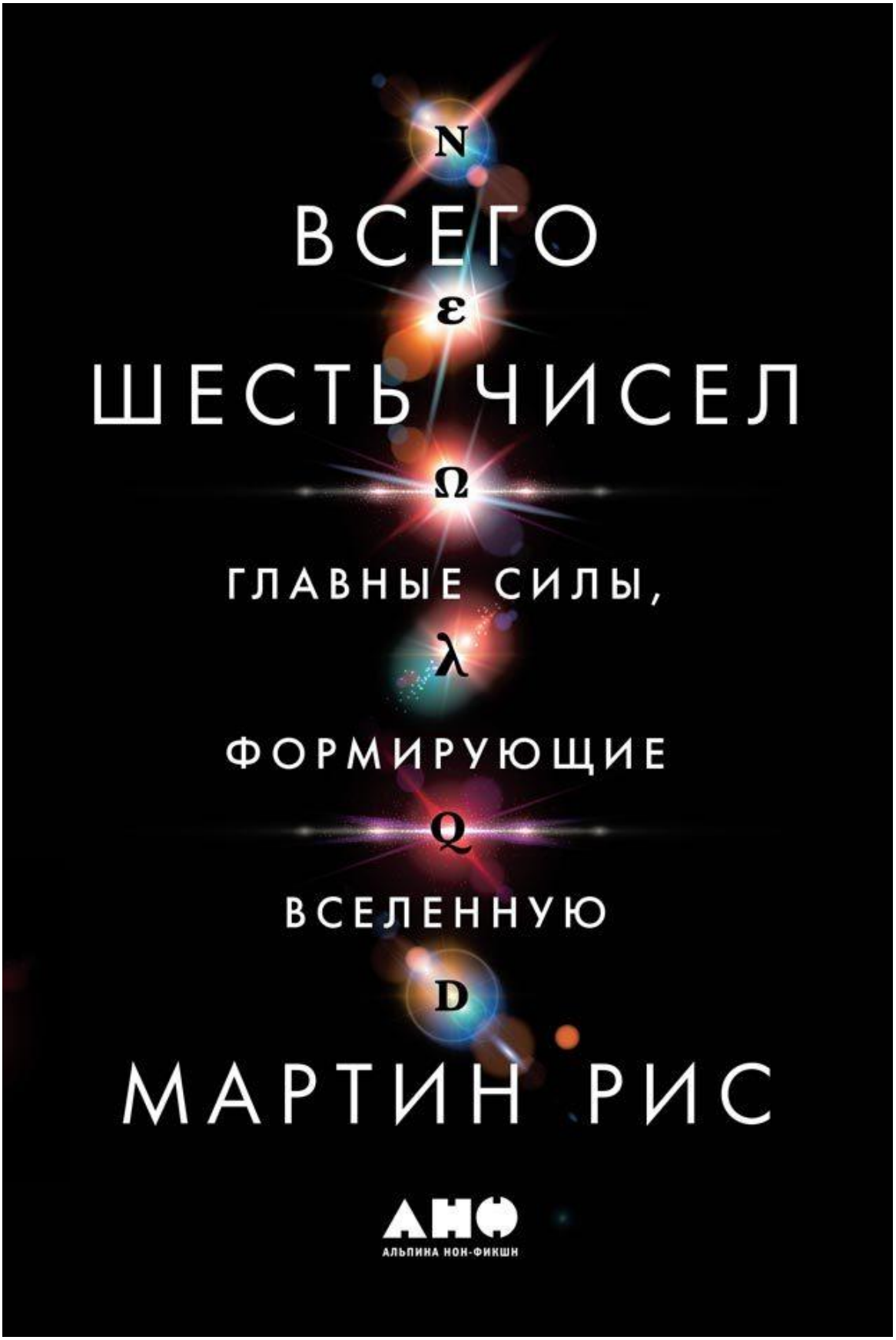
Мартин Дж. Рис
Всего шесть чисел. Главные силы, формирующие Вселенную



Текст предоставлен правообладателем
«Всего шесть чисел: Главные силы, формирующие Вселенную»: Альпина нон-фикшн; Москва; 2018
ISBN 978-5-0013-9019-0

Аннотация

В книге всемирно известного астрофизика, члена Королевского астрономического общества сэра Мартина Риса описываются фундаментальные силы, управляющие нашей Вселенной. Автор утверждает, что расширяющаяся Вселенная может быть определена всего шестью числами: N, e, Ω, l, Q, D, каждое из которых играет особую и решающую роль в ее эволюции, а вместе они определяют ее развитие и потенциал возможностей. Два из них связаны с основными силами; другие два определяют размер и общую структуру Вселенной и показывают, будет ли она существовать вечно; еще два говорят о свойствах самой Вселенной. Если бы любое из них было чуть чуть другим, не было бы звезд и не могла бы существовать жизнь. Мы могли появиться – и существуем сейчас – только во Вселенной с правильной комбинацией этих основополагающих чисел. А потому осознание этого дает совершенно новую точку зрения на Вселенную и наше место в ней, а также на саму природу физических законов. Мартину Рису удалось доступным языком, без использования сложного математического аппарата описать ключевые понятия космологии, которая стремительно развивается и сегодня находится на переднем крае науки.

Мартин Рис
Всего шесть чисел: Главные силы, формирующие Вселенную

Переводчик *Виктория Краснянская*
Редактор *Антон Никольский*
Научный редактор *Сергей Попов, д-р физ. – мат. наук*
Руководитель проекта *Д. Петушкова*
Арт-директор *Ю. Буга*
Корректоры *М. Миловидова, С. Чупахина*
Компьютерная верстка *М. Поташкин*

© 2000 by Martin Rees
Published by Basic Books, A Member of the Perseus Books Group
© Издание на русском языке, перевод, оформление. ООО «Альпина нон-фикшн», 2018

Все права защищены. Данная электронная книга предназначена исключительно для частного использования в личных (некоммерческих) целях. Электронная книга, ее части, фрагменты и элементы, включая текст, изображения и иное, не подлежат копированию и любому другому использованию без разрешения правообладателя. В частности, запрещено такое использование, в результате которого электронная книга, ее часть, фрагмент или элемент станут доступными ограниченному или неопределенному кругу лиц, в том числе посредством сети интернет, независимо от того, будет предоставляться доступ за плату или безвозмездно.

Копирование, воспроизведение и иное использование электронной книги, ее частей, фрагментов и элементов, выходящее за пределы частного использования в личных (некоммерческих) целях, без согласия правообладателя является незаконным и влечет уголовную, административную и гражданскую ответственность.

* * *

ПРЕДИСЛОВИЕ

Астрономия – одна из первых наук, связанных с числами, в древние времена игравшая чрезвычайно важную роль в создании календарей и мореплавании. Сейчас астрономия переживает новую эпоху открытий. Волнующий переход в новое тысячелетие значительно повысил интерес к нашему космическому окружению. Астрономия все еще остается наукой чисел, и эта книга рассказывает о шести из них, принципиально важных для Вселенной и нашего места в ней.

На древних картах за пределами зыбких границ изведанных земель картографы часто писали: «Здесь водятся драконы». После того как первые мореплаватели обогнули земной шар и в общих чертах нанесли на карты континенты и океаны, отправившиеся в путешествия исследователи принялись заполнять их деталями. Однако не осталось никакой надежды обнаружить новый континент, и никто не ждал кардинальной переоценки формы и размера Земли.

Примечательно, что в начале XXI в. мы достигли нового этапа в составлении карты Вселенной: главным предметом интереса теперь является ее крупномасштабная структура. К этому этапу мы пришли благодаря коллективным достижениям тысяч астрономов, физиков и инженеров, использующих разнообразное техническое оборудование. Современные телескопы способны заглянуть глубоко в космос. Поскольку свет от далеких объектов совершает длинное путешествие, добираясь до нас, телескопы дают возможность увидеть далекое прошлое. Мы обнаружили «ископаемости», оставшиеся от первых нескольких секунд космической истории. Космические аппараты открывают нейтронные звезды, черные дыры и другие потрясающие объекты, которые расширяют знания о физических законах. Эти достижения широко раздвинули наши космические горизонты. Параллельно идет исследование микромира внутри атомов, позволяющее по-новому взглянуть на природу пространства в самых крошечных масштабах.

Постепенно вырисовывается картина – карта, существующая как во времени, так и в пространстве, – которую многие из нас не ожидали увидеть. Она предлагает новую точку зрения на то, как одно-единственное «событие зарождения» создало миллиарды галактик, черных дыр, звезд и планет, и на то, как здесь, на Земле (а возможно, и на других планетах), атомы соединились в живые существа, достаточно сложные, чтобы размышлять о своем происхождении. Постепенно нам открываются глубинные связи между звездами и атомами, между космосом и микромиром. В этой книге при минимальном использовании специальной терминологии описываются силы, которым подвластны мы и, более того, вся Вселенная. Наше появление и выживание зависит от особой «настройки» космоса – космоса, который может быть гораздо обширнее той Вселенной, которую мы видим в настоящее время.

БЛАГОДАРНОСТИ

Прежде всего мне хотелось бы отдать должное коллегам, вместе с которыми я многие годы занимаюсь исследованиями. Но не менее благодарен я и тем, кто участвует в космологических обсуждениях, не являясь специалистом в этой области: беседы с ними всегда привносят свежий взгляд, подтверждают общую картину и напоминают о том, что самые важные вопросы все еще остаются без ответа. Поэтому особые благодарности Дэвиду Харту, Грэму Митчисону, Хансу Розингу и Нику Веббу. Эта книга предназначена именно для широкого круга читателей. Я пытался, избегая специальной терминологии и технических подробностей, показать взаимосвязи новых открытий, отделить хорошо обоснованные утверждения от предположений и обратить внимание читателя на те тайны, которые лежат за ними.

Я благодарен Джону Брокману, который пригласил меня принять участие в серии книг

Science Masters, а также за его терпение во время медленного рождения этой книги. Тоби Манди и Эмма Бакстер из издательства Weidenfeld & Nicolson оказали мне большую поддержку в процессе редактирования и подготовки книги к печати. Я благодарен им, а также Ричарду Сворду и Джупу Шайе – за подготовку иллюстраций, Брайану Амосу – за алфавитный указатель, а Джудит Мосс – за помощь в выполнении обязанностей секретаря.

ГЛАВА 1
КОСМОС И МИКРОМИР

Человек... нераздельно связан со всем сущим, с известным и неизвестным... с планктоном, с фосфоресцирующей гладью моря, с кружащимися планетами и расширяющейся Вселенной – все это пронизано эластичной струной времени. Хорошо оторвать взгляд от приливной заводи и посмотреть на звезды, а потом – снова взглянуть на их отражения в приливной заводи.

Джон Стейнбек. Море Кортеса

ШЕСТЬ ЧИСЕЛ

Ткань нашей Вселенной поддерживают математические законы – им подвластны не только атомы, но и галактики, звезды, люди. Свойства атомов – размеры, массы, силы, связывающие их вместе, – определяют устройство нашего повседневного мира. Само существование атомов зависит от сил и частиц в их глубинах. Объекты, которые изучают астрономы – планеты, звезды, галактики, – подвластны силе притяжения. И происходит все это в расширяющейся Вселенной, основные свойства которой были предопределены в момент Большого взрыва.

Наука движется вперед, выявляя структуры и закономерности нашего мира так, чтобы возможно большее количество явлений можно было описать в рамках общих категорий и законов. Физики-теоретики ставят себе целью предельно лаконично выразить сущность физических законов в единой системе уравнений и в нескольких числах. В этой области удалось достигнуть значительного прогресса, хотя по-прежнему есть над чем работать.

В этой книге описываются шесть чисел, которые считаются наиболее важными. Два из них связаны с основными силами; другие два определяют размер и общую структуру Вселенной и показывают, будет ли она существовать вечно; еще два говорят о свойствах самой Вселенной:

● Вселенная простирается так далеко из-за того, что в природе существует чрезвычайно важное огромное число N, равное 1 000 000 000 000 000 000 000 000000 000 000 000. Это число является отношением силы электрического притяжения, удерживающей атомы вместе, к силе гравитационного притяжения между ними. Если бы в числе N было хоть немного меньше нулей, могла бы существовать только короткоживущая миниатюрная вселенная: ни одно существо не могло бы стать больше насекомого, и времени на биологическую эволюцию не хватило.

● Другое число, ε (эпсилон), значение которого составляет 0,007, определяет, насколько прочно связаны ядра атомов и как атомы формируются. От его значения зависит светимость Солнца и, более опосредованно, то, как внутри звезд водород преобразуется во все элементы периодической таблицы. Углерод и кислород распространены повсеместно, а золото и уран встречаются редко – и все это из-за процессов, которые происходят внутри звезд. Если бы ε равнялось 0,006 или 0,008, мы вообще бы не существовали.

● Космическое число Ω (омега) измеряет количество вещества во Вселенной – галактик, рассеянного между ними газа и темной материи. Ω указывает нам на важность отношения между силами притяжения и расширением Вселенной. Если бы это отношение было слишком высоким по отношению к определенному критическому значению, Вселенная

давно бы схлопнулась. Если бы оно было слишком низким, не сформировались бы галактики и звезды. Кажется, первоначальная скорость расширения Вселенной была идеально рассчитана.

● Измерение четвертого числа λ (лямбда) было самой крупной научной новостью 1998 г. Сила, о которой совершенно не подозревали – космическая «антигравитация», – контролирует расширение Вселенной, хотя и не оказывает какого-либо заметного эффекта на расстояниях меньше миллиарда световых лет (далее – св. лет). Со временем ей предначертано стать доминирующей над силой притяжения и другими силами, по мере того как наша Вселенная будет становиться все более пустой и темной. К счастью для нас (и к удивлению физиков-теоретиков), λ очень мала. Иначе бы ее воздействие не позволило сформироваться галактикам и звездам и космическая эволюция закончилась бы, даже не начавшись.

● Элементы всех космических структур – звезд, галактик и скоплений галактик – несут на себе отпечаток Большого взрыва. Сущность нашей Вселенной зависит от одного числа, Q, которое представляет собой соотношение двух фундаментальных энергий и составляет примерно 1/100 000. Если бы Q было еще меньше, Вселенная была бы инертной и не имела сложной структуры. Если бы Q было значительно больше, на месте Вселенной возникло бы очень мрачное место, где звезды и планетные системы были бы поглощены огромными черными дырами.

● Шестое жизненно важное число известно уже много столетий, но теперь его рассматривают с новой точки зрения. Это количество пространственных измерений нашего мира, D, и равно оно трем. Жизнь не смогла бы существовать, если бы D равнялось двум или четырем. Время – это четвертое измерение, но оно отличается от остальных тем, что имеет направленность: мы можем двигаться только в направлении будущего. Около черных дыр пространство так искривлено, что свет движется по кругу, а время может стоять на месте. Более того, сразу после Большого взрыва в микромасштабах пространство уже могло обнаружить свою глубинную структуру, лежащую в основе всего, – вибрацию и гармонию объектов, называемых «суперструнами», в десяти измерениях.

Возможно, между этими числами существуют какие-то связи. Тем не менее на данный момент мы не можем вычислить какое-либо из них, отталкиваясь от значений других. Не знаем мы и того, сможет ли какая-нибудь «теория всего» в конце концов создать формулу, которая установит взаимосвязь между ними или определит их однозначно. Я выделяю именно эти шесть чисел, потому что каждое из них играет решающую и особую роль в нашей Вселенной, а вместе они определяют, как она развивается и какие имеет внутренние потенциальные возможности. Более того, три из этих чисел (те, которые относятся к крупномасштабной вселенной) только недавно были измерены с достаточной точностью.

Эти шесть чисел составляют «рецепт» эволюции Вселенной. Более того, результат очень чувствителен к их значениям: если бы любое из них было чуть-чуть другим, не было бы звезд и не могла бы существовать жизнь. Является ли такая точная «настройка» всего лишь случайностью, совпадением? Или в этом проявляется воля милосердного Творца? Я придерживаюсь третьего мнения. Бесконечное количество вселенных прекрасно может существовать там, где эти числа другие, только большинство из этих вселенных были бы мертворожденными или стерильными. Мы могли появиться (и поэтому сейчас существуем) только во вселенной с «правильной» комбинацией. Осознание этого дает совершенно новую точку зрения на Вселенную, наше место в ней и на саму природу физических законов.

Поразительно, что расширяющаяся вселенная, отправная точка которой так «проста», что может быть определена всего несколькими числами, может развиться (если эти числа «настроены» подходящим образом) в столь затейливо структурированную упорядоченную систему. Итак, для начала нам придется обставить нашу «сцену», рассмотрев эту структуру во всех масштабах, от атомов до галактик.

ВСЕЛЕННАЯ ЧЕРЕЗ ЗУМ-ОБЪЕКТИВ

Давайте начнем с самого обыкновенного фотоснимка – мужчина и женщина, сфотографированные крупным планом с расстояния в несколько метров. Потом представим себе тот же кадр, сделанный с постепенно увеличивающегося расстояния, которое каждый раз становится в десять раз больше предыдущего. На втором снимке будет виден клочок травы, на которую они присели, на третьем станет понятно, что они находятся в парке, на четвертом в кадр попадут какие-то высокие здания, пятый покажет весь город, а следующий – часть земного горизонта, на котором отчетливо видно, что он изгибается. Еще пара кадров – и мы получим великолепное изображение, которое стало знакомым с 1960-х гг.: вся Земля – с континентами, океанами и облаками, со своей атмосферой – кажется просто покрытой нежной глазурью, контрастирующей с бледными чертами Луны.

Еще три шага покажут внутренние планеты Солнечной системы с Землей, обращающейся вокруг Солнца по более широкой орбите, чем Меркурий и Венера, следующий кадр – всю Солнечную систему. Еще четыре кадра (вид из точки, отдаленной на несколько св. лет) – и наше Солнце выглядит как одна из многих звезд. Еще через три кадра мы увидим миллиарды практически неотличимых друг от друга звезд, собранных в плоском диске Млечного Пути, растянувшегося на десятки тысяч св. лет. Еще три шага позволят увидеть Млечный Путь как спиральную галактику, вместе с Туманностью Андромеды. Глядя с большего расстояния, мы увидим, что эти две галактики – лишь пара из сотен других – окраинные жители галактического Скопления Девы. Следующий шаг покажет, что Скопление Девы – это всего лишь достаточно скромное скопление из многих других. Даже если бы наш воображаемый объектив имел мощность Космического телескопа имени Хаббла, в последнем кадре с расстояния в несколько миллиардов километров вся наша Галактика была бы трудноразличимым пятнышком света.

Здесь наша серия снимков заканчивается. Дальше мы не можем расширять горизонт, но для того, чтобы, начав с «человеческого» масштаба в несколько метров, достигнуть границ обозримой вселенной, нам понадобилось 25 «скачков», каждый в десять раз больше предыдущего.

Следующий ряд увеличений будет направлен внутрь, а не вовне. С расстояния менее метра мы видим руку, с расстояния в несколько сантиметров – так близко, как только мы можем смотреть невооруженным глазом, – маленький кусочек кожи. Следующий снимок позволит нам проникнуть в тонкую структуру человеческой кожи, а вслед за ним – внутрь отдельной клетки (в человеческом теле клеток в сотни раз больше, чем звезд в нашей Галактике). Далее в пределах мощности сильного микроскопа мы попадем в королевство отдельных молекул – длинных, запутанных нитей протеинов и двойных спиралей ДНК.

Следующее приближение покажет нам отдельные атомы. Здесь начинают проявляться квантовые эффекты: есть предел отчетливости картинки, которую мы можем получить. Ни один реально существующий микроскоп не может проникнуть внутрь атома, где рой электронов окружает положительно заряженное ядро, но структуры в 100 раз меньше атомного ядра можно исследовать, изучая, что происходит, когда в них врезаются другие частицы, ускоренные до скорости, приближенной к скорости света. Это самые мелкие детали, которые мы можем измерить напрямую; тем не менее мы подозреваем, что в глубинной структуре мироздания могут лежать суперструны или «квантовая пена», имеющие такие маленькие размеры, что для того, чтобы до них добраться, потребуется еще 17 приближений*{1}*.

