

The background of the book cover is a deep black space filled with numerous small, bright blue and white stars. Scattered throughout the space are many depictions of the Earth, shown from various angles and distances. Some Earths are large and detailed, showing continents and clouds, while others are small, distant specks. The overall effect is a sense of vastness and cosmic scale.

Александр Виленкин

МИР МНОЖЕСТВА МИРОВ

ФИЗИКИ В ПОИСКАХ
ИНЫХ ВСЕЛЕННЫХ

Сумма идей
об изгибах
пространства

Удивительная Вселенная

Александр Виленкин

**Мир множества миров. Физики
в поисках иных вселенных**

«Издательство АСТ»

2018

УДК 524.8
ББК 22.68

Виленкин А. В.

Мир множества миров. Физики в поисках иных вселенных /
А. В. Виленкин — «Издательство АСТ», 2018 — (Удивительная
Вселенная)

ISBN 978-5-17-111013-0

Специалист по квантовой гравитации, теории космических струн, директор Института космологии Университета Тафтса (США) Александр Виленкин в лучших традициях популярной литературы рассказывает, как родились и сформировались сложнейшие построения, описывающие структуру и задающие сценарии эволюции нашей Вселенной, знакомит с главными действующими лицами теоретической физики XX и XXI веков. Эта книга, впрочем, имеет отношение не только к космологии, но также к космологической философии. Творческий подход к физическим константам приводит автора к мысли, что наша Вселенная – один из множества миров, существующих параллельно друг с другом. Эту идею – идею мультивселенной – нельзя ни доказать, ни опровергнуть при помощи наблюдений, но ее оригинальность и элегантность сделали ее одинаково привлекательной и для многих именитых физиков, и в той же мере для писателей-фантастов.

УДК 524.8

ББК 22.68

ISBN 978-5-17-111013-0

© Виленкин А. В., 2018

© Издательство АСТ, 2018

Содержание

Пролог	6
Часть первая	8
Глава 1	9
Глава 2	12
Ткань пространства и времени	12
Тяготение пустого пространства	15
Глава 3	18
Вселенные Фридмана	18
Момент творения	20
Конец ознакомительного фрагмента.	23

Александр Виленкин
Мир множества миров. Физики
в поисках иных вселенных

Алине

Alex Vilenkin

Many Worlds in One: The Search for Other Universes

© Hill and Wang, 2018

© ООО «Издательство АСТ», 2018

© Перевод на русский язык. А. Г. Сергеев

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 команда 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, обращающиеся 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 для чего? Картирование нашей Галактики может служить практическим целям, поскольку когда-нибудь в будущем мы, вероятно, захотим ее колонизировать. Но галактики в миллиардах 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 увлечение космосом той же природы, что и чувства, вдохновившие создание древних мифов 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 первая

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, где звучал самый поразительный доклад из всех, что мне довелось слышать за много лет. Молодой физик из Стэнфорда Алан Гут рассказывал о новой теории происхождения Вселенной. Раньше я не встречался с Гут, 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, переменившая 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 ответ 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»”.¹

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.

¹ А. Х. Гут, *Инфляционная Вселенная*, Addison-Wesley, Reading, 1997, р. 2. Глава 2. Взлет и падение отталкивающей гравитации

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, 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.



Рис. 1.1. Кусочек гравитационно отталкивающей материи.

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, ее компенсирует растущая отрицательная гравитационная энергия. Полная энергия остается постоянной, как и требует закон сохранения.

Чтобы обеспечить период инфляции завершением, Гут ввел условие, что гравитационно отталкивающая 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 расши-

рение 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-фантастического 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 работы 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 привести к мысли, 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 килограммах. Как правило, я буду следовать этой традиции, не делая различий между энергией и массой.²

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 падают 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

² К примеру, время можно измерять в годах, а расстояние – в световых годах. (Световой год – это расстояние, проходимое светом за год.) Тогда скорость света $c = 1$.

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 предмета, 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.

