165, 166, 210
 пространство-время де Ситтера 229, 230, 231, 239
 пространство-время
 вечно инфлирующее, см. вечная инфляция
 квантовые флуктуации 244, 245, 261
 кривизна 26, 28, 244, 279
 сингулярности 35, 36, 37, 41, 42, 68, 90, 238, 239, 240, 244
 Протоны
 в водородных ядрах 53
 масса 293, 172, 173, 174, 175
 Птолемей 265
 пятинуклонный провал 53, 55
 Раби, Исидор 157
 радиоактивность 45, 52, 83, 241
 радиоастрономия 58

радиоволны 57, 61
 Райесс, Адам 199
 Райл, Мартин 277
 Резерфорд, Эрнест 206
 рентгеновские лучи 56, 57
 Римская католическая церковь 235, 292
 Рис, Мартин 56, 178, 180, 284, 287, 295
 Розенфельд, Леон 44
 Рокфеллеровский университет 293
 Рубаков, Валерий 255
 Сайдинг Спрингс, обсерватория 280
 Салам, Абдус 208
 Сасскинд, Леонард 148, 213, 221, 222
 Сато, Кацухико 96
 Сахаров, Андрей 155
 сверхновые 55, 122, 176, 179, 187, 197, 198, 199, 280, 287
 сверхпроводимость 156
 свет
 далеких галактик 12, 62, 289
 доплеровское смещение 122, 198, 288
 квантовая природа 146, 147, 149
 скорость 20, 23, 24, 57, 67, 72, 80, 130, 131, 132, 133, 232
 спектр 54, 56, 57, 126, 212, 288
 световой год 61
 сильное взаимодействие 95, 172, 174, 176, 208, 211, 213, 289
 “Симпсоны” (телешоу) 256
 сингулярности начальные 35, 36, 37, 41, 42, 68, 90, 238, 239, 240, 244

скалярное поле

квинтэссенция 201, 288
 конец вселенной и 263
 случайное блуждание 109,
 110, 111, 112, 113, 115, 120, 184
 хаотическом состоянии, в 119
 энергетический ландшафт 82,
 84, 85, 89, 94, 118, 159, 182,
 184, 201, 217, 263, 280, 282, 291

слабое взаимодействие 71, 72, 95,
 172, 174, 176, 206, 208, 211, 289

Солнечной системы образование
 52

Солнце

движение планет вокруг 27, 268
 срок жизни 177, 261, 285
 ядерные реакции 52

Сольвеевский конгресс (Брюс-
сель, 1933) 46-47

сохранение заряда 168

сохранения энергии, закон 20, 21,
 49, 153, 240

специальная теория относитель-
ности, см. теория относительнос-
ти, специальная

Спиноза, Барух 23

спиральные галактики 153, 262

Стандартная модель 174, 208,
 209, 289

стандартная свеча 198

Старобинский, Алексей 90, 91, 93,
 96, 279, 281

стационарной вселенной, космо-
логия 42, 43, 55, 73, 227, 272

Стейнхардт, Пол 87, 90, 92, 93,
 228, 286, 290, 291

Стэнфордский университет 17,
 221, 290

суперсимметричные теории 87, 284

Тафтса, Университет

Институт космологии 105, 106,
 244

Твен, Марк 181

Тегмарк, Макс 269, 270, 287, 295,
 296

темная материя 64, 122

темная энергия 122, 280, 295

теорема Пифагора 282

теория всего, см. окончательная
теория всего

теория относительности

общая 24, 27, 28, 30, 31, 37,
 42, 44, 46, 97, 127, 130, 159,
 210, 229, 232, 251
 специальная 22, 23, 24, 25

теория струн

ландшафт 214-217

см. также теория суперструн

теория суперструн 87, 148, 211-214

тепловые флуктуации 39

термодинамики, второе начало
 38, 39, 227

термодинамическое равновесие
 39, 228, 291

Тёрнер, Майкл 90, 288

Типлер, Фрэнк 284

толчки, квантовые 88, 89, 245

топ-кварк 50

Трайон, Эдвард 245, 246, 247, 293

Туманность Андромеды 108, 262,
 263

туннелирование, квантовое 45,
 82, 239, 241, 242, 243, 247, 249,
 254, 272, 273, 294

Турок, Нейл 228, 291

углерод 55, 176

Уилкинсон, Дэвид 63

Упанишады 225

Уран 52

ускорение, космическое 159, 198, 263

Уэдлоу, Роберт Першинг 189

Ферми, Энрико 167, 207

фермионы 167, 168, 284, 288

Феррис, Тимоти 291

физика элементарных частиц

калибровочная симметрия 168

космические струны 88, 91,

92, 289

космологическая постоянная

166, 167, 170, 171, 182, 183, 185

поиски окончательной теории

205, 206, 207, 208, 209, 211

расчет магнитного момента

202, 203

Стандартная модель 174, 208,

209, 289

теория струн 211, 212, 213, 214

Physical Review (журнал) 116, 154,

234, 279, 282, 287, 288, 291, 292,

294, 295

Physical Review Letters (журнал)