Наши телескопы могут заглянуть на расстояние, которое больше суперструны (самой маленькой подструктуры, предположительно существующей внутри атома) в количество раз, которое можно выразить шестидесятизначным числом: чтобы получить изображение природного мира, нам потребуется приблизиться на нашем воображаемом объективе на 60 шагов (из которых в настоящее время возможны только 43). Из всех этих «кадров» наш обычный опыт может включать самое большее девять – от самых маленьких частиц размером примерно в миллиметр, которые может видеть наш глаз, до расстояния, которое

мы преодолеваем во время перелета между континентами. Это подчеркивает нечто очень важное и значительное, но при этом столь очевидное, что мы принимаем его как данность: наша Вселенная включает в себя громадный диапазон расстояний и огромное разнообразие структур, которые могут быть намного больше и намного меньше тех измерений, в которых мы проводим свою повседневную жизнь.

БОЛЬШИЕ ЧИСЛА И РАЗНЫЕ МАСШТАБЫ

В каждом из нас от 10^{28} до 10^{29} атомов. Это «человеческое измерение» с точки зрения чисел находится где-то между массой атомов и массой звезд. Масса Солнца примерно равна массе такого же количества людей, сколько в каждом из нас атомов. Но наше Солнце – самая обыкновенная звезда в Галактике, состоящей из сотен миллиардов звезд. В видимой Вселенной по меньшей мере столько же галактик, сколько звезд в Галактике. Таким образом, в зону видимости наших телескопов попадают более 10^{78} атомов.

Живые организмы состоят из множества слоев сложных структур. Атомы соединяются в сложные молекулы. Молекулы сложными путями реагируют друг с другом в каждой клетке и выстраиваются в большие взаимосвязанные структуры, из которых состоит дерево, насекомое или человек. Мы занимаем место между космосом и микрокосмом – находимся посередине между Солнцем, имеющим диаметр в миллиард метров, и молекулой с диаметром в миллиардные части метра. Нет никакой случайности в том, что природа наиболее сложно устроена именно в таком среднем масштабе: что-либо большего размера, находящееся на обитаемой планете, разрушилось бы под воздействием гравитации.

Мы привыкли к мысли о том, что микромир воздействует на нас: мы беззащитны перед вирусами размером в миллионные доли метра, а в крохотной двойной спирали ДНК содержится наш генетический код. Не менее очевидно и то, что мы зависим от Солнца и его мощи. Но что насчет структур более крупного масштаба? Даже ближайшие к нам звезды находятся в миллионы раз дальше, чем Солнце, а известный нам космос простирается еще в миллиарды раз дальше. Почему существует так много пространства за пределами Солнечной системы? В этой книге я опишу, каким образом мы связаны со звездами, и докажу, что невозможно раскрыть тайны нашего собственного происхождения вне космического контекста.

Глубокие связи между «внутренним пространством» мира внутри атомов и «внешним пространством» космоса показаны на рисунке 1.1 в виде *Уробороса,* который в энциклопедии «Британника» описывается как «используемый в культурах Древнего Египта и Древней Греции символический змей, кусающий себя за хвост, постоянно пожирающий себя и возрождающийся… [Он] обозначает единство всех материальных и духовных сущностей, которое никогда не исчезает, но постоянно меняет форму в вечном цикле разрушения и возрождения».

Слева на иллюстрации показаны атомы и внутриатомные частицы – это квантовый мир. Справа находятся планеты, звезды и галактики. В этой книге мы уделим внимание некоторым важным связям между микромасштабными структурами слева и структурами макромира справа. Мир нашей повседневной жизни определяется атомами и тем, как они соединяются в молекулы, минералы и живые клетки. То, как светят звезды, зависит от того, из каких ядер состоят их атомы. Галактики могут держаться вместе из-за силы притяжения огромного роя субъядерных частиц. «Гастрономически» символизируемая, эта иллюстрация воплощает величайшую связь, которая ускользает от нас, – соединение между космосом и квантом.

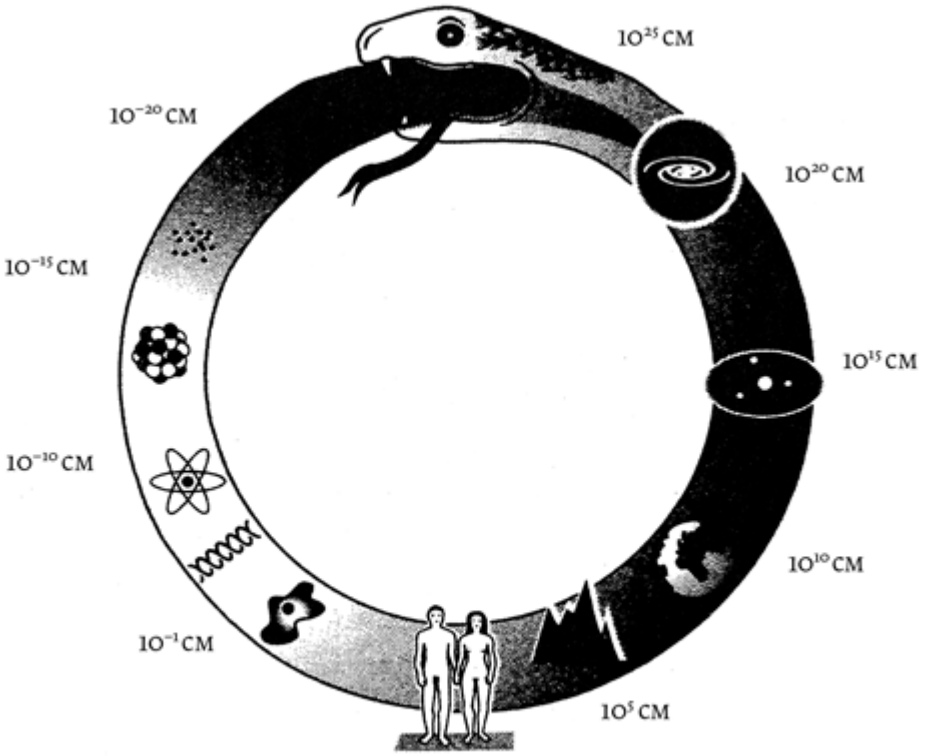


Рис. 1.1. Уроборос. Связь между микромиром частиц, ядер, атомов (слева) и космосом (справа)

Уроборос охватывает 60 порядков величины. На самом деле такой огромный диапазон является необходимым условием для «интересной» вселенной. Вселенная, где нет больших чисел, никогда не сможет развить сложную иерархию структур – она будет скучным местом, где, конечно же, не будет никакой жизни. Кроме того, должны быть и большие временные промежутки. Процессы внутри атома могут происходить за миллионные или миллиардные доли секунды, а около ядра они происходят еще быстрее. Сложные процессы, которые превращают зародыш в кровь, кости и плоть, требуют непрерывного клеточного деления и образования новых структур. При этом каждое из них влечет за собой тщательную перегруппировку и воспроизведение молекул. Эта деятельность никогда не прекращается, пока мы едим и дышим. Наша жизнь – это всего лишь одно поколение в эволюции человечества, всего один эпизод, являющийся проявлением всей совокупности жизни.

Огромные промежутки времени, необходимые для эволюции, дают новую точку зрения на вопрос: «Почему наша Вселенная так велика?» Для того чтобы здесь, на Земле, появились люди, потребовалось 4,5 млрд лет. Еще до того, как сформировались Солнце и планеты, в существующих ранее звездах чистый водород должен был превратиться в углерод, кислород и другие элементы периодической системы. Это заняло около 10 млрд лет. Размер наблюдаемой Вселенной примерно равен тому расстоянию, которое прошел свет со времени Большого взрыва, поэтому современная видимая Вселенная должна иметь протяженность около 10 млрд св. лет.

Это ошеломляющее заключение. Сама огромность Вселенной, которая на первый взгляд указывает на нашу незначительность в космической схеме, на самом деле связана с нашим существованием. Никто не говорит, что Вселенная не могла быть меньше, просто мы не смогли бы в ней существовать. Расширение космического пространства – это не экстравагантное излишество, это последствие длинной цепи событий, которые начались еще до того, как сформировалась Солнечная система, и привели к нашему появлению на сцене.

Это может показаться возвращением к древней «антропоцентрической» точке зрения – той, которая была поколеблена открытием Коперника, что Земля вращается вокруг Солнца, а не наоборот. Но мы не должны заходить слишком далеко в скромности Коперника (которую

иногда называют «принципом посредственности»). Таким существам, как мы, для развития были нужны особые условия, поэтому наша точка зрения обречена на то, чтобы быть нетипичной. Протяженность нашей Вселенной не должна нас удивлять, хотя мы можем по-прежнему искать более глубокие объяснения ее отличительным чертам.

МОЖЕМ ЛИ МЫ ПОНЯТЬ НАШУ ВСЕЛЕННУЮ?

Физик Макс Планк заявил, что от теорий никогда не отказываются, пока не умирают все их сторонники, и, таким образом, наука движется «от похорон до похорон». Но это слишком циничный взгляд на вещи. Сейчас разрешено несколько долгих космологических споров, и некоторые более ранние проблемы больше не являются противоречивыми. Многие из нас часто меняют свое мнение – по крайней мере со мной это происходит. На самом деле в этой книге рассказывается история, которую я сам когда-то считал удивительной. Многие разделяют точку зрения относительно космоса, которую я здесь описываю, хотя многие другие и не полностью согласны с моей интерпретацией.

Космологические концепции теперь хрупки и изменчивы не более, чем теории об истории нашей Земли. Геологи пришли к выводу, что континенты движутся примерно с той же скоростью, с какой у нас растут ногти, и что 200 млн лет назад Европа и Северная Америка были единым целым. Мы верим им, несмотря на то что такие огромные временные промежутки трудно себе представить. Также мы принимаем за истину – по крайней мере в общих чертах – историю развития нашей биосферы и появления человека. Но некоторые ключевые характеристики нашей космической среды теперь подкрепляются точными данными. Эмпирическое обоснование Большого взрыва, произошедшего около 13–14 млрд лет назад, является таким же бесспорным доказательством, как и геологические теории истории Земли. Это просто поразительное изменение: наши предки могли выдвигать гипотезы, практически не обремененные фактами, и почти до последнего времени космология была не чем иным, как чисто теоретической математикой.

Несколько лет назад я был уверен на 90 % в том, что Большой взрыв действительно был, и в том, что вся наблюдаемая нами Вселенная когда-то выглядела как сжатый шар, гораздо более горячий, чем центр Солнца. Теперь эта теория обоснована гораздо лучше: в 1990-е гг. колоссальный прорыв в наблюдениях и экспериментах позволил лучше понять космологическую картину, и теперь я могу повысить степень своей уверенности до 99 %.

Один из самых известных афоризмов Эйнштейна – «Самое непостижимое в этом мире – это то, что он постижим»[1] – выражает его изумление тем, что законы физики, которые наш разум каким-то образом научился понимать, применимы не только здесь, на Земле, но и в самых отдаленных галактиках. Ньютон объяснил нам, что та же самая сила, которая заставляет яблоки падать вниз, удерживает Луну и планеты на их орбитах. Теперь мы знаем, что та же самая сила закручивает галактики, толкает некоторые звезды в черные дыры и вдобавок, возможно, приведет к тому, что Туманность Андромеды в конце концов сольется с нашей Галактикой. Атомы в самых отдаленных галактиках – это те же самые атомы, которые мы изучаем в наших лабораториях. Все части Вселенной, по всей видимости, развиваются так, как если бы они имели одно и то же происхождение. Без этого единообразия космология зашла бы в тупик.

Последние достижения акцентируют внимание на новых загадках, связанных с происхождением Вселенной, действующими в ней законами и даже с ее окончательной судьбой. Правда, загадки эти имеют отношение к первой крохотной доле секунды после Большого взрыва, когда условия были такими экстремальными, что реальную физическую картину понять непросто – возникают вопросы о природе времени, количестве пространственных измерений и происхождении вещества. В этот первоначальный момент

---

[1] Большая книга афоризмов (изд. 9-е, исправленное) / составитель К. В. Душенко. – М.: Эксмо, 2008.

все было сжато до такой огромной плотности, что (как это символически отражено в изображении Уробороса) космос и микромир наложились друг на друга.

Окружающий нас мир невозможно делить бесконечно. Мы пока не знаем все детали, но большинство физиков предполагают, что при размерах порядка 10^{-33} см возникает некая неоднородность. Это в 10^{20} раз меньше размера атомного ядра, что приблизительно эквивалентно соотношению атомного ядра и крупного города – потребуется такое же количество кадров в нашем воображаемом эксперименте с «зум-объективом». После этого мы натыкаемся на барьер: если бы и существовали более мелкие структуры, то они выходили бы за пределы наших представлений о пространстве и времени.

Что же насчет самого крупного масштаба? Существуют ли области, свет от которых еще не добрался до нас за примерно 14 млрд лет, прошедших со времени Большого взрыва? У нас просто-напросто нет никаких прямых доказательств, чтобы доказать или опровергнуть это. Тем не менее теоретически нет никаких границ для расширения нашей Вселенной (в пространстве или в будущем времени) и нет никаких ограничений по поводу того, что может попасть в поле зрения в далеком будущем. Более того, оно может находиться не просто в миллионы раз дальше тех областей, которые мы сейчас можем наблюдать, а в миллионы в десятой степени дальше. И даже это еще не все. Наша Вселенная, безмерно расширяясь по сравнению с существующими ныне горизонтами, может быть признана одним из членов потенциально бесконечного множества. Концепция «мультивселенной», хотя и совершенно умозрительная, является естественным продолжением современных космологических теорий, которые получили признание, потому что основываются на том, что мы действительно наблюдаем. В иных вселенных физические законы и геометрия могут быть другими, и это придает особое значение, которое шесть чисел имеют в нашей Вселенной.

ГЛАВА 2
НАША КОСМИЧЕСКАЯ СРЕДА ОБИТАНИЯ I: ПЛАНЕТЫ, ЗВЕЗДЫ И ЖИЗНЬ

Черт бы побрал эту Солнечную систему! Плохое освещение, планеты слишком далеко, полно комет, задумка слабовата. Я бы сотворил [Вселенную] получше.

Лорд Джеффри

ПРОТОПЛАНЕТЫ

В созвездии Ориона можно наблюдать огромное облако, в котором атомов хватит на то, чтобы создать 10 000 Солнц. Одна его часть — сияющая туманность, подогреваемая яркими голубыми звездами; другая — холодная, темная и пыльная. Внутри этой холодной части есть теплые сгустки, не излучающие света, но вырабатывающие тепло. Их можно обнаружить с помощью телескопов с инфракрасными детекторами. Эти сгустки в будущем должны стать звездами, но пока они представляют собой протозвезды, уплотняющиеся под собственной гравитацией. Каждую окружает диск, состоящий из газа и пыли.

Эти диски не являются чем-то необычным. Тем не менее более плотное, чем пространство между звездами, пылевое облако в Орионе является достаточно редким явлением. Для того чтобы из него сформировалась звезда, часть этого газа должна сжаться настолько, что его плотность повысится в миллиарды миллиардов раз. Любое, даже самое незначительное вращение начнет ускоряться во время схлопывания (космического варианта «раскрутки» в фигурном катании, когда спортсмены прижимают локти к корпусу), до тех пор пока центробежная сила не прекратит присоединение вещества к звезде. Останутся излишки материала, обращающиеся вокруг каждой только что сформированной звезды. Получившиеся в результате диски станут предшественниками планетных систем: частицы пыли будут сталкиваться и склеиваться, образовывая твердые куски, которые, в свою очередь, соединятся в более крупные тела,

формирующие планеты. Наша Солнечная система образовалась именно таким образом — из протосолнечного диска. Другие звезды появились подобным образом, и есть все причины ожидать, что вокруг них обращается свита в виде планет.

В начале XX в. такой сценарий, подтвержденный фактическими наблюдениями дисков вокруг недавно образованных звезд, пришел на смену «катастрофическим» теориям, которые рассматривали процесс формирования планет как редкий, особый случай. Считалось, что наше Солнце пережило сближение с другой звездой — чрезвычайно редкое явление, потому что звезды, как правило, расположены очень далеко друг от друга, — и что притяжение этой звезды оттянуло газовый плюмаж с Солнца. Этот плюмаж предположительно собрался в «зерна», каждое из которых стало планетой.

Тем не менее астрономы более ранних веков вовсе не относились к идее о других планетных системах с большим скепсисом, нежели мы сейчас. Еще в 1698 г. Христиан Гюйгенс, нидерландский ученый, один из основоположников оптики, писал: «Почему бы каждой из этих звезд и каждому из этих солнц не иметь такую же огромную свиту, как у нашего Солнца, окруженного планетами и их спутниками?»

Другие планетные системы

Полностью сформировавшиеся планеты, обращающиеся вокруг звезд, засечь труднее, чем диски, из которых они образовались. Первое веское доказательство того, что планеты действительно часто встречаются, было получено в конце 1990-х гг. Основано оно на очень простом принципе. Наблюдатель, исследующий наше Солнце с расстояния, скажем, 40 св. лет, не может увидеть планеты, обращающиеся вокруг него, даже если он использует такой же мощный телескоп, как самые большие из тех, которые сейчас есть на Земле. Тем не менее о существовании Юпитера (самой большой из планет) можно сделать вывод в результате тщательных измерений солнечного света. Это связано с тем, что и Солнце, и Юпитер обращаются вокруг своего общего центра масс, так называемого барицентра. Солнце в 1047 раз тяжелее Юпитера, поэтому барицентр находится в 1047 раз ближе к центру Солнца, чем к центру Юпитера (на самом деле он находится внутри Солнца), вследствие этого Солнце обращается вокруг барицентра в тысячу раз медленнее, чем Юпитер. В реальности движение гораздо сложнее из-за дополнительной неустойчивости, которую привносят другие планеты, но Юпитер значительно тяжелее их и оказывает преобладающее влияние. Тщательно анализируя свет от звезд, астрономы обнаружили небольшие колебания в их движении. Эти колебания вызывают планеты, обращающиеся вокруг них, точно так же, как Юпитер влияет на движение Солнца.

В спектрах света звезд можно найти характерные наборы линий, которые возникают потому, что при поглощении или испускании света различные виды атомов (углерод, натрий и т.д.), из которых состоит звезда, дают разные цвета. Если звезда отдаляется от нас, то ее свет сдвигается в красную часть спектра в сравнении с цветами, которые получаются в экспериментах с излучением света тех же самых атомов в лаборатории, — это хорошо известный эффект Доплера (явление в области оптики, аналогичное изменению частоты звука, когда сирена удаляющегося автомобиля кажется наблюдателю более низко звучащей). Если звезда к нам приближается, то ее свет сдвигается в голубую часть спектра. В 1995 г. два астронома из Женевской обсерватории, Мишель Майор и Дидье Кело, обнаружили, что доплеровское смещение у 51 Пегаса, расположенной недалеко от нас звезды, похожей на Солнце, слегка изменяется, как будто она движется по кругу, то приближаясь к нам, то отдаляясь, а потом снова приближаясь, и так постоянно. По расчетам, ее орбитальная скорость составляла примерно 50 м/с. Астрономы предположили, что вокруг звезды обращается планета размером примерно с Юпитер, и из-за этого звезда обращается вокруг центра масс системы. Если бы масса этой невидимой планеты составляла одну тысячную от массы звезды, то ее орбитальная скорость составляла бы 50 км/с — в тысячу раз быстрее, чем движется звезда.

В конце 1990-х гг. ученые Джоффри Марси и Пол Батлер, работающие в Калифорнии, стали чемпионами в охоте за планетами[2]. С помощью своих приборов они могут зафиксировать изменения длины волны меньшие, чем одна стомиллионная доля, благодаря чему ученые могут измерить эффект Доплера даже для скорости, составляющей одну стомиллионную от скорости света, — 3 м/с[3]. Марси и Батлер нашли доказательства того, что у многих звезд имеются планеты. То, что все обнаруженные ими планеты были большими, как Юпитер, является лишь

следствием ограниченной чувствительности приборов. Землеподобные планеты с массой в несколько сотен раз меньшей, чем масса Юпитера, будут изменять скорость движения звезды всего на несколько сантиметров в секунду, а доплеровское смещение будет составлять всего одну десятимиллиардную[4], а это слишком маленькая величина, чтобы ее можно было обнаружить с помощью имеющихся приборов2.