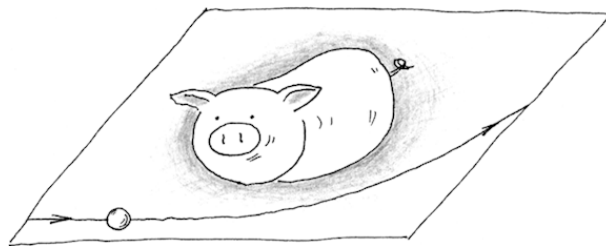


Рис. 2.1. Массивное тело вызывает искривление пространства.

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 вызвала 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 Эренфесту.³

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 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 Зоммер-

³ Письмо Эйнштейна Эренфесту. Цит. по: A. Pais. *Subtle is the Lord* (Oxford University Press, Oxford, 1982).

фельду, он писал: “Вы будете убеждены в правильности общей теории относительности, как только изучите ее. Так что я не собираюсь защищать ее ни единым словом”.⁴

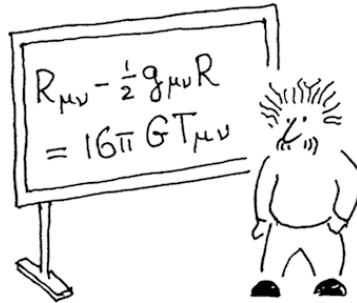


Рис. 2.2. Уравнения Эйнштейна.

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 этому тезису, 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, отказывались 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 и натяжением. Каждый кубический сантиметр

⁴ Письмо Эйнштейна Зоммерфельду, 8 февраля 1916 г.

пустого пространства получает фиксированное количество энергии (а значит, и массу). Эйнштейн назвал эту постоянную плотность энергии вакуума *космологической постоянной*.⁵

Математическая структура уравнений Эйнштейна диктует, что натяжение вакуума в точности равно его плотности энергии и потому определяется той же постоянной. Натяжение вакуума аналогично натяжению 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 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 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.⁶ После этого неудачного дебюта отталкивающая гравитация почти на полвека исче-

⁵ Фактически Эйнштейн не дал никакого физического объяснения новому члену. Его современная интерпретация как энергии вакуума и давления была предложена позднее бельгийским физиком Жоржем Леметром.

⁶ 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 оттал-

зает из мейнстрима физических исследований, но лишь для того, чтобы позднее вернуться с новыми силами.

кивание 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

*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 подчеркнуто строги в математическом плане. В своем курсе Фридман затрагивал широкий круг тем: от математики и метеорологии – основных областей его специализации – до последнего 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”.⁷ 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 бесконечной 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, наблюда-

⁷ Цит. по: Э. А. Трупп, В. Я. Френкель, А. Д. Чернин. Александр Александрович Фридман. М.: “Наука”. – 1988. – с. 133.

тель 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).

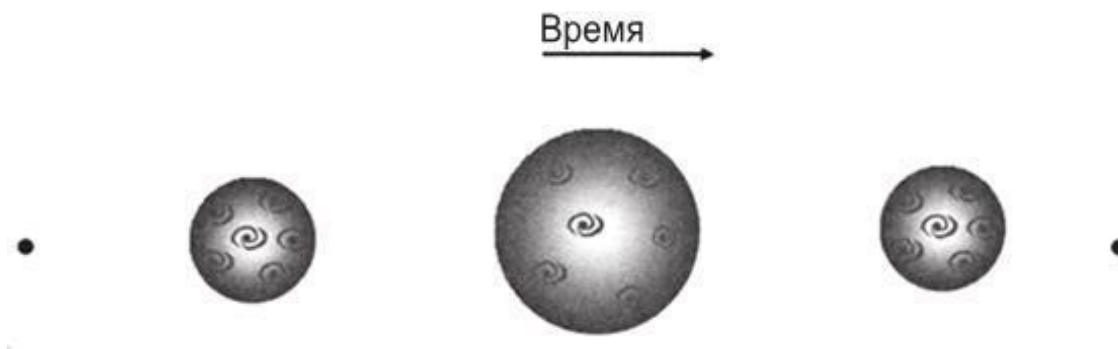


Рис. 3.1. Расширяющаяся и вновь сжимающаяся Вселенная.

И вновь Фридман обнаруживает, что расстояние, разделяющее любую пару галактик в открытой вселенной, растет, 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 геометрией.⁸ 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 вечно. В своих статьях Фридман не отдавал предпочтения ни одной из моделей.⁹

⁸ Фридман не рассматривал случай плоской вселенной. Он был изучен Эйнштейном и де Ситтером в 1932 году.