234, 287, 292

Physics Letters (журнал) 117, 280,

281, 292

Фомин, Петр 293

Форд, Ларри 106

фотонов взаимодействие 50

фракталы 117, 280

Фридман, Александр

Гамов и 44

геометрии и плотности Все-

ленной, о 50, 69, 124, 238

модель, предсказывающая

«большое схлопывание» 34, 35

фундаментальные постоянные

антропная селекция 170

вечная инфляция 185, 193

см. также космологическая

постоянная

Хаббл, Эдвин 18, 37

Хантеровский колледж 224

хаотическая инфляция 118, 119,

120, 280, 291

Хартл, Джеймс 151, 251, 252, 253,

254

Хвольсон, Орест 45

Херман, Роберт 53, 57, 68, 59

Хоган, Крэйг 173, 284

Хойл, Фред 42, 43, 55, 56

Хокинг, Стивен 42, 87-92, 251-257,

265, 291, 294

Хофт, Герард't 148

Цвейг, Георг 208

Цезарь, Юлий 153, 154

ЦЕРН (Европейский центр ядер-

ных исследований) 208

циклическая вселенная 227, 229,

233

Цюрихский Политехникум 22

Чандрасекара предел 197, 198

частицы-переносчики 208, 212

человеческий вид, срок сущест-

ствования 192

черных дыр испарение 260

Черчилль, Уинстон 221

Чибисов, Геннадий 93, 279
 Чикагский университет 196, 213

Шапиро, Пол 196

Шварц, Джон 213

Шерк, Джоэл 213

Шмидт, Брайан 199, 280

Эверетт Хью III 157, 158, 249, 250

эволюция, теория Дарвина 96,

177, 179

Эдисон, Томас 104

Эйлера, формула 268, 269

Эйнштейн, Альберт

космологическая постоянная

30, 31, 34, 123, 258

соотношение между массой и

энергией ($E = mc^2$) 20, 24, 50

фридмановское решение

уравнений 34, 41, 276

см. также теория относительности

Эколь Нормаль Сьюпериор 213

экономическая инфляция 74, 280

электрическое взаимодействие

209, 210

электромагнетизм

в окончательной теории всего

206, 208

квантовые флуктуации 165,

167

электроны

аннигиляция в фотоны 50, 51,

175, 260

магнитный момент 202, 203

масса 50, 51, 72, 173, 194

теории струн, в 211, 290

виртуальные 245

электрослабое взаимодействие

95, 208, 289

элементарные частицы

столкновения 49, 207

массы 71, 167, 172, 173

элементы химические

свойства 51, 206, 207, 278

периодическая таблица 206,

208

эллиптические галактики 267

Эллис, Джордж 155

Энглер, Франсуа 96, 293

энтропия 38, 39, 40, 227, 228, 229,

277

Эренфест, Пауль 27, 79, 275

эсхатология, космическая 258-

264

Эфстатию, Джордж 196, 287

Юнг, Томас 149

ядерная физика 45, 46, 112

ядерные реакции 52, 53, 55, 156,

177

WMAP, спутник (Wilkinson

Microwave Anisotropy Probe – зонд

им. Уилкинсона для изучения

анизотропии микроволнового фо-

на) 62, 63, 125

АЛЕКС ВИЛЕНКИН

Мир многих миров

Главный редактор ВАРВАРА ГОРНОСТАЕВА

Художник АНДРЕЙ БОНДАРЕНКО

Ведущий редактор ГАЛИНА ЮЗЕФОВИЧ

Ответственный за выпуск МАРИЯ КОСОВА

Технический редактор ТАТЬЯНА ТИМОШИНА

Корректор ЕКАТЕРИНА КОМАРОВА

Верстка ЕЛЕНА ИЛЮШИНА

ООО "Издательство Астрель",
обладатель товарного знака "Издательство Corpus"
129085, г. Москва, пр-д Ольминского, 3а

ООО "Издательство АСТ"
141100, Московская обл., г. Щелково, ул. Заречная, 96

Подписано в печать 20.11.09. Формат 60х90/16
Бумага офсетная. Гарнитура "OriginalGaramondC"
Печать офсетная. Усл. печ. л. 19
Тираж 3000 экз. Заказ №4024005

Общероссийский классификатор продукции
ОК-005-93, том 2; 953000 — книги, брошюры
Санитарно-эпидемиологическое заключение
№ 77.99.60.953.Д.012280.10.09 от 20.10.2009 г.

Охраняется законом РФ об авторском праве. Воспроизведение всей книги
или любой ее части воспрещается без письменного разрешения издателя.
Любые попытки нарушения закона будут преследоваться в судебном порядке.

Отпечатано с готовых файлов заказчика
в ОАО "Нижполиграф",
603006, Нижний Новгород, ул. Варварская, д. 32

Издание осуществлено при техническом содействии
ООО "Издательство АСТ", ООО "Издательство Астрель"

По вопросам оптовой покупки книг
Издательской группы "АСТ" обращаться по адресу:
г. Москва, Звездный бульвар, 21, 7-й этаж
Тел.: (495) 615-01-01, 232-17-16



Э | Л | Е | М | Е | Н | Т | Ы

elementy.ru



ALEX VILENKIN

MANY WORLDS IN ONE

In Search for Other Universes

После выхода этой книги Алексею Виленкину, скромному профессору физики из университета Тафтс, пришлось нанять телохранителей и скрываться от папарацци.

Созданная и описанная им теория стала настоящей сенсацией: если верить Виленкину, любая возможная цепочка событий, сколь бы причудливой она ни была, уже случилась где-то во Вселенной — и не единожды, а бесконечное множество раз.

Более того, в бесчисленных параллельных мирах существуют наши клоны, и многие из них в эту самую минуту держат в руках точно такую же книгу...

Увлекательный рассказ об исследованиях в области космологии переносит читателя на передний край физической науки и дает шанс заглянуть за границу зримого мира.



9 785271 254017 >