Нужно отметить, что телескопы, которые используются для поиска планет, имеют средний диаметр зеркала примерно 2 м. Можно только порадоваться, — а иногда и подивиться тому ажиотажу, который сопровождает крупные проекты, — что не для всех важных открытий нужно громоздкое и дорогое оборудование. Упорные, талантливые ученые могут по-прежнему достичь многого, пользуясь скромными, хотя и современными, приборами.

Современный облик нашей Солнечной системы стал результатом множества «несчастных случаев» и совпадений. Каменные астероиды, чья орбита пересекается с орбитой Земли, все еще представляют угрозу. Например, удар десятикилометрового астероида, оставившего огромный подводный кратер неподалеку от Чиксулуба в Мексиканском заливе, вызвал изменение климата, которое, возможно, предопределило судьбу динозавров 65 млн лет назад. Более частыми были столкновения с объектами поменьше, которые тем не менее могут вызывать серьезные разрушения в месте удара. Но когда Солнечная система была молода, столкновения случались гораздо чаще, так как к настоящему времени большая часть существовавших первоначально протопланетных тел разрушены или выброшены из системы. Наша Луна была отколота от Земли в результате столкновения с другой протопланетой — большое количество кратеров на поверхности Луны говорит о том, каким опасным местом была ранняя Солнечная система. Вполне возможно, что Уран подвергся сокрушительному столкновению под косым углом вскоре после того, как сформировался. В противном случае трудно понять, почему он вращается вокруг оси, практически лежащей в плоскости его орбиты, тогда как у всех остальных планет оси вращения расположены более-менее перпендикулярно к плоскости орбиты. Фотографии, полученные с автоматических межпланетных станций, показывают, что все планеты Солнечной системы (и некоторые из наиболее крупных их спутников) очень непохожи друг на друга.

Маловероятно, что другие планетарные системы имеют такое же количество планет в такой же конфигурации, как наша. В некоторых из уже обнаруженных систем есть планеты-гиганты, похожие на Юпитер, которые находятся к своей звезде ближе, чем Меркурий (ближайшая к Солнцу планета). Отчасти это связано с недостатком наблюдений — тяжелые планеты на быстрых короткопериодических орбитах проще обнаружить. Помимо найденных тяжелых планет в тех же системах могут быть более маленькие планеты земного типа.

Жизнь, похожая на земную, может возникнуть только на планетах с особыми условиями. Сила притяжения должна быть достаточно большой, чтобы не дать атмосфере улететь в космос (как это случилось с атмосферой нашей Луны, если она у нее когда-то была). Для того чтобы на поверхности планеты была вода, на ней не должно быть ни слишком жарко, ни слишком холодно, и поэтому она должна находиться на определенном расстоянии от долгоживущей и стабильной звезды. Орбиты таких планет должны быть устойчивыми (т.е. они, скажем, не должны постоянно пересекать путь планеты-гиганта, следующей по орбите с высоким эксцентриситетом). Высокое «количество попаданий» охотников за планетами говорит о том, что у многих похожих на Солнце звезд в нашей Галактике есть свои планеты. Будет просто поразительно, если среди миллиардов кандидатов не найдется множества планет, напоминающих молодую Землю.

В Соединенных Штатах Дэн Голдин, глава NASA, прослывший своего рода оракулом, постоянно твердит, что поиск землеподобных планет — получение их изображения, а не просто доказательство существования по косвенным признакам — должен стать главной задачей космической программы США. Само по себе обнаружение бледного пятнышка — как говорит Карл Саган, «бледной голубой точки» — это трудная задача, которая может потребовать около 15 лет работы. Поэтому в космосе должно быть развернуто большое число телескопов.

Тусклый свет далекого мира несет в себе информацию о его облачном слое, его поверхности (пропорция суши и океанов) и, возможно, даже о суточных и сезонных изменениях. Кроме того, из спектра отраженного планетой света мы можем узнать состав ее атмосферы. Атмосфера Земли богата кислородом. Так было не с самого начала, атмосфера изменилась под воздействием примитивных бактерий в ранний период развития нашей планеты. Конечно, самый интересный

вопрос заключается в том, могло ли такое случиться где-то еще: даже когда планета находится в благоприятных для существования жизни условиях, каков шанс, что возникнут простые организмы, которые создадут биосферу?

От материи к жизни

В последние пять лет прошедшего тысячелетия мы совершенно определенно узнали, что по орбитам вокруг других звезд обращаются планеты. Но мы не слишком приблизились к тому, чтобы выяснить, есть ли в этих далеких гаванях какая-то жизнь. Этот вопрос прежде всего стоит перед биологами, а не перед астрономами. Ответить на него очень непросто, и специалисты никак не могут прийти к единому мнению.

Жизнь на Земле занимает самые разнообразные ниши. Экосистемы, расположенные около горячих сернистых ключей в глубинах океана, указывают на то, что для жизни даже наличие солнечного света не является обязательным. Мы все еще не знаем, как и где зародилась жизнь. Сейчас большую популярность получила версия о бурном вулканическом выбросе, а не о «маленьком теплом пруде» Дарвина, но жизнь могла появиться и глубоко под землей, и даже в молекулах пыли в небесах[5].

Точно так же мы и понятия не имеем о том, какие обстоятельства привели к возникновению жизни на Земле, имели ли они «естественный» характер или были связаны с рядом таких маловероятных событий, которые едва ли когда-либо повторятся на другой планете где-либо еще в Галактике. Именно поэтому очень важно обнаружить жизнь, пусть даже в простой форме, или хотя бы ее следы где-либо еще в Солнечной системе. В фокусе внимания, начиная еще с XIX в., находится Марс: в течение ближайших нескольких лет на Красную планету приземлится целая армада космических аппаратов, которые будут анализировать ее поверхность, облетят вокруг планеты и (в более поздних миссиях) вернутся на Землю с образцами. Жизнь также может существовать в покрытых льдом океанах ледяных спутников Юпитера — Европы и Каллисто, и существуют планы высадить на эти тела станции, которые смогут выполнить исследования того, что находится под слоем льда.

Если бы в Солнечной системе жизнь зародилась дважды, можно было бы предполагать, что вся Галактика ею изобилует, по крайней мере в простых формах. Такое заключение, имеющее огромное значение, требует наличия двух независимых источников возникновения жизни. Есть еще важная оговорка: скажем, если метеориты с Марса могли добраться до Земли, то вполне возможно, что все мы марсиане. И наоборот: жизнь на Марсе могла появиться из встречного потока земного материала!

От простейшей жизни к разуму

По крайней мере в общих чертах нам известны сложная история и случайные обстоятельства, которые привели к нашему появлению на Земле. Миллиард лет примитивные организмы вырабатывали кислород, изменяя ядовитую атмосферу молодой Земли и подготавливая условия для развития многоклеточной жизни. Окаменелые ископаемые останки рассказывают нам о том, что плавающие и ползающие создания в изобилии существовали во время кембрийского периода — 550 млн лет назад. В течение следующих 200 млн лет состоялось появление растений на суше, и благодаря этому возникла среда обитания представителей экзотической фауны — стрекоз размером с морскую чайку, многоножек длиной в метр, скорпионов и амфибий. Затем пришло время динозавров, чьи традиционные образы глупых и вялых животных в последнее время сменились гораздо более динамичными (в соответствии с последними научными данными) в таких фильмах, как «Парк юрского периода». Динозавры были сметены с лица Земли самой неожиданной и непредсказуемой из всех катастроф — столкновением Земли с астероидом, что привело к гигантским волнам и выбросам пыли, которая многие годы закрывала небо. Это происшествие открыло путь для млекопитающих — предков человека.

Но даже если бы мы знали о том, что примитивная жизнь была широко распространена во Вселенной, вопрос о разумной жизни все еще оставался бы открытым. За всю ее долгую историю в биосфере нашей планеты плавало, ползало и летало величайшее разнообразие видов (большинство из которых исчезло). Мы появились в результате того, что в нужное время нам выпал шанс: если эволюцию переиграть, итог будет другим. Казалось бы, ничто не предвещало развития разума; на самом деле многие ведущие ученые, занимающиеся теорией эволюции, считают, что даже если простая жизнь и распространена на просторах космоса, то разум может

встречаться значительно реже. Мы все еще знаем слишком мало, чтобы оценить реальное положение дел, но нет никакой причины становиться непреклонными скептиками.

Невероятная, захватывающая многогранность биологической эволюции и разнообразие жизни на Земле заставляют нас понимать, что в мире, где нет жизни, все гораздо проще. И эта простота — или, по крайней мере, относительная простота — это характерная черта тех объектов, которые изучают астрономы. Есть вещи, которые трудно понять, потому что они сложные, а не потому, что большие. Задача досконально изучить, как атомы соединяются в живые существа — здесь, на Земле, а возможно, и в других мирах, — достаточно сложна, чтобы сделать разгадку происхождения жизни более обескураживающей, чем решение любой из космологических проблем. Тем не менее по этой причине я не думаю, что стремиться понять нашу огромную Вселенную — это слишком большая самонадеянность.

Понятие «множества обитаемых миров» все еще остается уделом теоретиков, как это было с древнейших времен до наших дней. В 2000 г. минуло 400 лет со дня смерти Джордано Бруно, сожженного на костре в Риме. Он считал, что:

В космосе существует бесчисленное множество созвездий, солнц и планет; мы видим только солнца, потому что они дают свет; планеты остаются невидимыми, потому что они маленькие и темные. Существует множество земель, обращающихся вокруг своих солнц, и эти земли не хуже и не меньше нашей планеты. Поэтому почему бы не допустить, что на небесных телах, которые могут быть куда более роскошными по сравнению с тем, что досталось нам, могут обитать существа, похожие на тех, что населяют нашу человеческую землю, или даже превосходящие их[6].

Со времен Бруно это мнение широко распространилось. В XVIII в. великий астроном Уильям Гершель, открывший планету Уран, полагал, что планеты, Луна и даже Солнце обитаемы. В 1880-х гг. Персиваль Лоуэлл, богатый американец, построил свою собственную обсерваторию в городе Флагстафф в Аризоне в основном для того, чтобы изучать Марс. Он считал, что «каналы» (которые, как сейчас известно, «появились» в результате того, что желаемое приняли за действительное, а также по причине оптических иллюзий) являются ирригационными сооружениями, чтобы провести воду от замороженных полярных шапок в «пустыни» экваториальной зоны. В 1900 г. французский фонд учредил премию Гузмана размером 100 000 франков за первый контакт с внеземными видами. Предусмотрительность заставила учредителей исключить Марс: ведь тогда считалось, что обнаружить марсиан — это слишком простая задача.

Общая культура с инопланетянами?

Инициаторами поисков внеземных цивилизаций были ученые института SETI[7] в Маунтин-Вью, штат Калифорния. Усилия были сосредоточены на поисках радиосигналов искусственного происхождения. В проекте использовались различные крупные радиотелескопы, расположенные по всему миру. Этот вариант знаком нам и по фантастическим произведениям, таким как «Контакт» Карла Сагана (где он в целом оправдал себя). Но радио — это не единственный вероятный способ передачи информации: узкие лучи лазеров могут преодолеть межзвездные расстояния с достаточно скромными затратами энергии. У нас уже есть технологии, с помощью которых мы, если этого пожелаем, можем заявить о своем присутствии на расстоянии в множество св. лет, использовав один из упомянутых методов. На самом деле постоянное излучение радиопередатчиков, радаров и прочей техники, расположенной по всему миру, в любом случае выдаст наше присутствие каким-нибудь инопланетянам с чувствительными радиотелескопами. Нам так мало известно о происхождении и возможном развитии жизни, что очень трудно предугадать, какой метод обнаружения лучше сработает. Поэтому имеет смысл использовать любую доступную методику и быть готовыми к любому возможному развитию событий. Но мы не должны забывать о «наблюдательной селекции»: даже если мы что-то обнаружим, мы не сможем сделать уверенный вывод о типичности данного сигнала, поскольку из-за того, что наши приборы и методы ограниченны, мы делаем пристрастный и неполный отбор из того, что может существовать в действительности.

Возможно, разумной жизни больше нигде нет. Если же такая жизнь существует, она может находиться на планетах, полностью покрытых водой, где «супердельфины» наслаждаются созерцательной жизнью в океане, не предпринимая ничего, что помогло бы их обнаружить. Высока вероятность того, что успеха в поисках внеземного разума достичь не удастся, но

планомерные поиски искусственных сигналов — это игра, которая стоит свеч благодаря философскому смыслу любого поиска. Очевидный искусственный сигнал — даже если он будет таким скучным, как список простых чисел или знаков после запятой в числе π, — будет свидетельствовать о том, что «разум» на Земле не уникален и возможен где-то еще. Ближайшие места, где такое могло случиться, находятся так далеко, что сигналу потребуется много лет, чтобы до нас добраться. Только по этой причине передача будет преимущественно в один конец. На то, чтобы послать обдуманный ответ, будет достаточно времени, но обменяться межзвездными остротами не получится!

Любые далекие существа, способные с нами связаться, будут иметь представления о математике и логике, схожие с нашими. Также у них будут схожие знания об основных частицах и силах, которые управляют Вселенной. Их среда обитания может быть другой (а биосфера отличаться еще сильнее), но их тела и их планета будут состоять из таких же атомов, как те, что есть у нас на Земле. Для них, как и для нас, самыми важными частицами будут протоны и электроны: один электрон, обращающийся вокруг протона, — это атом водорода, а электрические токи и радиопередатчики требуют потоков электронов. Протон в 1863 раза тяжелее электрона, и это число будет иметь одно и то же значение для любого разума, способного передавать радиосигналы и заинтересованного в этом занятии. Все основные силы и законы природы будут теми же самыми. На самом деле это единообразие, без которого наша Вселенная была бы совершенно непостижимым местом, распространяется даже на самые отдаленные галактики, доступные астрономам для изучения. (Тем не менее в следующих главах этой книги будут рассуждения о других вселенных, которые навсегда останутся за пределами досягаемости наших телескопов и где могут действовать другие законы.)

Понятно, что инопланетные существа не будут пользоваться метрами, килограммами и секундами. Но мы можем обмениваться информацией о соотношениях двух масс (таких, как, например, соотношение массы протона и электрона) или двух длин. Это «чистые числа», не зависящие от единиц измерения, которыми мы пользуемся: утверждение о том, что одна палка в 10 раз длиннее другой, верно (или неверно), независимо от того, меряем мы длину в футах, метрах или каких-то инопланетных единицах измерения. Как говорил физик Ричард Фейнман, он мог бы рассказать инопланетным существам, что его рост составляет 17 млрд атомов водорода, и они бы его поняли.

Разумная жизнь может не иметь вообще никакого интеллектуального сходства с нашей. Но любые существа, которые передают нам сигналы, должны иметь определенные достижения в области физики. Если у них есть какие-то способности к размышлению, они, безусловно, разделяют наше любопытство по поводу космического события, которое привело к возникновению нас всех. Они, скорее всего, будут интересоваться устройством нашей Вселенной — звездами и галактиками, тем, что в ней находится, как она расширяется, а также ее окончательной судьбой. Эти знания станут частью общей культуры, которую мы разделим с инопланетянами. И как и мы, они отметят, что для нашей общей Вселенной важны несколько ключевых чисел.

Темой этой книги стали шесть таких чисел. Они определяют основные характерные черты Вселенной: то, как она расширяется; могут ли формироваться планеты, звезды и галактики; и может ли быть «химическая» предрасположенность к эволюции. Более того, природа Вселенной заметно чувствительна к этим числам. Если вы представляете себе пульт управления Вселенной с шестью шкалами, то их настройка должна быть очень точной, чтобы создать вселенную, в которой может возникнуть жизнь. Был ли это Промысел Божий или случайность? Являются ли эти числа результатом «теории всего», которая могла определить их единственным образом? Ни одна их этих интерпретаций не выглядит убедительной. В качестве альтернативы я полагаю, что эта явная «настройка» заставляет задуматься о чем-то более значительном: о том, что наблюдаемая нами Вселенная — все, что мы можем видеть с помощью наших телескопов, — это всего лишь часть более крупного образования, в котором могут отличаться даже физические законы. Это всего лишь предположение, но оно вполне сопоставимо с современными теориями.

Мы знаем, что так же, как Земля обращается вокруг Солнца, вокруг других звезд обращаются планеты. Мы можем задаваться вопросом, какие на них условия. Не слишком ли слабая гравитация, чтобы удержать атмосферу? Не слишком ли жарко, холодно или сухо, чтобы зародилась жизнь? Возможно, только на немногих планетах окружающая среда подходит для

жизни. Таким образом, в гораздо более крупном масштабе может существовать бесчисленное множество других вселенных, которые мы не можем наблюдать, потому что их свет никогда до нас не доберется. Будут ли они подходить для того вида эволюции, который произошел по крайней мере на одной планете, обращающейся вокруг одной звезды в нашей родной Вселенной? В большинстве из них шесть чисел могут иметь другие значения, поэтому только небольшая часть вселенных будет «настроена» на существование жизни. Нас не должно сильно удивлять то, что в нашей Вселенной эти числа кажутся настроенными чудесным образом, как не удивляет нас тот факт, что мы обитаем на весьма специфической планете, чья сила притяжения позволяет удерживать атмосферу, с температурой, при которой может существовать вода, движущейся по орбите вокруг стабильной, долгоживущей звезды.

---

1 Изображения, отражающие весь диапазон масштабов нашей Вселенной от самых больших к самым маленьким, впервые были представлены голландцем Кисом Биком в книге «Космическая точка зрения: Вселенная в сорока прыжках» (Cosmic View: the Universe in Forty Jumps, John Day, 1957). Эти изображения развились далее и стали популярны после выхода книги и фильма под названием «Степени десяти» (Powers of Ten), представленных Чарльзом и Рэй Имз совместно с Филиппом и Филлис Моррисон (W. H. Freeman, 1985).

глава 3

Огромное число N: сила тяготения в космосе

Кто же поверит в муравья в теории?
Или в жирафа схему?
Десять тысяч докторов любой категории
Пол-леса сведут в теорему.
Джон Чиарди

«Часовой механизм» Ньютона

Если бы мы решили организовать лекции для разумных существ с других планет, было бы естественно начать с гравитации или силы тяготения. Эта сила удерживает планеты на их орбитах и связывает звезды. В более крупном масштабе целые галактики — скопления миллиардов звезд — управляются силой тяготения. Ни одно вещество, ни один вид частиц, ни даже сам свет не избегают ее влияния. Гравитация управляет расширением всей Вселенной и, возможно, предопределит ее окончательную судьбу.

Сила тяготения по-прежнему остается таинственной. Она озадачивает больше, чем любая другая сила природы. Но это была первая сила, описанная математическим путем. В XVII в. сэр Исаак Ньютон рассказал нам, что притяжение между двумя любыми объектами подчиняется «закону обратных квадратов». Сила ослабевает пропорционально квадрату расстояния между двумя телами: разместите их в два раза дальше друг от друга, и притяжение между ними станет в четыре раза слабее. Ньютон понял, что сила, которая заставляет яблоки падать на землю и управляет траекторией выпущенного из пушки ядра, — это та же самая сила, которая удерживает Луну на ее орбите вокруг Земли. Он доказал, что его закон объясняет эллиптическую форму планетарных орбит — убедительная демонстрация способности математики предсказывать, как работает «часовой механизм» мира природы.

Великий труд Ньютона «Математические начала натуральной философии» (Philosophiæ Naturalis Principia Mathematica), опубликованный в 1687 г., — это трехтомник, содержащий тексты на латинском языке, обрамленные детально разработанными теоремами, в основном геометрического характера. Это памятник выдающегося научного интеллекта тысячелетия. Несмотря на непривлекательный образ жизни, влияние Ньютона было огромным и коснулось даже поэтов и философов. Оно распространилось и на более широкую аудиторию: например, в 1737 г. появилась книга, озаглавленная «Ньютонианство для леди» (Newtonianism for Ladies). Сущность его теории тяготения была изложена и в более доступной книге «Система мира» (The System of the World).