⁹ Простая связь между геометрией и судьбой Вселенной сохраняется, только если считать нулевой плотность энергии вакуума (космологическую постоянную). Подробнее об этом в главе 18.

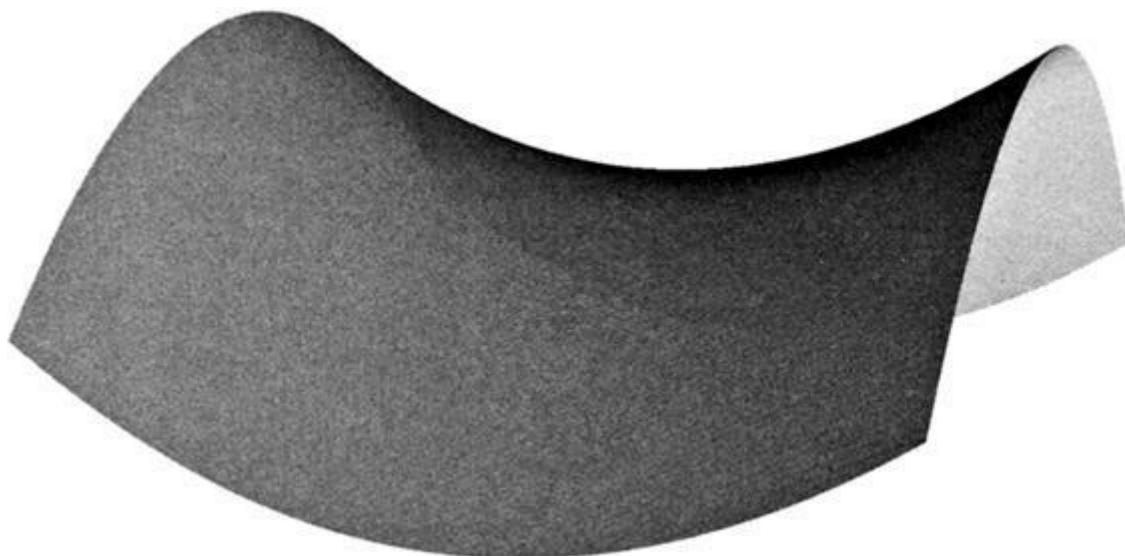


Рис. 3.2. Двумерный аналог открытой вселенной.

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 внимания.¹⁰ Они были извлечены из небытия лишь в 1930-х годах, вслед за открытием Хабблом расширения Вселенной.¹¹

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?

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 парадоксов, которыми полна картина статической, вечной и неизменной Вселенной.

¹⁰ 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.

¹¹ Модель расширяющейся Вселенной была переоткрыта в 1927 году Жоржем Леметром. Как и работа Фридмана, статья Леметра оставалась совершенно неизвестной вплоть до открытия Хаббла.

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 отношению к Вселенной не существует ничего внешнего). А раз так, то к Вселенной как к целому применимо второе начало термодинамики, и она должна неотвратимо 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.¹²

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 Больцман, 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 количество времени. Жизнь и наблюдатели могут существовать только в упорядоченных частях Вселенной, и это объясняет, почему нам повезло наблюдать столь неправдоподобно редкое событие^{13, 14}.

¹² Источник энергии звезд не был известен во времена Гельмгольца, но теперь мы знаем, что они сжигают ядерное топливо, превращая водород 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.

¹³ Больцман установил связь между энтропией и беспорядком, прояснив тем самым смысл второго начала термодинамики.

¹⁴ Идея Больцмана о флуктуациях – это, возможно, первый пример того, что позже стали называть антропной аргумента-

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 Вселенной. 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”.

Конец ознакомительного фрагмента.

Текст предоставлен ООО «ЛитРес».

Прочитайте эту книгу целиком, [купив полную легальную версию](#) на ЛитРес.

Безопасно оплатить книгу можно банковской картой Visa, MasterCard, Maestro, со счета мобильного телефона, с платежного терминала, в салоне МТС или Связной, через PayPal, WebMoney, Яндекс.Деньги, QIWI Кошелек, бонусными картами или другим удобным Вам способом.