В этой более поздней работе основная мысль подробно проиллюстрирована картинкой, где из пушки, стоящей на вершине горы, стреляют ядрами параллельно поверхности Земли. Чем

быстрее они летят, тем дальше могут улететь до того, как упадут на землю. Если скорость будет очень высока, Земля уйдет из траектории ядра и оно выйдет на орбиту. Требуемая скорость (около 8 км/с), разумеется, была недостижима для пушек времен Ньютона, но сегодня у нас есть искусственные спутники, которые остаются на своих орбитах именно благодаря этой скорости. Сам Ньютон показал, что та же самая сила удерживает планеты на их эллиптических орбитах вокруг Солнца. В более крупном масштабе тяготение действует на скопления звезд и на галактики, где миллиарды звезд обращаются вокруг общего центра.

В недрах Солнца и других звезд поддерживается равновесие между силой тяготения, удерживающей раскаленное звездное вещество, и давлением этого вещества, которое, если бы не действовало притяжение, заставило бы звезды разлететься на части. В атмосфере нашей собственной Земли давление на уровне поверхности точно так же уравновешивает вес всего того воздуха, который находится над нашими головами.

Тяготение в большом и малом масштабах

Притяжение нашей Земли оказывает более сильный эффект на крупные объекты. Когда продюсеры фильмов-катастроф используют модель, чтобы изобразить, например, рушащийся мост или плотину, эти объекты должны быть сделаны не из настоящих стали и бетона, но из очень хрупких материалов, которые погнутся или разобьются от падения с высоты стола. И чтобы выглядеть реалистичными, эти кадры должны быть сняты в ускоренном режиме, а потом прокручены с замедлением. Даже когда все сделано очень тщательно, можно найти подсказки, которые указывают нам на то, что перед нами — миниатюрная модель, а не реальный объект. Например, маленькие волны в резервуаре с водой сглаживаются из-за поверхностного натяжения (той силы, которая удерживает форму дождевых капель), но этот эффект ничтожно мал, если смотреть на настоящую бурную реку или океанские волны. Поверхностное натяжение позволяет водомеркам бегать по воде, но мы из-за своего веса этого делать не можем.

Размер критически важен для биологического мира. Крупные животные — это не просто раздутые варианты маленьких, у них другие пропорции, к примеру более толстые ноги относительно роста. Представьте себе, что вы в два раза увеличили животное, но оставили его форму той же самой. Его объем и вес стали бы в 8 (2^3) раз больше, а не увеличились бы всего вдвое, в то время как поперечное сечение ног возросло бы только в 4 (2^2) раза и конечности были бы слишком слабыми, чтобы удержать такое тело. Ему бы потребовалась иная конструкция. Чем больше существо, тем тяжелее оно падает: «годзиллам» потребовались бы ноги толще, чем их тело, и они не пережили бы падения. С другой стороны, мыши могут забраться по вертикальной стене и безо всякого вреда пережить падение с высоты, намного превышающей их рост.

Галилей (который умер в тот год, когда родился Ньютон) был первым, кто четко понял эту зависимость от размера. Он писал:

С другой стороны, и природа не может произвести деревьев несоразмерной величины, так как ветви их, отягощенные собственным чрезвычайным весом, в конце концов сломились бы… уменьшая размеры тел, мы не уменьшаем в такой же пропорции их прочности; в телах меньших замечается даже относительное увеличение ее, так, я думаю, что небольшая собака может нести на себе двух или даже трех таких же собак, в то время как лошадь едва ли может нести на спине одну только другую лошадь, равную ей по величине[8].

Таким же образом ограничивается и размер птиц (ограничения являются более строгими для птиц типа колибри, которые могут зависать на месте, трепеща крыльями, а не для альбатросов, которые планируют), но для плавающих существ ограничения не являются такими строгими, поэтому-то в океанах и возможно существование левиафанов. Напротив, слишком маленький размер ведет к проблемам другого рода — большая площадь кожи относительно массы. В результате тепло быстро теряется и маленькие млекопитающие и птицы должны много есть и иметь быстрый метаболизм, чтобы сохранить тепло.

Подобные закономерности должны быть справедливы и для других миров. Например, физик Эдвин Солпитер вместе с Карлом Саганом размышляли о сложной экологии гипотетических шарообразных существ, которые могли бы выжить в плотной атмосфере Юпитера. У каждого нового поколения возникала бы одна и та же проблема гонки со временем: они должны вырасти

достаточно большими, чтобы достичь нулевой плавучести, до того как притяжение расплющит их в темных глубинных слоях с высоким давлением.

Значение числа N и почему оно так велико

Несмотря на всю свою важность для нас, нашей биосферы и космоса, тяготение на самом деле является удивительно слабым по сравнению с другими силами, которые действуют на атомы. Электрические заряды с противоположными знаками притягиваются друг к другу: атом водорода состоит из положительно заряженного протона с единственным (отрицательно заряженным) электроном, пойманным на орбите вокруг протона. Согласно законам Ньютона, два протона будут притягивать друг друга под действием силы притяжения (гравитации), а также подвергаться воздействию электрической силы отталкивания. Обе эти силы одинаково зависят от расстояния (обе подчиняются закону «обратных квадратов»), и поэтому их относительная сила зависит от очень важного числа N, на которое не влияет, насколько далеко находятся протоны друг от друга. Когда два атома водорода соединяются вместе в молекулу, электрическая сила отталкивания между двумя протонами нейтрализуется двумя электронами. Гравитационное притяжение между протонами в 1036раз слабее электрических сил и практически неизмеримо. Химики спокойно могут не обращать на него никакого внимания, когда изучают, как группы атомов соединяются для формирования молекул.

Тогда почему гравитация является доминирующей силой, прижимающей нас к земле и удерживающей Луну и планеты на их орбитах? Это происходит потому, что сила притяжения — это всегда притяжение: если вы удвоите массу, вы удвоите силу притяжения, которая при этом возникает, в то время как электрические заряды могут как отталкивать друг друга, так и притягивать, они могут быть и положительными, и отрицательными. Два заряда удваивают силу одного из них, только если у них одинаковый знак. Но любой предмет в нашей повседневной жизни состоит из огромного количества атомов, у каждого из которых имеется положительно заряженное ядро, окруженное отрицательно заряженными электронами, — положительные и отрицательные заряды практически полностью нейтрализуются. Даже когда мы «заряжаемся» так, что у нас приподнимаются кончики волос, из равновесия выходит меньше чем один заряд из миллиарда миллиардов. Но по отношению к «гравитационному заряду» все на свете имеет один и тот же знак, поэтому сравнительно с электрическими силами притяжение выигрывает по отношению к более крупным, чем атомы, объектам. Равновесие электрических сил только слегка нарушается, когда твердое тело сжимают или растягивают. Яблоко падает, только когда совместное притяжение всех атомов Земли может одержать победу над электрическим притяжением в черенке, которым оно крепится к ветке дерева. Гравитация играет для нас важную роль, потому что мы живем на тяжелой Земле.

Мы можем дать этому количественную оценку. В главе 1 мы вообразили ряд фотографий, каждая из которых делалась с расстояния, увеличенного в 10 раз по сравнению с предыдущим. Теперь представьте себе ряд сфер различного размера, содержащих соответственно 10, 100, 1000… атомов; другими словами, каждая последующая сфера в 10 раз тяжелее, чем каждая предыдущая. 18-я будет размером с песчинку, 29-я — с человека, а 40-я — с крупный астероид. При каждом увеличении массы в тысячу раз объем также увеличивается в тысячу раз (при условии, что сферы имеют одинаковую плотность), но радиус возрастает только в 10 раз. Значимость собственной силы притяжения сферы, измеряемой количеством энергии, которая потребуется на то, чтобы атом мог преодолеть действие этой силы, зависит от массы сферы, деленной на радиус3, и возрастает в сотню раз. В масштабе атомов сила притяжения начинается с 10–36, но она усиливается в 10^2 (иначе говоря, 100) раз при увеличении массы на каждые три степени 10 (т.е. в 1000 раз). Таким образом, притяжение наверстает упущенное на 54-м объекте ($54 = 36 \times 3 / 2$), когда масса станет примерно равной массе Юпитера. В любом твердом образовании, которое по массе больше Юпитера, притяжение так сильно, что преодолевает силы, удерживающие твердые тела вместе.

Песчинки и крупинки сахара, как и мы, испытывают на себе притяжение массивной Земли. Но их собственная гравитация — то притяжение, которое дают составляющие их атомы, в отличие от земного тяготения, пренебрежимо мало. Собственная сила тяжести не важна и для астероидов, и для двух спутников Марса, напоминающих по форме картофелины, — Фобоса и

Деймоса. Но такие большие тела, как планеты (и даже наша собственная крупная Луна), недостаточно жестки, чтобы сохранять неправильную форму: сила тяжести сделала их практически шарообразными. А массы, превышающие массу Юпитера, будут сдавлены собственной силой тяжести до огромной плотности, если только их центр не будет оставаться достаточно горячим, чтобы поддерживать равновесие за счет давления, как это происходит с Солнцем и другими звездами. Именно из-за того, что притяжение является таким слабым, среднестатистическая звезда, такая как Солнце, может быть такой тяжелой. При меньших объемах притяжение не может конкурировать с давлением, как не может и сжать вещество, чтобы нагреть его до той степени, когда оно начинает светиться.

Масса Солнца примерно в тысячу раз больше массы Юпитера. Если бы оно было холодным, притяжение сжало бы его в миллионы раз плотнее, чем обычное твердое тело. Оно превратилось бы в белого карлика размером примерно с Землю, но в 330 000 раз тяжелее. Но на самом деле солнечное ядро имеет температуру 15 млн градусов — оно в тысячи раз горячее его светящейся поверхности, и давление этого чрезвычайно горячего газа «раздувает» Солнце и позволяет ему оставаться в устойчивом равновесии.

Английский астрофизик Артур Эддингтон одним из первых понял физическую природу звезд. Он размышлял о том, как много мы могли бы узнать о них, если бы представляли их чисто теоретически, обитая на постоянно покрытой облаками планете. Разумеется, мы не могли бы предполагать, сколько звезд существует, но простое рассуждение о тех границах, о которых я только что говорил, могло бы сказать нам, насколько звезды велики. Не слишком трудно продолжить это рассуждение и подсчитать, насколько ярко должны сиять такие объекты. В заключение Эддингтон говорит: «Отстраним теперь завесу из облаков, которая окутывала нашего физика, и позволим ему взглянуть на небо. Он найдет на нем тысячи миллионов газовых шаров, и масса каждого из них лежит между [вычисленными им] массами»[9].

Сила тяготения слабее сил, управляющих микромиром, в 1036 раз — это и есть число N. А если бы тяготение не было таким относительно слабым? Представьте себе, например, вселенную, где гравитация слабее электрических сил «всего» в 1030 раз, а не в 1036. Атомы и молекулы в ней будут вести себя точно так же, как и в нашей реальной Вселенной, но предметам вовсе не будет необходимости быть такими большими, чтобы тяготение могло конкурировать с другими силами. В этой воображаемой вселенной количество атомов, нужное, чтобы создать звезду (связанный гравитацией термоядерный реактор), будет в миллиард раз меньше. Масса планет тоже уменьшится в миллиард раз. Независимо от того, смогут ли эти планеты оставаться на устойчивых орбитах, сила тяготения будет препятствовать развитию жизни на них. В этом воображаемом мире с сильной гравитацией даже насекомым потребуются толстые ноги, и никакое животное не сможет намного обогнать их в размерах. Притяжение разрушит любое существо ростом с человека.

В подобной вселенной галактики будут формироваться гораздо быстрее и получаться более миниатюрными. Звезды, вместо привычного нам расположения, будут так плотно набиты, что близкие соприкосновения станут достаточно частыми. Это само по себе исключает существование стабильных планетных систем, потому что орбиты будут изменяться из-за проходящих мимо звезд, что (к счастью для нашей Земли) едва ли может случиться в нашей Солнечной системе.

Но еще сильнее развитию сложных экосистем будет препятствовать ограниченное время развития. Из мини-звезд такой вселенной будет быстро уходить тепло: в таком воображаемом мире с сильным притяжением время жизни звезд будет в миллион раз короче. Вместо того чтобы существовать миллиарды лет, обычная звезда проживет всего около 10 000 лет. Мини-солнца сгорят быстрее и истощат всю энергию еще до того, как органическая эволюция успеет сделать первые шаги. Условия для сложной эволюции будут, несомненно, куда менее благоприятными, если тяготение будет сильнее, даже если больше ничего не изменится. Не будет такого громадного запаса времени, необходимого для физических и химических реакций, как в нашей Вселенной. Однако, если построить наши рассуждения по-другому, то даже немного более слабое притяжение могло бы обеспечить куда более сложные и долгоживущие структуры.

Тяготение — организующая сила космоса. В главе 7 мы увидим, насколько оно было важно для того, чтобы позволить различным структурам, среди которых первоначально не было резко

выраженных неоднородностей, развернуться после Большого взрыва. Но это произошло только потому, что тяготение является слабым по сравнению с другими силами, что позволяет существовать большим и долгоживущим структурам. Парадоксально, но чем слабее притяжение (при условии, что оно не равно нулю), тем значительнее и сложнее может быть его влияние. У нас нет никакой теории, которая бы давала нам значение числа N. Все, что мы знаем, — это то, что такое сложное образование, как человечество, не могло развиться, если бы N было куда меньше 1 000 000 000 000 000 000 000 000 000 000 000 000.

От Ньютона к Эйнштейну

Спустя более двух столетий после Ньютона Эйнштейн предложил свою теорию тяготения, получившую название «общая теория относительности» (ОТО). Согласно этой теории, планеты на самом деле следуют прямым путем в «пространстве-времени», но этот путь искривляется из-за присутствия Солнца. Иногда говорят, что Эйнштейн «сверг с пьедестала» ньютоновскую физику, но это заблуждение. Законы Ньютона по-прежнему с высокой точностью описывают движение объектов в Солнечной системе (самым известным противоречием теории Ньютона является небольшая аномалия орбиты Меркурия, объяснимая с помощью теории Эйнштейна). Этот закон вполне отвечает требованиям, необходимым для программирования траекторий автоматических аппаратов, отправляющихся на Луну и другие планеты. Тем не менее теория Эйнштейна, в отличие от теории Ньютона, объясняет явления, происходящие с объектами, движущимися со скоростью, близкой к скорости света, в условиях огромной силы тяготения, которая может быть причиной таких громадных скоростей, и с эффектом гравитационного отклонения самого света. Куда важнее то, что Эйнштейн углубил понимание самого явления гравитации. Для Ньютона оставалось тайной, почему все предметы падают одинаково и следуют по схожим орбитам — почему сила тяготения и инерция для любых веществ имеют одно и то же соотношение (в отличие от электрических сил, где «заряд» и «масса» непропорциональны), но Эйнштейн доказал, что это естественное следствие того, что все тела следуют прямым путем в пространстве-времени, но этот путь искривляется из-за массы и энергии. ОТО, таким образом, стала понятийным прорывом — особенно значительным, поскольку этот прорыв стал следствием озарения Эйнштейна, а не появился в результате какого-либо отдельного эксперимента или наблюдения.

Эйнштейн не доказывал, что Ньютон ошибался, он вышел за рамки теории Ньютона, включив ее в нечто более глубокое и более широко применимое. На самом деле было бы куда лучше (и помогло бы избежать неправильного понимания ее культурного значения), если бы теория Эйнштейна получила другое название. Ее бы стоило назвать не «теорией относительности», а «теорией инвариантности». Достижение Эйнштейна состояло в том, что он разработал систему уравнений, которые можно применить для любого наблюдателя, и выявил феноменальное обстоятельство: скорость света, измеренная в любом месте, является одной и той же, несмотря на то что наблюдатель движется.

Вехами в развитии любой науки является создание все более обобщенных теорий, которые сосредотачивают в себе прежде не связанные факты и расширяют широту охвата тех теорий, которые существовали до них. Физик и историк Джулиан Барбур использует метафору о восхождении в горы4, которая, как мне кажется, выглядит очень правдоподобно:

Чем выше мы поднимаемся, тем более всеохватывающий перед нами открывается вид. Каждая новая точка обзора дает лучшее понимание взаимосвязи вещей. Более того, постепенное накопление понимания перемежается неожиданным и ошеломляющим расширением горизонта, когда мы добираемся до перевала и видим нечто, что и вообразить себе не могли во время подъема. Стоит лишь найти направление в открывшемся пейзаже, наш путь к недавно покоренной вершине становится очевидным и занимает почетное место в новом мире.

Опыт формирует наше восприятие и здравый смысл: мы усваиваем те физические законы, которые напрямую влияют на нас. Законы Ньютона в какой-то мере были усвоены обезьянами, перепрыгивающими с дерева на дерево. Но на далеких просторах космического пространства среда очень отличается от нашей. Мы не должны удивляться тому, что знания, основанные на здравом смысле, не приложимы к огромным космическим расстояниям, высоким скоростям или к очень большой силе тяготения.

Разумное существо, способное быстро перемещаться по Вселенной, но ограниченное основными физическими законами (а не уровнем развития техники), развило бы свое интуитивное восприятие пространства и времени, соединив характерные и кажущиеся невероятными следствия из ОТО. Особое значение, как оказалось, имеет скорость света: к ней можно приблизиться, но ее невозможно превысить. Но это «космическое ограничение скорости» не ограничивает вас в том, куда вы можете добраться за время вашей жизни, потому что, когда космический корабль разгоняется почти до скорости света, часы идут медленнее и время на его борту «растягивается». Тем не менее если вы совершите путешествие до звезды, находящейся в 200 св. годах, а потом вернетесь на Землю, здесь пройдет больше 200 лет, каким бы молодым вы ни оставались. Ваш космический корабль не может лететь со скоростью большей, чем свет (с точки зрения оставшегося дома наблюдателя), но чем ближе ваша скорость приближается к световой, тем меньше вы состаритесь.

Эти явления находятся за пределами интуитивного восприятия только потому, что наш опыт ограничен низкими скоростями. Авиалайнер развивает всего миллионные доли скорости света и недостаточно быстр, чтобы заметить замедление времени: даже для самых активных воздушных путешественников эта задержка составит меньше миллисекунды за всю жизнь. В наше время это крошечное воздействие, тем не менее измерено с помощью экспериментов, где использовались атомные часы, отмеряющие миллиардные доли секунды, и оказалось, что полученные результаты согласуются со значением, предсказанным Эйнштейном.

Относительное замедление времени вызывает сила тяготения: около больших масс часы идут медленнее. Это также практически невозможно ощутить на Земле, поскольку точно так же, как мы привыкли только к «маленьким» скоростям, мы испытываем только «слабое» притяжение. Тем не менее это замедление необходимо учитывать, наряду с явлениями орбитального движения, в программировании потрясающе точной системы глобального позиционирования (GPS).

Мера измерения силы, с которой тяготение действует на тело, — это скорость, с которой должно лететь метаемое тело, чтобы вырваться за пределы притяжения. Для Земли эта скорость составляет 11,2 км/с. По сравнению со скоростью света — 300 000 км/с — это ничтожная скорость, но и ее достижение — задача большой сложности для инженеров-ракетчиков, вынужденных использовать химическое топливо, лишь миллиардная доля так называемой энергии массы покоя (mc^2 Эйнштейна — см. главу 4) которого трансформируется в эффективную мощность. Скорость убегания с поверхности Солнца составляет 600 км/с — и это всего лишь пятая часть 1% скорости света.

«Сильное тяготение» и черные дыры

Теория Ньютона с очень небольшими поправками работает во всей Солнечной системе. Но когда тяготение становится намного сильнее, мы должны приготовиться к сюрпризам. Астрономы нашли такие места — это, к примеру, нейтронные звезды. Такие сверхплотные объекты получаются после взрыва сверхновых (что мы обсудим в следующей главе). Нейтронные звезды обычно в 1,4 раза тяжелее Солнца, но имеют диаметр всего около 20 км. На их поверхности сила тяготения в миллион миллионов раз выше, чем на Земле. Чтобы приподняться на миллиметр над поверхностью нейтронной звезды, нужно больше энергии, чем на то, чтобы вырваться из земного тяготения. Ручка, брошенная с высоты 1 м при таком притяжении, оказала бы воздействие, сравнимое с взрывом тонны тринитротолуола (хотя на самом деле огромная сила тяготения на поверхности нейтронной звезды, разумеется, мгновенно расплющила бы подобные объекты). Брошенному телу понадобилось бы набрать половину скорости света, чтобы покинуть гравитационное поле такой звезды. И наоборот, любой предмет, свободно падающий на нейтронную звезду с большой высоты, столкнулся бы с ее поверхностью на скорости, превышающей половину скорости света.

Теория Ньютона не работает с такой мощной гравитацией, какая возникает вокруг нейтронных звезд, здесь нужна ОТО Эйнштейна. Часы около поверхности такой звезды будут идти на 10–20% медленнее. Свет, идущий с ее поверхности, будет сильно искривляться, поэтому, глядя издалека, вы увидите не просто полусферу, но и часть задней поверхности нейтронной звезды.

Тело в несколько раз меньше или в несколько раз тяжелее нейтронной звезды поглотит весь свет поблизости и станет черной дырой. Пространство вокруг нее будет «сворачиваться». Если Солнце сжать так, чтобы его радиус был равен 3 км, оно станет черной дырой. К счастью, Вселенная уже «провела» такие эксперименты за нас: известно, что в космосе имеются объекты, которые схлопнулись и отрезали себя от окружающего мира.

В нашей Галактике есть много миллионов черных дыр, масса которых примерно в десять раз больше солнечной. Эти черные дыры являются окончательным состоянием массивных звезд или результатом их столкновений. Когда такие объекты «изолированы» в пространстве, их очень трудно обнаружить. Это можно сделать, только наблюдая за гравитационным воздействием, которое они оказывают на другие тела или лучи света, проходящие близко от них. Легче найти те черные дыры, которые вместе с вращающейся вокруг них обычной звездой образуют двойные системы. Метод обнаружения здесь похож на тот, который используется, чтобы высчитать наличие планет по их влиянию на движение звезды, вокруг которой они вращаются. В случае с черными дырами задача упрощается, поскольку видимая звезда имеет массу меньше, чем у темного объекта (вместо того чтобы быть в тысячу или более раз тяжелее, как звезда по сравнению с планетой), и поэтому обращается по более широкой и быстрой орбите.

Астрономы всегда особенно интересуются самыми «предельными» явлениями в космосе, потому что, изучая их, мы с большей степенью вероятности узнаем что-нибудь качественно новое. Возможно, самым значительным из всех является удивительно мощное излучение, которое называется «гамма-всплеском». Эти явления, такие мощные, что на несколько секунд затмевают миллион галактик с их звездами, возможно, указывают на черные дыры в момент их образования.

Самые большие черные дыры находятся в центрах галактик. Мы обнаруживаем их присутствие, наблюдая интенсивное свечение окружающего их газа или обнаруживая очень быстрое движение звезд, проходящих неподалеку от них. Звезды, находящиеся очень близко от центра нашей собственной Галактики, обращаются вокруг него очень быстро, как будто испытывают воздействие силы тяготения от темной массы — черной дыры, которая эквивалентна по массе 2,5 млн Солнц[10]. Размер черной дыры пропорционален ее массе, соответственно, черная дыра в центре нашей Галактики имеет радиус 6 млн км. Некоторые из самых чудовищных черных дыр, находящихся в центрах других галактик, весят как несколько миллиардов Солнц, а по размеру огромны, как целая Солнечная система. Тем не менее по сравнению с галактиками, в центре которых они находятся, черные дыры очень невелики.

Какими бы необычными и непознаваемыми визуально ни были черные дыры, их на самом деле проще описать, чем любые другие небесные объекты. Структура Земли зависит от ее эволюции и состава; планеты такого же размера, обращающиеся вокруг других звезд, разумеется, будут во многом отличны от Земли. А Солнце, по существу являющееся огромным шаром постоянно испытывающего вихревое движение раскаленного газа, выглядело бы по-другому, если бы состояло из других атомов. Но черная дыра «теряет всю память» о том, как она сформировалась, и быстро приходит к «штатному» гладкому состоянию, которое описывается всего двумя величинами: сколько массы она смогла поглотить и как быстро вращается. В 1963 г., задолго до того, как появились доказательства существования черных дыр, — даже до того, как американский физик Джон Арчибальд Уилер предложил само название «черная дыра»[11], — теоретик из Новой Зеландии Рой Керр получил решение уравнений Эйнштейна для вращающегося объекта. Позже работы других ученых привели к потрясающему результату — все, что схлопывается (коллапсирует), превращается в черную дыру, которую точно описывает формула Керра. Черные дыры стандартизированы так же хорошо, как элементарные частицы. Теория Эйнштейна точно говорит нам, как они искажают пространство и время и какую форму имеет их «поверхность».

Относительно черных дыр наши представления о пространстве и времени терпят крах. Свет движется по прямому пути, но в сильно искривленном пространстве он может оказаться сложным завитком. Также около черных дыр время идет очень медленно (даже медленнее, чем около нейтронных звезд). Напротив, если вы сможете зависнуть около черной дыры или выйти на ее орбиту, вы увидите, как вся внешняя вселенная ускорится. Вокруг черной дыры существует четкая граница, где для находящегося на безопасном расстоянии наблюдателя стрелки часов (или

падающий экспериментатор внутри границы) будут казаться застывшими, поскольку временно́е растяжение станет почти бесконечным.

Даже свет не может вырваться с этой поверхности. Искажение пространства и времени проявляется настолько сильно, как будто само пространство всасывают внутрь так быстро, что даже направленный наружу луч света втягивается вовнутрь. В черной дыре вы можете двигаться во внешнее пространство не дальше, чем перемещаться во времени вспять.

Вращающаяся черная дыра искажает пространство и время более сложным образом. Чтобы представить себе это, вообразите водоворот. Если вы находитесь далеко от центра водоворота, вы можете плыть в любом направлении, куда только пожелаете, по течению или против него. Ближе к центру вода закручивается быстрее, чем может плыть ваша лодка: вам приходится двигаться по кругу вместе с ее потоком, хотя вы все еще можете плыть наружу или вовнутрь. Но ближе к центру составляющая скорости течения вовнутрь становится много быстрее вашей лодки. Если вы пересечете некий «критический радиус», у вас не будет больше никакого выбора относительно дальнейшей судьбы, и вас втянет внутрь.

Черная дыра заключена в поверхность, которая работает как односторонняя мембрана. Изнутри нельзя передать никакие сигналы коллегам, которые наблюдают с безопасного расстояния. Любой, кто проходит через эту поверхность, попадает в ловушку и обречен на то, чтобы быть втянутым в область, где, согласно уравнениям Эйнштейна, тяготение «становится бесконечным» при конечном времени, измеренном его собственными часами. Эта сингулярность фактически указывает на то, что условия выходят за пределы известной нам физики, как это было, по нашему мнению, в начале существования Вселенной. Таким образом, любой, кто упал в черную дыру, встретится «с концом времени». Не есть ли это предчувствие «Большого схлопывания», которое может стать окончательной судьбой нашей Вселенной? Или у Вселенной бесконечное будущее? Или, возможно, какие-то пока неведомые законы физики смогут защитить нас от такой судьбы?

Как известно, теория Эйнштейна была порождена его удачной мыслью о том, что тяготение неотличимо от движения с ускорением и его невозможно определить в свободно падающем лифте. Тем не менее неравномерность тяготения нельзя игнорировать. Если отряд астронавтов-камикадзе будет свободно падать на Землю, как строй геометрически правильной формы, горизонтальные расстояния между ними будут сокращаться, тогда как вертикальные будут расти. Это происходит потому, что их траектории сходятся в одну точку в центре Земли, и сила тяготения сильнее действует на тех, кто в строю окажется ниже и, следовательно, ближе к Земле. Подобный же эффект будет действовать и на разные части тела каждого астронавта: падая ногами вперед, астронавт будет чувствовать вертикальное растяжение и сжатие с боков. Эта приливная сила, неощутимая для астронавтов при земном тяготении, становится катастрофически большой в черной дыре, что приводит к тому, что объект разрывается на части, превращается в «спагетти» еще до того, как достигнет сингулярности в центре. Астронавт, падающий в черную дыру, имеющую массу звезды, испытает чудовищное воздействие приливной силы до того, как достигнет поверхности дыры; после этого останется всего несколько секунд (по часам астронавта) до встречи с сингулярностью. Но у сверхмассивных черных дыр, находящихся в центрах галактик, приливные эффекты проявляются более мягко: даже после прохождения внутрь через ее поверхность останется несколько часов на исследование, прежде чем слишком большое приближение к центральной сингулярности станет чрезвычайно неприятным5.

Черные дыры в масштабе атомов

Черные дыры представляют собой замечательную теоретическую концепцию, однако они нечто большее, чем просто теория. Доказательств того, что они действительно существуют, сейчас нельзя не признать. Они связаны с некоторыми из самых зрелищных явлений, которые мы наблюдаем в космосе, — квазарами и взрывными выделениями энергии[12]. Все еще продолжаются споры, как именно появляются черные дыры, но нет никаких загадок в том, как тяготение может подавить все остальные силы в мертвой звезде или в облаке газа в центре галактики. Эти процессы образования требуют, чтобы тело было по крайней мере таким же тяжелым, как звезда, потому что, как мы уже видели, на астероидах и планетах притяжение не

может соперничать с другими силами. На самом деле даже физик с постоянно покрытой облаками планеты мог предсказать, что если звезды существуют, то могут существовать и черные дыры, равные по массе звездам.

Размер звезд, определяющий массу черных дыр, которые могут сформироваться сегодня, проистекает, как мы видели, из равновесия между силой тяготения и силами внутри атома. Но в теории Эйнштейна масса никак особо не выделяется. Черные дыры созданы из самой ткани пространства. Поскольку пространство является однородным и непрерывным континуумом, ничего, кроме масштаба, не отличает сформировавшуюся дыру размером с атом, размером с звезду или размером со всю наблюдаемую Вселенную.

Даже дыра размером с атом могла бы иметь массу горы. Черные дыры по определению являются объектами, в которых тяготение подавляет все остальные силы. Для того чтобы сформировалась черная дыра размером в атом, 1036 атомов должны сжаться до одного. Это невыполнимое требование является еще одним следствием огромности числа N, которое измеряет слабость притяжения в масштабе атомов. Что же насчет черных дыр меньших, чем атом? Здесь существует конечный предел (который всплывет в главе 10), связанный с зернистостью пространства в самом мельчайшем масштабе.

Черные дыры в масштабе атомов могли бы сформироваться — если это вообще возможно — только под колоссальным давлением, которое имело место в первые мгновения существования Вселенной. Если такие мини-дыры действительно существуют, то они будут необычайными «отсутствующими звеньями в цепи» между космосом и микромиром.

глава 4

Звезды, периодическая таблица и число ε

Я верю, что листик травы не меньше поденщины звезд.

Уолт Уитмен[13]

Звезды как «термоядерные реакторы»

Насколько стара Земля? Сейчас с помощью измерения радиоактивных атомов установлено, что ей примерно 4,55 млрд лет. Тем не менее убедительные аргументы в пользу древнего возраста нашей планеты выдвигались еще в XIX в. В то время геологи, оценивая степень эрозии и оседания грунта, которые повлияли на формирование земной поверхности, предположили, что возраст Земли составляет по меньшей мере 1 млрд лет. Дарвинисты разделяли их мнение, ссылаясь на свои оценки количества поколений эволюционирующих видов, которые должны были жить на планете до нас. Однако великий физик лорд Кельвин вычислил, что вся внутренняя энергия Солнца должна была истечь наружу и оно бы сдулось всего за 1% этого времени. Он мрачно заявлял: «Обитатели Земли не могут продолжать наслаждаться светом и теплом, так необходимыми для их жизни, больше нескольких миллионов лет, если только в великой кладовке творения для нас не приготовлены другие их источники, сейчас нам неизвестные». Наука XX в. обнаружила, что такие источники действительно существуют и спрятаны они в ядре атома. Водородные бомбы — ужасающее доказательство того, какая энергия скрывается в атоме.

Энергия Солнца рождается в результате преобразования водорода (простейший атом, ядро которого состоит из одного протона) в гелий (тоже простой атом, состоящий из двух протонов и двух нейтронов). Попытки поставить на службу человеку термоядерную реакцию как источник энергии (управляемый термоядерный синтез) пока что зашли в тупик из-за того, что трудно получить необходимые температуры во много миллионов градусов. Еще большей проблемой является необходимость сохранять этот чрезвычайно горячий газ где-то в лаборатории — очевидно, что он расплавит любой контейнер, и поэтому его приходится удерживать с помощью магнитных ловушек. Но Солнце имеет такую большую массу, что сила тяготения удерживает располагающиеся дальше от ядра более холодные слои и, таким образом, «прижимает крышку» к ядру с высоким давлением. Структура Солнца способствует тому, чтобы в его ядре генерировалась ядерная энергия, которая распространяется во внешние слои именно до того уровня, который необходим, чтобы уравновесить потери тепла с поверхности звезды — того самого тепла, которое является основой жизни на Земле.

Это топливо заставляет Солнце сиять уже почти 5 млрд лет. Но когда оно начнет иссякать, примерно еще через 5 млрд лет, солнечное ядро начнет сжиматься, а его внешние слои — расширяться. За 100 млн лет — достаточно короткий период по сравнению с общей продолжительностью его жизни — Солнце станет ярче и превратится в звезду, которую называют красным гигантом, поглотив ближайшие планеты и испарив любую жизнь, которая останется на Земле. Часть его внешних слоев будет сброшена, а ядро в конечном итоге превратится в белый карлик, который будет освещать тусклым голубым светом, не ярче теперешней Луны, жалкие останки Солнечной системы.

Астрофизики вычислили, какие процессы должны происходить внутри нашего Солнца, и достигли того, чтобы их расчеты соответствовали наблюдаемым радиусу, температуре, яркости и т.д. Они с полной определенностью могут сказать, каковы условия в самой глубине Солнца. Также они могут высчитать, как оно будет развиваться в следующие несколько миллиардов лет. Очевидно, что напрямую эти расчеты проверить невозможно. Тем не менее мы можем наблюдать другие звезды, похожие на Солнце и находящиеся на разных стадиях своего развития. Если иметь по одному «моментальному снимку» из жизни каждой звезды, то не будет никаких особых препятствий для того, чтобы составить более крупную подборку, состоящую из звезд, родившихся в разное время, и доступную для изучения. Подобным образом, приземлившемуся марсианину не потребуется много времени, чтобы понять этапы жизненного цикла людей (или деревьев), наблюдая большое количество экземпляров, находящихся на разных стадиях развития. Даже среди соседних звезд мы можем распознать те, которые еще очень молоды и имеют возраст не более миллиона лет, а также другие, которые находятся в предсмертном состоянии и уже, возможно, поглотили когда-то окружавшую их свиту из планет.

Эти выводы основываются на предположении о том, что атомы и их ядра одинаковы повсюду. Величайшим прозрением Ньютона было то, что он связал воедино роль гравитации на Земле с поведением небесных тел. Однако он описывал только движение тел нашей Солнечной системы. Потребовалось куда больше времени, чтобы понять, что гравитация важна и для других звезд и даже — других галактик. В древние времена считалось, что небесная сфера сделана из особого вещества, эфира, более чистого, чем земля, воздух, огонь и вода земного происхождения. До середины XIX в. не было никаких догадок по поводу того, из чего состоят звезды. Использование призмы для расщепления света в радугу позволило установить, что свет Солнца и других звезд содержит детали, которые указывают на хорошо известные на Земле атомы. Состав «звездной начинки» не отличался от атомов «подлунной сферы».

Так же легко, как и этапы эволюции Солнца, астрофизики могут вычислить жизненный цикл звезд, которые, скажем, в два раза или в десять раз тяжелее нашей звезды. Более мелкие звезды сжигают свое топливо медленнее. Напротив, звезды, которые в десять раз тяжелее Солнца, — например, четыре голубые звезды, которые расположены трапецией в созвездии Ориона, — светятся в тысячи раз ярче и расходуют свое топливо быстрее. Их срок жизни гораздо короче, чем у Солнца, и заканчивают свой век они более экстремально, взрываясь, как сверхновые. В течение нескольких недель они сияют, как несколько миллиардов Солнц. Внешние слои таких звезд под воздействием взрывной волны, которая врезается в окружающий их межзвездный газ, разлетаются со скоростью 20 000 км/с.

24 февраля 1987 г. канадский астроном Йан Шелтон вместе со своим чилийским коллегой проводили рутинные наблюдения в обсерватории Лас Кампанас на севере Чили. Они заметили в южной части неба необычный блеск, который был так ярок, что его можно было видеть невооруженным глазом. В предыдущие ночи ничего подобного не было. Оказалось, что это самая близкая сверхновая из всех, наблюдавшихся в наши дни. В течение нескольких недель, на которые пришелся пик ее сияния, и в течение нескольких последующих лет, когда она постепенно тускнела, на звезду были нацелены все самые современные приборы, которыми располагали астрономы. Явление позволило проверить теории о колоссальном взрыве. Это единственная сверхновая, у которой нам известна звезда-предшественница[14]: старые фотографические пластины показывают, что на ее месте находилась голубая звезда примерно в 20 раз тяжелее Солнца.

Сверхновая представляет собой катастрофическое событие в жизни звезды и связана с несколькими экстремальными физическими процессами, поэтому вполне естественно, что

сверхновые привлекают астрономов. Но только один человек на 10 000 является астрономом[15]. Какая связь может быть между этими взрывами звезд в тысячах св. лет от нас и всеми остальными людьми, чьи дела связаны с тем, что происходит на Земле или около нее? Ответ на этот вопрос просто удивителен: они являются основополагающими для того мира, в котором мы все живем. Без них нас бы просто не существовало. Сверхновая создала ту смесь атомов, из которых сделана Земля и которые стали строительным материалом для замысловатой химии жизни. Со времен Дарвина нам известно об эволюции и естественном отборе, которые предшествовали нашему появлению, и о нашей связи со всей остальной биосферой. Сейчас астрономы находят признаки того, что наша Земля берет начало от звезд, которые умерли до того, как сформировалась Солнечная система. Эти древние звезды состояли из атомов, из которых состоит наша планета и мы сами.

Алхимия в звездах

В природе атомы существуют в 92 разновидностях, что мы видим в периодической таблице Менделеева. Место каждого атома в ней зависит от числа протонов в его ядре. Таблица начинается атомом водорода, который стоит под №1, и заканчивается ураном под №92[16]. Ядро атома содержит не только протоны, но и другие частицы, которые называются нейтронами. Нейтрон немного тяжелее протона, но у него нет электрического заряда. Атомы каждого отдельного элемента могут существовать в нескольких вариантах, которые называют изотопами, с разным количеством нейтронов. Например, углерод имеет шестой номер в периодической таблице, т.е. его ядро содержит шесть протонов. Самая распространенная форма углерода (так называемый ^{12}C) также содержит шесть нейтронов, но существуют и изотопы с семью или восемью нейтронами (соответственно — ^{13}C и 14C). Уран — самый тяжелый из встречающихся в природе элементов, хотя более тяжелые ядра, в которых количество заряженных частиц может достигать 114, могут быть получены в лабораториях. Эти сверхтяжелые элементы нестабильны и легко распадаются. Некоторые, такие как плутоний (№94 в периодической таблице) имеют время существования в несколько тысяч лет. Элементы с порядковым номером больше 100 могут быть получены в экспериментах, где ядра атомов сталкиваются друг с другом, но такие элементы распадаются в течение очень непродолжительного периода.

Когда водород, находящийся в центре большой звезды, превращается в гелий (элемент №2 в таблице Менделеева), ее ядро сжимается, повышается температура и гелий начинает реагировать. Электрический заряд ядра гелия в два раза выше, чем у водорода, поэтому этим частицам нужно сталкиваться на большей скорости, чтобы преодолеть более сильное электрическое отталкивание, а для этого требуется более высокая температура. Когда запас гелия истощается, звезда сжимается и разогревается еще больше. У таких звезд, как Солнце, ядро никогда не достигает такой температуры, чтобы эти преобразования зашли слишком далеко, но центральные части более тяжелых звезд, где притяжение сильнее, нагреваются до миллиарда градусов. Они освобождают полученную энергию путем образования атомов углерода (шесть протонов) и затем цепочкой преобразований в вещества с постепенно возрастающим атомным весом: кислород, неон, натрий, кремний и т.д. Количество энергии, высвобождающейся при формировании отдельных атомных ядер, зависит от соотношения двух сил: атомной, которая «склеивает» определенные протоны и нейтроны вместе, и разрушительного эффекта электрической силы между протонами. Ядра атомов железа (26 протонов) связаны крепче, чем любые другие атомы; для создания еще более тяжелых ядер требуется еще больше энергии. Таким образом, когда ядро звезды переживает переход в железо, она испытывает энергетический кризис.

Его последствия драматичны. Когда железное ядро достигает порогового размера (примерно 1,4 массы Солнца), тяготение берет верх и ядро сжимается до размеров нейтронной звезды. Этот процесс высвобождает достаточно энергии, чтобы вещество внешних слоев звезды вспыхнуло в колоссальном взрыве, создавая сверхновую. Более того, эти внешние слои к тому моменту имеют весьма неоднородный состав: водород и гелий все еще горят во внешних слоях, но более горячие внутренние слои продвинулись куда дальше по периодической таблице. Вещество, разлетающееся по космосу, содержит смесь этих элементов. Более всего распространен кислород, за ним следуют углерод, азот, кремний и железо. Если принимать в расчет все типы

звезд и различные пути их развития, то рассчитанные пропорции веществ согласуются с тем, что можно наблюдать на Земле.

Железо является всего лишь 26-м элементом в таблице Менделеева. На первый взгляд с более тяжелыми атомами могут быть проблемы, поскольку для их синтеза необходимо вложение энергии. Но огромная температура во время коллапса звезды и взрывная волна, которая разносит ее внешние слои, производят небольшие количества остальных элементов периодической таблицы вплоть до урана под №92[17].

Галактическая экосистема

Первые звезды сформировались примерно 10 млрд лет назад из первичной материи, которая содержала только самые простые атомы — никакого углерода, никакого кислорода и никакого железа. Химия в те времена была бы очень скучным предметом. Разумеется, вокруг первых звезд не обращалось никаких планет. До того как появилось наше Солнце, несколько поколений тяжелых звезд могли пройти через свой полный жизненный цикл, преобразовав первоначальный водород в основные строительные материалы жизни и распространив их по космосу с помощью звездного ветра или взрывов. Некоторые из этих атомов вошли в состав межзвездного облака, напоминающего Туманность Ориона, и в нем примерно 4,5 млрд лет назад сформировалась звезда, окруженная диском из газа и пыли, которому предстояло стать нашей Солнечной системой. Почему на Земле так распространены углерод и кислород, а золото и уран встречаются так редко? Ответ связан со звездами, которые взорвались до того, как образовалось Солнце. Наша Земля и мы сами — осколки древних звезд. Наша Галактика — экосистема, снова и снова перерабатывающая одни и те же атомы с помощью поколений звезд.

Атомы углерода, кислорода и железа в Солнечной системе являются остатками пылевого облака, из которого она сформировалась 4,5 млрд лет назад. Атомы появились внутри тяжелых звезд, которые к тому времени уже разбросали свое вещество. Эти «загрязняющие вещества» составляли всего 2% массы: водород и гелий по-прежнему оставались доминирующими атомами. Тем не менее тяжелых атомов на Земле хватает, потому что водород и гелий — легкоиспаряющиеся газы, которые быстро покинули все внутренние планеты. Напротив, гигантский Юпитер, как и Солнце, по большей части состоит из водорода и гелия. Он был сформирован из более холодной внешней части диска, который окружал только что появившееся Солнце, и собственного тяготения Юпитера было достаточно для того, чтобы удержать эти легкие атомы.

Более старые по сравнению с Солнцем звезды появились раньше, чем наша Галактика была так сильно «загрязнена». Поэтому по сравнению с Солнцем их поверхность должна испытывать недостаток тяжелых элементов. У звездного света сложный спектр, в котором каждый вид атомов оставляет характерный след. (Например, уличные огни знакомы нам по желтому натриевому свету или характерному голубому свету ртутных паров.) И в самом деле, более тяжелые атомы реже встречаются на самых старых звездах, что соответствует общей схеме истории Галактики. Напротив, гелий очень распространен даже на старых звездах. Причина этого, которую мы обсудим в следующей главе, ведет нас непосредственно к первым минутам после Большого взрыва.

Атомный коэффициент: ε = 0,007

Расчет соотношения различных атомов — и понимание того, что Творцу не было никакой нужды поворачивать целых 92 ручки настройки, — это триумф астрофизиков. Мы не знаем некоторых деталей, но суть зависит всего лишь от одного числа — значения той силы, что удерживает вместе частицы (протоны и нейтроны), из которых состоят атомные ядра.

Знаменитое уравнение Эйнштейна $E=mc^2$ сообщает нам, что масса (m) соотносится с энергией (E) через скорость света (c). Таким образом, скорость света имеет фундаментальное значение. Она точно определяет «переводной коэффициент»: сообщает нам, сколько энергии можно получить из каждого килограмма вещества. Единственный способ, с помощью которого некоторая масса материи может быть на 100% превращена в энергию, — это ее соприкосновение с равной массой антиматерии, которая (к счастью для нас) в нашей Галактике нигде не встречается в больших количествах. Всего лишь килограмм антиматерии даст такое количество энергии, какое большая электростанция вырабатывает за 10 лет. Но обычное топливо, такое как

бензин, и даже взрывчатые вещества, такие как тринитротолуол, высвобождают только миллиардные доли содержащейся в веществе «энергии массы покоя». С помощью этих материалов можно провести химические реакции, которые не изменяют ядра атомов, а только перетасовывают орбиты их электронов и связи между атомами. Но сила термоядерной реакции приводит в трепет, потому что ее эффективность в миллионы раз выше, чем при любом химическом взрыве. Вес ядра атома гелия составляет 99,3% от веса двух протонов и двух нейтронов, которые нужны, чтобы его создать. Оставшиеся 0,7% высвобождаются в основном как тепло. Поэтому топливо, которое снабжает энергией Солнце — водород в его ядре, — превращает 0,007% своей массы в энергию, когда превращается в гелий. Именно число ε определяет срок жизни звезд. Дальнейшие превращения гелия вплоть до железа дают прирост выхода энергии всего на 0,001%. Таким образом, более поздние стадии жизни звезды оказываются относительно короткими. (Они становятся еще короче, потому что в самых горячих частях звездного ядра дополнительная энергия незримо утекает в нейтрино.)

Количество энергии, высвобождающееся, когда простые атомы подвергаются термоядерной реакции, зависит от значения той силы, которая «склеивает вместе» части атомного ядра. Эта сила отличается от тех двух, о которых я уже рассказывал, т.е. от тяготения и электричества, потому что действует только на очень маленьком расстоянии и эффективна исключительно в масштабах ядер атомов. Мы не испытываем ее воздействия напрямую в отличие от действия электрических и гравитационных сил, которое можем ощутить. Тем не менее внутри атомного ядра эта сила крепко удерживает протоны и нейтроны и достаточно сильна, чтобы бороться с электрическим отталкиванием, которое в противном случае смогло бы оттолкнуть положительно заряженные протоны. Физики называют эту силу «сильным взаимодействием».

Это сильное взаимодействие — доминирующая сила в микромире — удерживает протоны в атомах гелия и более тяжелых атомах так прочно, что их термоядерный синтез является мощным источником, которого достаточно, чтобы на длительное время обеспечить солнечное тепло, необходимое для нашего существования. Без атомной энергии Солнце истощилось бы в течение примерно 10 млн лет, как 100 лет назад предсказывал Кельвин. Поскольку эта сила действует только на коротком расстоянии, она становится менее эффективной в более крупных и тяжелых ядрах атомов: именно поэтому ядра атомов тяжелее железа менее связаны.

Точная настройка ε

Атомные силы жизненно важны, но насколько? Что изменилось бы, если бы ε был равен, скажем, 0,006 или 0,008, а не 0,007? На первый взгляд, кто-то мог бы предположить, что никакой разницы не было бы. Если ε будет меньше, водород будет менее эффективным топливом и срок жизни Солнца и других звезд станет короче, но это само по себе не будет настолько жизненно важным (если уж на то пошло, мы-то уже здесь, а Солнце не прожило еще и половины своего срока). Но, как выяснилось, есть и более тонкие эффекты, чувствительные к этому числу и сказывающиеся на процессе синтеза, который превращает водород во все остальные элементы периодической системы.

Самое важное, первое звено в этой цепи — постройка гелия из водорода — весьма чувствительно к силе атомного взаимодействия. Ядра гелия состоят из двух протонов, но также в них входят и два нейтрона. Эти четыре частицы соединяются вместе не за один шаг, ядра гелия поэтапно собираются через дейтерий (тяжелый водород), состоящий из одного протона и одного нейтрона. Если ядро будет «склеено» слабее, т.е. ε будет ближе к 0,006, чем к 0,007, протон не будет связан с нейтроном и дейтерий не будет стабилен. На этом путь преобразования водорода в гелий закончится. У нас будет простая вселенная, состоящая из водорода, атом которого состоит из одного протона и вращающегося вокруг него единственного электрона, и никакой химии. В такой вселенной звезды все еще смогут формироваться (если все остальное останется неизменным), но атомного топлива в них не будет. Они будут истощаться и остывать, заканчивая свое существование как мертвые остатки. Не будет никаких взрывов, чтобы распространить вещество по космосу для того, чтобы из него возникли новые звезды, и не будет никаких элементов, из которых могли бы сформироваться твердые планеты.

На первый взгляд из этого объяснения можно было бы предположить, что более сильное атомное взаимодействие стало бы преимуществом для жизни, сделав термоядерный синтез более

эффективным. Но мы не смогли бы существовать, если бы ε был больше 0,008, потому что после Большого взрыва не осталось бы никакого водорода. В нашей Вселенной два протона отталкивают друг друга так сильно, что даже сильное атомное взаимодействие не может связать их вместе без помощи одного или двух нейтронов (которые добавляются к ядерному «клею», но, поскольку не имеют заряда, не добавляют дополнительного электрического отталкивания). Если ε будет равняться 0,008, тогда два протона можно будет связать друг с другом напрямую. Это случится непосредственно в только что возникшей вселенной, поэтому не останется водорода, который мог бы стать топливом для обычных звезд, и вода не сможет существовать.

Поэтому для любой вселенной с большим набором химических веществ необходимо, чтобы число εнаходилось в диапазоне от 0,006 до 0,008. Некоторые отдельные детали еще более чувствительны к его значению. Английского физика-теоретика Фреда Хойла мысль о самом популярном примере «точной настройки» осенила, когда он точно рассчитывал процесс синтеза углерода и кислорода в звездах. Углерод (с шестью протонами и шестью нейтронами в атомном ядре) получается из сочетания трех ядер атомов гелия. Шанс на то, что все три соединятся одновременно, очень мал, и поэтому процесс идет через промежуточную стадию, на которой два ядра гелия соединяются в бериллий (четыре протона и четыре нейтрона), прежде чем соединиться с еще одним атомом гелия, чтобы получился углерод. Хойл столкнулся с проблемой нестабильности этого атома бериллия: он распадается так быстро, что, кажется, у третьего атома гелия очень мало шансов прилепиться к нему до распада. Так как же углерод вообще мог возникнуть? Выяснилось, что у ядер углерода есть характерная черта — присутствие резонанса с особым видом энергии, которая повышает шанс на то, что бериллий захватит еще одно ядро гелия в короткий интервал до своего распада. Хойл фактически предсказал существование этого резонанса и призвал коллег-экспериментаторов его измерить. Его предсказание было доказано. Этот процесс, казавшийся физикам-ядерщикам случайным, позволяет образовываться углероду, но подобного явления не возникает на следующей стадии, когда углерод захватывает еще один атом гелия и превращается в кислород. Этот жизненно важный резонанс очень чувствителен к ядерной силе. Сдвиг ее даже на 4% сильно уменьшил бы количество углерода, которое могло бы образоваться. Таким образом, Хойл доказал, что наше существование могло быть поставлено под угрозу изменением числа ε всего на несколько процентов6.

Независимо от того, как создаются элементы, изменения в значении числа ε отразились бы на длине периодической таблицы. Более слабая атомная сила переместила бы наиболее прочно связанные атомы (которым сейчас является железо, №26) ниже в периодической таблице и понизило бы количество стабильных элементов до уровня куда меньшего, чем 92. Это привело бы к «обедневшей» химии. Наоборот, увеличение значения числа ε могло бы повысить стабильность тяжелых атомов.

На первый взгляд, более длинный список различных распространенных атомов открывает путь к более интересной и разнообразной химии. Но это вовсе не само собой разумеется — например, английский язык не стал бы значительно богаче, если бы в алфавите было больше букв. Аналогично и сложные молекулы могут существовать в бесконечном разнообразии, хотя и состоят из относительно небольшого набора общих элементов. Химия была бы скучнее (а сложные молекулы, необходимые для жизни, в ней вовсе бы не существовали), если бы в изобилии не было кислорода и железа (№8 и №26 соответственно), а особенно — углерода (№6). При этом мало что изменится от увеличения количества часто встречающихся элементов или от наличия нескольких дополнительных стабильных элементов, помимо привычных нам 92.

Существующее ныне сочетание элементов зависит от значения числа ε, но куда более значимо то, что никакая основанная на углероде биосфера не может существовать, если оно будет равно 0,006 или 0,008, а не 0,007.

глава 5

Наша космическая среда обитания II: за пределами нашей Галактики

Телескоп (сущ.): Устройство, относящееся к глазу так же, как телефон к уху, и позволяющее удаленным объектам донимать нас обилием бесполезных деталей.

Амброз Бирс[18]

Вселенная галактик

Я уже рассказал, как были созданы атомы периодической таблицы и что мы — это звездная пыль или, если быть менее романтичным, «ядерный мусор», оставшийся от топлива, позволяющего звездам сиять. Эти процессы зависят от значения атомной силы, которая «склеивает» протоны и нейтроны внутри атомного ядра и измеряется космическим числом ε = 0,007, которое обозначает, в каком соотношении высвобождается энергия во время термоядерной реакции преобразования водорода в гелий. Но откуда появились самые первые протоны и атомы водорода и как из изначальной материи образовались первые галактики и звезды? Чтобы ответить на эти вопросы, нам нужно расширить наши границы в пространстве и во времени — в межгалактическую область и назад в ту эпоху, когда еще не было первых звезд. Мы должны познакомиться с другими числами, которые описывают нашу Вселенную, и удостовериться, что наше появление зависит от их точного значения.

Звезды собираются в галактики, которые являются основными единицами, образующими Вселенную. Наша Галактика — одна из самых типичных. Ее сотня миллиардов звезд лежит главным образом в плоскости диска, кружась вокруг яркой внутренней выпуклости — «балджа», где звезды расположены ближе друг к другу, чем в плоскости. Прямо в центре скрывается черная дыра с массой, в 2,5 млн раз превышающей солнечную. Лучу света потребуется 25 000 лет, чтобы добраться от нас до центра Галактики, а мы вместе с Землей находимся чуть дальше, чем на полпути от центра до края диска. С того места, где расположено Солнце, другие звезды диска выглядят как лента, тянущаяся через все небо, мы ее называем Млечный Путь. Обычным звездам потребуется более 100 млн лет, чтобы совершить полный оборот вокруг центра Галактики (этот оборот иногда называют «галактическим годом»).

Туманность Андромеды, наш самый близкий космический сосед, находится примерно в 2 млн св. лет. Для астронома, находящегося на планете, обращающейся вокруг одной из звезд в ТуманностиАндромеды, наша Галактика будет выглядеть приблизительно так же, как для нас Туманность Андромеды: диск из звезд и газа, кажущийся наклоненным и вращающийся вокруг центральной основы. С помощью мощных телескопов можно увидеть миллионы других галактик. Не все из них по форме напоминают диски[19] — другой важный класс составляют так называемые «эллиптические галактики», в которых звезды не организованы как диск, а кружат по более свободным орбитам, испытывая притяжение всех остальных звезд такой галактики.

В космосе галактики не располагаются случайным образом: большинство из них собираются в группы или кластеры, которые притяжение удерживает вместе. Наша собственная Местная группа галактик включает Млечный Путь и Туманность Андромеды, а также 43 карликовые галактики (по крайней мере, по последним подсчетам их было именно столько — ученые продолжают находить очень слабых и маленьких членов Местной группы). Притяжение тянет Туманность Андромеды в нашу сторону со скоростью приблизительно 100 км/с. Примерно через 5 млрд лет наши спиральные галактики могут столкнуться. В космосе такие столкновения являются рутинными событиями: в его глубинах мы видим много других галактик, которые, надо полагать, пережили такие встречи с соседями.

Галактики являются такими огромными и разреженными, и звезды в них так рассеяны, что реальные столкновения между ними происходят чрезвычайно редко. (Это полностью верно по отношению к соседям Солнца, поскольку даже самые близкие из них выглядят слабыми искрами света.) Даже когда две галактики столкнутся вместе и перемешаются, столкновений звезд будет очень немного. Единственное, что произойдет, — каждая звезда испытает на себе коллективное притяжение всего вещества из другой галактики. Орбиты так исказятся, что звезды в конце концов окажутся не в двух отдельных дисках, а в едином хаотичном рое. Именно так выглядят эллиптические галактики, и я подозреваю (хотя на этот вопрос все еще нет однозначного ответа), что большие эллиптические галактики формировались именно подобным образом.

Структура нашей Вселенной: космическая сеть

Наша Местная группа галактик расположена около края Скопления Девы — архипелага из нескольких сотен галактик, центр которого находится примерно в 50 млн св. лет от нас. Скопления и группы организуются в еще более крупные объединения. Так называемая Великая Стена, напоминающая простыню полоса из галактик протяженностью более 200 млн св. лет, — это ближайшее к нам и самое выдающееся из таких гигантских образований. Другое скопление — Великий Аттрактор — притягивает нас и все Скопление Девы со скоростью несколько сотен километров в секунду.

Многое созданное природой (горные пейзажи, прибрежные линии, деревья, кровеносные сосуды и т.д.) имеет структуру фрактала. Фрактал — это множество, которое имеет особое математическое свойство: если увеличить его малую часть, то она совпадет со всем целым. Если бы наша Вселенная имела подобную форму — состояла из скоплений, скоплений, скоплений и так до бесконечности, тогда как бы глубоко мы ни погружались в космос и какой бы объем ни охватили, галактики имели бы «пятнистое» распределение. Забираясь глубже, мы бы просто охватывали все больший масштаб в иерархии скоплений. Но наша Вселенная выглядит не так. Мощные телескопы показывают галактики, отдаленные от нас на несколько миллиардов св. лет. Внутри этого более чем огромного объема астрономы выделили множество таких же скоплений, как Скопление Девы, и нашли такие же структуры, как Великая Стена. Но более глубокие поиски не выявляют никаких отчетливых структур более крупного масштаба. По словам гарвардского астронома Роберта Киршнера, мы достигли «предела величия». Коробка со сторонами 200 млн св. лет (а это расстояние все еще невелико по сравнению с границами наших наблюдений, которые составляют примерно 10 млрд св. лет) достаточно вместительна, чтобы содержать в себе самые большие структуры и быть «вполне приличной» вселенной. Где бы она ни находилась, такая коробка будет вмещать примерно одинаковое число галактик, сгруппированных подобным образом в скопления, нитевидные структуры и т.д. Иерархия скоплений не копируется до бесконечно огромного масштаба.

Таким образом, наша Вселенная не является простым фракталом. Более того, масштаб сглаживания достаточно мал по сравнению с самыми большими расстояниями, которые могут охватить наши телескопы. В качестве аналогии представьте себе, что вы плывете на корабле посередине океана. Вас окружают сложные структуры волн, которые теряются где-то на горизонте. Но вы можете изучать их статистически, потому что ваше поле зрения простирается достаточно далеко, чтобы увидеть большое количество волн. Даже гигантские океанские волны намного меньше расстояния до горизонта, и в своем воображении вы можете разделить то, что видите, на множество отдельных секторов, каждый из которых должен быть достаточно большим, чтобы нести адекватную информацию. Здесь существует разница между морскими и горными пейзажами, где один огромный пик часто доминирует над всем горизонтом и вы не можете определить некую среднюю величину, как в море. (Ландшафты и в самом деле могут быть подобными фракталам. Фрактальная математика используется в программах компьютерной графики для создания воображаемых пейзажей в кино.)

Космические структуры охватывают широкий диапазон измерений: звезды, галактики, скопления и сверхскопления. В масштабе меньшем 1/300 горизонта концентрация галактик меняется более чем вдвое в зависимости от места. В больших масштабах флуктуация меньше (хотя есть несколько ярко выраженных структур вроде Великого Аттрактора). Если продолжать аналогию с океаном, сверхскопления галактик можно сравнить с самыми длинными волнами, которые можно заметить. В главе 8 мы увидим, что этот масштаб зависит от одного космического числа Q, которое появилось на самом раннем этапе развития Вселенной, и что «зародыши» скоплений и сверхскоплений — структуры, отдаленные на миллионы св. лет, — можно отследить до того времени, когда вся Вселенная имела микроскопический размер. Возможно, это самая удивительная связь между далеким космическим пространством и внутренним пространством микромира.

Можно предположить, что структура Вселенной в таких больших масштабах не имеет никакого отношения к нашей среде обитания внутри Солнечной системы. Казалось бы, какое значение имеет, содержится ли в нашей Галактике квадриллион звезд или «всего лишь» миллион, а не 100 млрд, как мы можем судить из наблюдений? Принадлежит ли наша Галактика к скоплению, содержащему миллионы других галактик, или их всего несколько штук? Но если

бы существовала более разнородная вселенная, чем наша, она бы не была такой благосклонной к звездам и планетам. С другой стороны, менее разнородная вселенная была бы, мягко говоря, неинтересной: в ней не сформируются галактики и звезды, а вся материя будет сильно рассеяна и аморфна.

Обо всем этом поговорим в главе 8. Но в данный момент мы можем отметить одно важное следствие сглаживания в больших масштабах — оно делает возможной космологию как науку, позволяя нам определить средние характеристики Вселенной: демографию галактик, статистику скоплений и т.д. Несмотря на существование галактик и скоплений, бывает полезно подумать о сглаженных характеристиках Вселенной: мы описываем Землю как «круглую», не обращая внимания на сложную топографию гор и океанских глубин. Тем не менее было бы бессмысленно описывать Землю как «совершенно круглую», если бы ее горы возвышались на тысячи километров, а не на тысячи метров.

Еще куда более важно то, что благодаря этой интерпретации мы можем осмысленно задать вопрос о том, является ли наша Вселенная статичной или же она расширяется или сжимается.

Расширение

Галактики являются «строительными блоками» Вселенной, и, изучая их свет, мы можем определить, куда они движутся. Сотни миллиардов звезд в типичной галактике слишком тусклы, чтобы разглядывать их по отдельности, — телескопы регистрируют весь свет, исходящий от многих звезд. Можно проанализировать спектр этого света. Мы уже отмечали, как свет от одной звезды отражает скорость ее движения к нам (или от нас) и как с помощью длительных наблюдений можно поймать крошечные нарушения в движении, вызванные планетой, обращающейся по орбите вокруг звезды. Подобным же образом спектр света от целой галактики сообщает, как быстро она движется по направлению к нам (сдвиг в синюю часть спектра) или от нас (сдвиг в красную часть спектра).

Возможно, самым важным фактом о нашей Вселенной является то, что свет от далеких галактик сдвигается в красную часть спектра — все они (за исключением нескольких соседних галактик, находящихся в нашем скоплении) удаляются от нас. Более того, красное смещение (показывающее скорость удаления) сильнее проявляется в свете самых отдаленных галактик. Кажется, мы находимся в расширяющейся Вселенной, где скопления галактик отдаляются друг от друга все дальше и все сильнее рассеиваются по космосу.

Простая зависимость между красным смещением и расстоянием было названа в честь Эдвина Хаббла, который первым открыл этот закон в 1929 г. Наблюдатели из других галактик обнаружили бы точно такое же удаление отдаленных галактик. Расширение оказывает глобальный эффект: отдельные галактики (и даже скопления галактик) сами по себе не расширяются, а еще меньше расширение влияет на более мелкие объекты, такие как наша Солнечная система.

Представьте себе, что штыри на картине М. К. Эшера (рис. 5.1) синхронно удлиняются. Наблюдатель, находящийся на любой вершине, увидит, что другие вершины отдаляются от него со скоростью, которая зависит от того, сколько штырей находится перед наблюдателем. Другими словами, скорость удаления других вершин будет пропорциональна расстоянию до них. Галактики не располагаются в правильной пространственной решетке — как уже упоминалось, они сосредоточены в группы или скопления, но тем не менее вы можете представить расширение, вообразив, что скопления галактик связаны с синхронно удлиняющимися штырями. Ни в одной вершине на картине Эшера нет ничего примечательного, как нет и ничего особенного в том, как наша Галактика расположена во Вселенной. (Хотя место нашей Галактики случайно, тем не менее мы наблюдаем ее не в случайное время, а причины этого станут понятны позднее.) Космология продвинулась вперед только благодаря тому, что наша Вселенная в самом крупном масштабе достаточно однородна, чтобы ее можно было описать простым «расширением Хаббла», где все части, кажется, расширяются одинаково. На местах расширение можно рассматривать как эффект Доплера, но в больших масштабах, где видимое разбегание происходит со скоростью, составляющей большую долю скорости света, лучше приписывать красное смещение «растягиванию» пространства, в то время как свет проходит через него. Величина красного смещения — иначе говоря, то, насколько растягивается длина волны, — в

этом случае равна величине, на которую расширяется Вселенная (и в нашей аналогии с картиной Эшера — на которую удлиняются «штыри»), когда свет движется в нашу сторону.

Возможно, мы спросим, почему красное смещение предполагает расширение, а не какое-то новое физическое явление, которое проявляется на больших расстояниях. Возможность эффекта вроде «старения света» порой все еще обсуждается, хотя никто так и не разработал жизнеспособную теорию, согласующуюся со всеми доказательствами (например, это явление должно производить одно и то же относительное изменение в длине волны света и не должно искажать изображения отдаленных объектов). Нерасширяющая Вселенная на самом деле влечет за собой куда больше парадоксов, чем любая теория Большого взрыва. У звезд нет бесконечного запаса энергетических ресурсов; они изменяются и в конце концов исчерпывают свое топливо. То же самое происходит и с галактиками, которые, по существу, состоят из звезд. Вполне возможно определить возраст самых старых звезд в Млечном Пути и в других галактиках, сравнив их свойства с расчетами того, как эволюционируют звезды. Самым старым из них примерно 10 млрд лет, что полностью согласуется с точкой зрения о том, что наша Вселенная расширяется чуть дольше этого срока. Если бы наша Вселенная была статичной, все галактики должны были бы таинственным образом оказаться на своих сегодняшних позициях — причем синхронно — примерно 10 млрд лет назад. Нерасширяющаяся Вселенная создает серьезные проблемы на уровне логики.

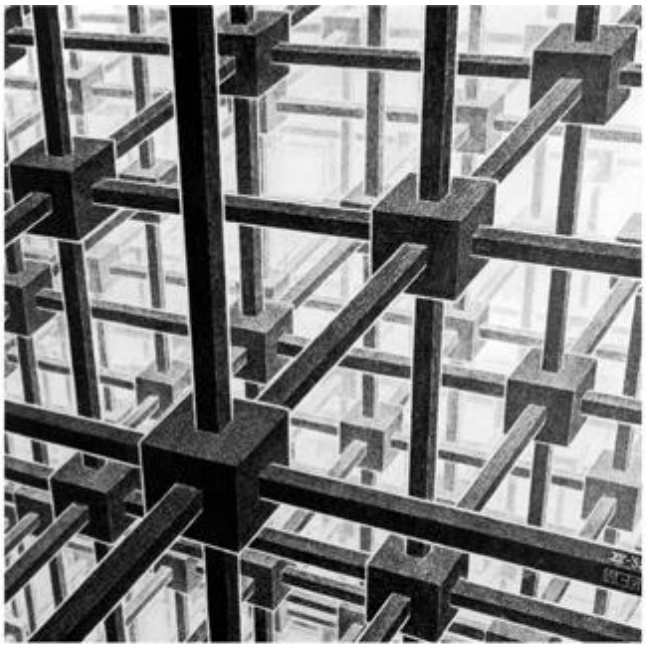


Рис. 5.1. «Членение пространства кубами» Эшера. Если штыри в пространственной решетке синхронно удлинять, вершины будут отдаляться друг от друга в соответствии с законом Хаббла, но ни одна из вершин не является особенной, и в структуре нет центра

С высокой степенью вероятности расширение началось 10–15 млрд лет назад, наиболее точные цифры — 12–13 млрд лет назад[20]. Есть две причины этой неуверенности в возрасте нашей Вселенной. Расстояние до галактик (в отличие от скорости разбегания) по-прежнему не всегда измеряется точно, а также оценка этого возраста зависит от того, насколько быстрее (или медленнее) Вселенная расширялась в прошлом.

Заглядывая в прошлое

Свет движется с конечной скоростью, из-за этого мы видим отдаленные места не такими, какими они являются сейчас, а такими, какими они были очень давно. В более ранние эпохи Вселенная была более сжатой — «штыри» в нашей «пространственной решетке» были короче. Поэтому другая картина Эшера, «Ангелы и демоны» (рис. 5.2), лучше отображает то, что мы видим на самом деле.

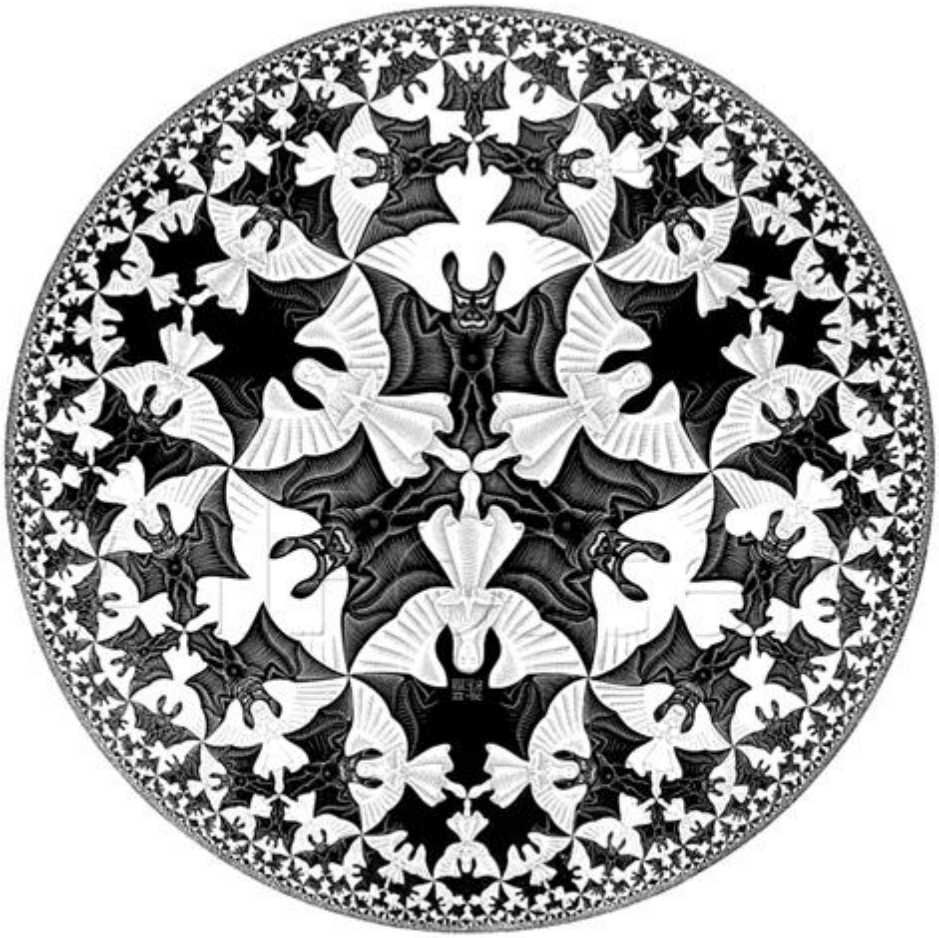


Рис. 5.2. «Ангелы и демоны» Эшера. Из-за того что скорость света конечна, мы видим отдаленные места такими, какими они были в далеком прошлом. Ближе к горизонту все кажется более сжатым

Мы ожидали, что отдаленные галактики будут выглядеть не так, как те, которые расположены рядом с нами. Свет от них провел в пути долгое время, поэтому они были младше и менее развиты, когда испустили тот свет, который теперь достиг нас. На той стадии еще не весь первоначальный газ образовал звезды. Эти эволюционные изменения происходят так медленно, что станут заметными только через миллиарды лет. Таким образом, чтобы понять общее направление этих изменений, нужно исследовать такие далекие галактики, чтобы их свет шел до нас несколько миллиардов лет.

Космический телескоп имени Хаббла, названный в честь первооткрывателя космического расширения, движется высоко над Землей, чтобы избежать искажающего эффекта атмосферы и сделать четкие фотографии очень далеких районов космоса. Приборы «Хаббла» настолько чувствительны, что при длинной выдержке позволяют увидеть плотно расположенные в небе тусклые пятнышки, даже если поле зрение так мало, что покрывает менее сотой доли размера полной Луны и при наблюдениях с помощью обычного телескопа этот участок выглядит как черное пятно. (Думаю, великолепные фотографии, сделанные космическим телескопом, оказали на общественное сознание такое же сильное воздействие, как первые снимки из космоса, сделанные в 1960-х гг., на которых была запечатлена Земля со всей ее хрупкой биосферой.) На фотографиях «Хаббла» мы видим тусклые объекты, принимающие самые различные формы, в миллиард раз тусклее, чем любая звезда, которую мы можем увидеть невооруженным глазом. Но каждый из них — это целая галактика размером тысячи св. лет, которая кажется такой маленькой и тусклой, потому что находится на огромном расстоянии. Эти галактики выглядят иначе, чем наши ближайшие соседи, потому что мы видим их сразу после того, как они сформировались: они еще не приняли форму устойчивых вращающихся дисков, как фотогеничные спиральные галактики, изображенные в большинстве книг по астрономии. Некоторые из этих далеких

галактик состоят в основном из светящегося рассеянного газа, который еще не сгустился в отдельные звезды. Большинство дальних галактик выглядят значительно более голубыми по сравнению с ближайшими (после поправки на красное смещение, разумеется), потому что массивные голубые звезды, которые к настоящему времени уже умерли, еще светили в то время, когда свет покинул эти далекие галактики.

Эти изображения показывают нам, как такие галактики, как наш Млечный Путь, выглядели, когда зажглись их первые звезды. Когда мы смотрим на Туманность Андромеды, мы можем спрашивать себя, не наблюдают ли андромедяне за нами, используя телескопы еще более мощные, чем у нас. Может быть, они так и делают. Но в тех далеких галактиках никаких подобных достижений техники нет: мы смотрим на их очень примитивную стадию развития, еще до того, как прошло достаточно времени, чтобы многие звезды закончили свое существование. У них еще нет сложной химии; кислорода, углерода и других элементов очень мало для того, чтобы появились планеты, поэтому шанс на существование жизни минимален. Мы видим эти галактики на этапе, когда только закладывались основные строительные материалы для создания планетных систем. (Свет, который мы детектируем, на самом деле излучался в дальней ультрафиолетовой области спектра. Такое излучение невозможно увидеть глазом, и оно даже не проникает сквозь земную атмосферу. Но жесткое ультрафиолетовое излучение этих галактик переходит в красный свет к тому времени, когда добирается до нас.)

Самые отдаленные галактики имеют такое сильное красное смещение, что длина световой волны растянута больше чем в шесть раз: до такой степени должна была расшириться Вселенная с того времени, когда этот свет начал свой путь. Если допустить, что расширение сохраняется стабильным и галактики не ускоряются и не замедляются, то в то время, когда масштаб Вселенной составлял одну шестую своего сегодняшнего размера (расстояния — «штыри» в пространственной решетке Эшера — были в шесть раз меньше), ее возраст составлял одну шестую ее сегодняшнего возраста. На первый взгляд это утверждение может показаться спорным: не означает ли, что галактика должна удаляться в пять раз быстрее скорости света, если свету потребовалось пять шестых возраста нашей Вселенной, чтобы добраться до нас? Но противоречия в этом нет. Специальная теория относительности Эйнштейна (СТО) гласит, что ничто не может двигаться быстрее света относительно нас, когда время измеряется нашими собственными часами. Но та же теория говорит и о том, что быстро двигающиеся часы идут медленнее. Такие часы и в самом деле могут пролетать по пять св. лет за каждый год, который они отсчитывают, если будут двигаться со скоростью, составляющей 98% скорости света.

На самом деле ситуация сложнее, потому что скорость разбегания не постоянна. Сила притяжения, которую все во Вселенной прикладывает ко всему во Вселенной, вызывает замедление скорости, благодаря которому первые стадии космического расширения были относительно короткими. Но (об этом мы поговорим в главе 7) в дело может включиться еще одна сила, которая приведет к ускорению расширения. Вследствие этого до сих пор остается некоторая неуверенность по поводу того, как далеко во времени (или как далеко в пространстве) отстояли от нас эти отдаленные галактики: наиболее вероятное предположение — свет от них двинулся в путь, когда возраст Вселенной составлял примерно одну десятую от сегодняшнего.

Специалисты по космологии изучают «ископаемые остатки» прошлого: старые звезды, химические элементы, синтезированные, когда наша Галактика была юной, и т.д. В этом смысле они напоминают геологов или палеонтологов, пытающихся узнать об эволюции Земли и ее фауны. Но космологи имеют преимущество перед другими учеными, которые не могут проводить эксперименты и зависят от «исторических» доказательств. Направив свои телескопы на отдаленные объекты, космологи могут увидеть ту эволюцию, которую изучают: население далеких галактик, чей свет начал свой путь миллиарды лет назад, выглядит по-другому по сравнению с нашими ближайшими соседями. Из-за однородности в больших масштабах у всех частей Вселенной похожая история. Таким образом, по крайней мере с точки зрения статистики, эти отдаленные галактики должны быть похожи на то, как миллиарды лет назад выглядели наш Млечный Путь, Туманность Андромеды и другие соседние галактики.

Поле зрения телескопа — длинный тонкий конус, расширяющийся до границ обзора. Объекты, находящиеся на разном расстоянии, рассказывают нам об определенных эпохах в прошлом. Чем дальше расстояние, на которое мы углубляемся, тем глубже мы продвигаемся

назад во времени. Это напоминает скважину, пробуренную сквозь следующие один за другим слои антарктического льда, чтобы узнать об истории климата Земли.

Космический телескоп «Хаббл» преследовали задержки запуска, ошибки в конструкции и превышения бюджета, но на сегодняшний день — лучше, как говорится, поздно, чем никогда, — он оправдал надежды, которые астрономы возлагали на него. Его расфокусированное зеркало было откорректировано первой пилотируемой экспедицией по обслуживанию в 1994 г., также были улучшены бортовые оптические датчики. Преодолевая все несчастья, «Хаббл» продолжает работать. Но не менее важны и усовершенствования более крупных наземных телескопов нового поколения. Их зеркала размером 8–10 м обеспечивают собирающую поверхность в 16 раз больше, чем у «Хаббла», и могут собрать намного больше света от очень тусклых отдаленных галактик. Два телескопа обсерватории Кека на горе Мауна-Кеа на Гавайях были первыми введенными в строй инструментами нового поколения. Теперь их стало больше. Самый впечатляющий из всех — это «Очень Большой Телескоп» (Very Large Telescope, VLT), комплекс из четырех телескопов, каждый из которых имеет восьмиметровое зеркало, установленный в чилийских Андах Европейской Южной обсерваторией.

Четкость изображений, полученных от этих наземных телескопов, ограничена искажением, вызванным турбулентностью в атмосфере (тем же самым процессом, из-за которого мы видим мерцание звезд). Эти границы можно раздвинуть или связав вместе два телескопа, совмещая полученные от них изображения, или с помощью так называемой адаптивной оптики, когда зеркало постоянно подстраивается и приспосабливается к тому, чтобы компенсировать флуктуации атмосферы.

Эти великолепные приборы сделали снимки Вселенной в момент формирования первых галактик. Возможно, первые звезды появились даже раньше в формированиях меньших, чем сегодняшние галактики, но они были слишком тусклыми, чтобы мы могли их увидеть. Позже такие скопления объединились в более крупные структуры. Скорость, с которой газ конденсируется в звезды, — это скорость «метаболизма» галактики. По всей видимости, своего пика она достигла, когда возраст Вселенной составлял четверть от сегодняшнего (хотя первый свет звезд появился гораздо раньше). Сейчас ярких звезд появляется не много, потому что большая часть газа в «материнских» галактиках уже задействована в более старых звездах.

По крайней мере, с таким сценарием согласно большинство специалистов по космологии. Для того чтобы уточнить детали, потребуется больше наблюдений и более полное понимание того, как образуются звезды. Целью этой работы является создание согласующегося сценария, который будет не только совпадать с тем, что мы знаем о сегодняшних галактиках, но и принимать во внимание все более и более детальные снимки того, как звезды выглядели и как создавались их скопления в начале истории Вселенной. Когда информации мало, она может соответствовать нескольким совершенно неправильным теориям, но, когда доказательств становится больше, мы должны остановиться на единственной картине, которая описывает, как все работает.

С увеличением расстояния наши знания увядают, и увядают быстро. В конце концов мы достигаем границы темноты, предела возможного для нашего телескопа. Там мы измеряем тени и рыщем среди призрачных ошибок измерений в поисках заметных объектов, которые будут более вещественными. Этот поиск будет продолжаться. Лишь только когда эмпирические источники истощатся, нам придется пройти в призрачное царство размышлений.

Это последние слова из классической книги Эдвина Хаббла «Царство туманностей» (Realm of the Nebulae, 1936). Современные достижения обрадовали бы, а возможно, и потрясли бы Хаббла. Эти успехи принес космический телескоп, названный его именем, а также огромные телескопы на Земле.

До галактик

А что было в те еще более ранние эпохи, до того как начали формироваться галактики? Лучшее доказательство тому, что вначале все находилось в сверхсжатом состоянии, — это то, что межгалактическое пространство не является абсолютно холодным. Тепло, которое в нем присутствует, — «остаточное свечение творения» — обнаруживается как микроволновое излучение, то самое, что подогревает блюда в микроволновке, но гораздо слабее. Первое

обнаружение космического фонового микроволнового излучения[21] в 1965 г. было самым важным событием в космологии со времен открытия расширения Вселенной. Более поздние измерения подтвердили, что реликтовое излучение имело отличительную черту: его интенсивность на различных длинах волн, представленная в виде графика, соответствует спектру теплового равновесного излучения того, что физики называют «абсолютно черным телом». Так выглядит температурная кривая, когда излучение приходит в равновесие с окружающей средой (как это происходит глубоко внутри звезды или плавильного горна, который сильно нагревали в течение длительного времени). Именно этого можно ожидать, если реликтовое излучение действительно является остатками «огненного шара», когда вся Вселенная была раскаленной, плотной и непроницаемой.

К настоящему времени самые точные измерения были проведены в 1990-е гг. с помощью спутника NASA COBE[22]. Когда экспериментаторы представляют свои результаты, они обычно изображают на графике «планки погрешностей», которые указывают на степень неуверенности в результатах, но для информации, полученной COBE, таких планок не могло быть, потому что они были бы короче, чем толщина кривой. Это действительно историческое измерение с точностью до одной десятитысячной убедительно подтвердило, что все в нашей Вселенной — в том числе все вещество, из которого состоят галактики, — когда-то было горячим газом с температурой выше, чем в ядре Солнца.

Сегодня средняя температура Вселенной составляет 2,728 градуса выше абсолютного нуля. Это, конечно, очень холодно (около –270 °C), но существует четкое понимание того, почему межгалактическое пространство по-прежнему содержит много тепла. Каждый м3 вмещает 412 млн квантов излучения или фотонов. Для сравнения: средняя плотность атомов во Вселенной составляет примерно 0,2 на 1 м3. Это последнее число известно нам с меньшей точностью, поскольку мы не уверены, сколько атомов может быть в рассеянном газе или темной материи, но, по всей видимости, на каждый атом во Вселенной приходится около 2 млрд фотонов. Во время расширения Вселенной падает и плотность атомов, и плотность фотонов. Но падает она равномерно, поэтому соотношение атомов и фотонов остается прежним. Поскольку отношение «тепла к материи» так велико, о первоначальной Вселенной часто говорят как о горячем Большом взрыве.

Первичные горячие фазы продолжались недолго. Температура превышала миллиард градусов всего несколько минут. Примерно через полмиллиона лет она уменьшилась до 3000 °C — Вселенная стала чуть прохладнее поверхности Солнца, что явилось важным этапом процесса расширения. Перед этим все было таким горячим, что электроны были оторваны от ядер и двигались свободно. По мере снижения температуры они достаточно замедлились, чтобы присоединиться к ядрам; таким образом сформировались нейтральные атомы. Эти атомы не могли рассеивать тепло так эффективно, как свободные электроны на более ранних и более горячих стадиях. В течение последующего периода материя стала прозрачной; «туман» рассеялся. Во время расширения температура, в свою очередь, падала обратно пропорционально увеличению масштаба Вселенной (увеличению длины штырей в решетке Эшера). Реликтовое излучение, регистрируемое COBE, является следом той эпохи, когда наша Вселенная была сжата более чем в тысячу раз по сравнению с сегодняшним днем — при температуре 3000 °K вместо сегодняшних 2,7 °K и задолго до того, как появились галактики. Интенсивное излучение первоначального шара хотя и ослабело из-за расширения, но все еще наполняло всю Вселенную.

Часто используемая аналогия со взрывом вводит в заблуждение, поскольку создает представление о том, что Большой взрыв произошел в каком-то особом месте. Но, насколько мы можем судить, любой наблюдатель, находись он на Земле, в Туманности Андромеды или в самых далеких от нас галактиках, увидел бы одну и ту же модель расширения. Возможно, когда-то Вселенная и была сжата в одну-единственную точку, но у каждого есть равное право заявлять о том, что все началось именно с этой точки. Мы не можем соотнести источник расширения с каким-либо определенным местом в нынешней Вселенной.

Также неверно думать, что в первоначальной Вселенной расширение происходило из-за высокого давления. Взрыв вызывается нарушением равновесия давления; бомбы на Земле и сверхновые в космосе взрываются, потому что резкий перепад давления вышвыривает осколки в область низкого давления. Но в первоначальной Вселенной давление везде было одинаковым: не

было никакой границы или внешней области. Первичный газ охладился и рассеялся, как это происходит с содержимым растягивающейся коробки. Дополнительное притяжение, возникшее из-за давления и энергии тепла, на самом деле замедляло расширение7.

Такая картина достаточно логична, но остаются еще некоторые тайны. Прежде всего (если помнить о разнице со взрывом), она не дает объяснения тому, почему вообще происходит расширение. Стандартная теория Большого взрыва просто принимает без доказательств, что все началось в тот момент, когда был достигнут достаточный для расширения уровень энергии. Ответ на вопрос, почему расширение вообще происходит, должен скрываться на еще более ранних стадиях, относительно которых у нас нет таких же прямых доказательств, как нет и уверенного понимания физических процессов.

Название «Большой взрыв» было придумано в 1950-е гг. известным физиком-теоретиком из Кембриджа Фредом Хойлом (уже упомянутым в главе 4 в связи с открытием происхождения углерода) как насмешливое описание теории, которая ему не нравилась. Сам Хойл предпочитал теорию «стационарного состояния» Вселенной, в которой по мере расширения, чтобы заполнить возникающие пустоты, постоянно создаются новые атомы и новые галактики и, таким образом, в среднем параметры никогда не меняются. В то время в любом случае никаких доказательств быть не могло, и космология была областью кабинетных размышлений, потому что наблюдения не продвинулись достаточно далеко, чтобы эволюция Вселенной смогла себя проявить. Но теория стационарной Вселенной «вышла из моды», как только появились свидетельства того, что в прошлом Вселенная действительно была иной. Хотя и выяснилось, что стационарная теория неверна, но она была «хорошей» теорией с точки зрения очень четких и экспериментально проверяемых предсказаний. Она стала великолепным стимулом для науки, побудив наблюдателей довести свои приборы до предела возможностей. (В этом смысле «плохой» является та теория, которая так гибка, что может приспособиться к любым новым данным. Выдающийся — и очень самонадеянный — физик Вольфганг Паули говорил о подобных расплывчатых идеях: «Это даже не является ложным!») Сам Хойл так никогда полностью и не принял теорию Большого взрыва, хотя и придумал компромиссную модель, которую коллеги-скептики называли «Стационарным взрывом».

Ядерные реакции Большого взрыва

Согласно теории Большого взрыва, наша Вселенная была горячее, чем центр звезды. Почему же тогда все первоначальные атомы водорода не превратились в железо? (Вспомним, что ядра атомов железа крепче связаны, чем любые другие, и создаются только в сердце самых больших и самых горячих звезд). Если бы это произошло, в нашей сегодняшней Вселенной не существовали бы долгоживущие звезды, потому что все доступное топливо было бы использовано в изначальном огненном шаре. Звезда, состоящая из газообразного железа, могла бы существовать, но она бы истощилась не за миллиарды лет, а за миллионы, как когда-то Кельвин думал про Солнце. К счастью, первые несколько минут расширения не дали достаточного времени для того, чтобы ядерные реакции превратили какие-либо из первоначальных материалов в железо или даже в углерод, кислород и т.д. Реакции преобразовали примерно 23% водорода в гелий, но (если не считать следов лития) элементы, стоящие дальше в периодической таблице, во время самого Большого взрыва не образовались.

Первичный гелий тем не менее очень важен и дает значительное подкрепление теории Большого взрыва. Даже самые старые объекты (где примесь углерода, кислорода и т.д. в сотни раз меньше, чем внутри Солнца), как выяснилось, на 23–24% состоят из гелия: не обнаружено ни одной звезды, галактики или туманности, где гелий встречается реже. По всей видимости, галактики вначале состояли не из чистого водорода, а сразу из смеси водорода и гелия. (Внешние слои Солнца на 27% состоят из гелия, из них «лишние» 3–4% — это то количество, которое было синтезировано наряду с углеродом, кислородом и железом внутри первых короткоживущих звезд, создавших пылевое облако, из которого образовалась наша Солнечная система8.)

Многие медленно горящие звезды с низкой массой, которые образовались на несколько миллиардов лет раньше Солнца, когда наша Галактика была еще молода, до сих пор живы. В них содержится меньше, чем в Солнце, углерода, кислорода и железа в пропорции с водородом, что вполне естественно, если, как первым заметил Хойл, эти атомы были исторгнуты из массивных

звезд и постепенно накапливались с течением истории Вселенной. Точка зрения Хойла расходится с мнением Георгия Гамова о том, что вся периодическая таблица была «приготовлена» в первоначальной Вселенной. Если бы Гамов был прав и эти элементы возникли раньше, чем первые звезды и галактики, они бы встречались повсюду с одинаковой частотой — и в молодых, и в старых звездах.

Гелий — единственный элемент, который, согласно расчетам, был создан в изобилии во время Большого взрыва. Это обнадеживает, поскольку объясняет, почему гелия так много и он повсюду присутствует в одной и той же пропорции. Таким образом, установление связи гелия с Большим взрывом решило давнюю проблему и подтолкнуло космологов к тому, чтобы обратить серьезное внимание на первые несколько секунд космической истории.

Кроме того, на Большой взрыв удалось возложить ответственность за другой вид атомов — дейтерий (тяжелый водород). Атом дейтерия содержит не только протон, но и нейтрон, что дает ему дополнительную массу, но не дополнительный заряд. При ином обороте дела существование дейтерия оставалось бы загадкой, потому что в звездах он только разрушается: в качестве ядерного топлива поджечь его легче, чем обычный водород, поэтому недавно образованные звезды сжигают весь дейтерий во время своего первоначального сжатия, а потом переходят на более длинные фазы сжигания водорода.

Гелий и дейтерий появились, когда температура сжатой Вселенной была около 3 млрд градусов — примерно в миллиард раз выше, чем сейчас. При расширении Вселенной мы можем представить себе, как удлиняются штыри в пространственной решетке Эшера (см. рис. 5.1). Волны излучения вытягиваются пропорционально длине штырей, и температура понижается в обратной пропорции к длине. Это означает, что, когда температура была около 3 млрд градусов (а не около 3 градусов выше абсолютного нуля, как сейчас), штыри были в миллиард раз (109) короче, а для плотности эту степень еще нужно возвести в куб — она была в 1027 раз выше. Но наша сегодняшняя Вселенная такая разреженная — примерно 0,2 атома на 1 м3, — что ее плотность, которая была настолько огромной, сейчас меньше плотности воздуха! Температура же была так высока, что отдельные ядра были вовлечены в быстрое хаотичное движение. В лабораторных экспериментах можно проверить, что же происходит, когда ядра водорода и гелия сталкиваются с той же энергией, как при образовании гелия, поэтому расчеты основываются на фундаментальной физике.

Если мы примем сегодняшнюю плотность Вселенной равной 0,2 атома на 1 м3, рассчитанное соотношение водорода, гелия и дейтерия, которые появились при остывании «огненного шара» Вселенной, согласуется с наблюдениями. Это не может не радовать, потому что наблюдаемое изобилие могло бы полностью противоречить предсказаниям любой теории Большого взрыва или могло им соответствовать только при гораздо большей или гораздо меньшей плотности, чем те, которые мы наблюдаем. Как видим, значение 0,2 атома на 1 м3 в самом деле близко к сглаженной плотности галактик и газа во Вселенной. (У этого положения есть важное применение в области изучения темной материи, и мы обсудим это в следующей главе.)

глава 6

Хорошо настроенное расширение: темная материя и число Ω

Вечность очень длинная, особенно — ближе к концу.
Вуди Аллен

Критическая плотность

Примерно через 5 млрд лет Солнце умрет, и Земля — вместе с ним. Примерно в то же время (прибавьте или убавьте миллиард лет) Туманность Андромеды, наш ближайший крупный галактический сосед, который принадлежит к тому же скоплению, что и наша Галактика, и который в настоящее время падает на нас, врежется в Млечный Путь.

Эти прогнозы на огромный срок являются надежными, потому что они построены на предположении о том, что в течение следующих 5 млрд лет основные законы физики, определяющие жизненный цикл Солнца, и сила притяжения звезд и галактик будут оставаться

такими же, как и в предыдущие 5–10 млрд. Тем не менее мы не можем предсказать куда более интересные детали. Мы не можем быть уверены, что Земля по-прежнему будет оставаться третьей от Солнца планетой в течение следующих 5 млрд лет: в такой огромный промежуток времени орбиты планет тоже могут вести себя «хаотически». И конечно же, нельзя сделать надежные предсказания о том, как изменится поверхность Земли, в особенности о тех гораздо более быстрых изменениях в биосфере, которые производит наш собственный вид даже за миллионную долю этого времени.

Пока что Солнце еще не сожгло и половины своего топлива. До этого осталось больше времени, чем тот срок, который заняла вся эволюция жизни на Земле. Но Галактика надолго переживет Солнце. Даже если существующая на Земле жизнь является уникальной, впереди еще очень много времени, чтобы распространить ее по всей Галактике и за ее пределы. Жизнь и разум в конце концов заселят звезды и даже галактики. Я воздерживаюсь от дальнейших размышлений на эту тему не потому, что они абсурдны по своему содержанию, а потому, что открывают такое огромное разнообразие потенциальных вариантов (многие из которых известны по научной фантастике), что мы ничего не можем предсказать. Напротив, долгосрочные предсказания о судьбе всей нашей Вселенной можно сделать с большей долей уверенности.

Наша Галактика определенно завершит свое существование мощным ударом при столкновении через 5 или 6 млрд лет. Но будет ли Вселенная расширяться вечно? Будут ли далекие галактики отодвигаться от нас еще дальше? Или это движение в конце концов пойдет в обратном направлении и Вселенная схлопнется в «Большом хлопке»?

Ответ на этот вопрос зависит от результата «соревнования» между тяготением и энергией расширения. Представьте себе, что большой астероид или планета разваливается на фрагменты. Если эти осколки разлетаются достаточно быстро, они улетят в космос. Но если разрушение будет не таким катастрофическим, притяжение может направить движение обломков в противоположную сторону и они снова соберутся вместе. То же самое происходит и с каждым большим образованием во Вселенной: сейчас мы знаем скорость расширения, но не сможет ли тяготение в конце концов остановить его? Ответ зависит от того, как много вещества взаимодействует с гравитационной силой. Вселенная снова схлопнется — тяготение наконец победит расширение, если только не вмешаются какие-то другие силы — если плотность не превысит определенного критического значения.

Эту критическую плотность очень легко рассчитать. Она составляет примерно 5 атомов на 1 м3, что кажется очень небольшой величиной; на самом деле это гораздо ближе к полному вакууму, чем те значения, которых когда-либо добивались в экспериментах на Земле. Но кажется, Вселенная куда более пустое место9.

Предположим, что наше Солнце размером с апельсин. Тогда Земля будет зернышком в 1 мм, расположенным на расстоянии 20 м от апельсина, обращаясь вокруг него. Если придерживаться этого масштаба, то ближайшая звезда будет находиться на расстоянии 10 000 км. Именно так располагается материя в таких галактиках, как наша. Если бы все звезды из всех галактик были равномерно распределены в межгалактическом пространстве, то каждая из них находилась бы в несколько сотен раз дальше от своего ближайшего соседа, чем в действительности. В таком случае в нашей модели каждый апельсин будет находиться в миллионах километров от своего ближайшего соседа.

Если распылить все звезды, а их атомы равномерно распределить по Вселенной, то дело кончится тем, что на 10 м3 будет приходиться всего один атом. Примерно столько же вещества (не больше) содержит газ, рассеянный между галактиками. В целом выходит 0,2 атома на 1 м3, что в 25 раз меньше критического значения плотности 5 атомов на 1 м3, которое нужно для того, чтобы притяжение развернуло космическое расширение вспять.

Сколько темной материи?

Отношение фактической плотности к критической — очень важное число. Специалисты по космологии обозначают его греческой буквой Ω. Судьба Вселенной зависит от того, достигает ли число Ω единицы. На первый взгляд наша оценка реальной средней концентрации атомов в космосе предполагает, что Ω равна всего лишь 1/25 (или 0,04), обещая вечное расширение до огромных пределов. Но мы не должны слишком легкомысленно относиться к этому заключению.

В конце XX в. мы пришли к пониманию, что во Вселенной есть много того, чего мы не видим, например невидимая материя, состоящая в основном из так называемого «темного вещества» неизвестной природы. То, что светится, — галактики, звезды и сияющие облака газа — это лишь малая и достаточно нетипичная часть того, что есть на самом деле, подобно тому как самыми заметными объектами на нашем земном небе являются облака, которые на самом деле всего лишь пар, клубящийся в куда более плотном прозрачном воздухе. Большинство материи во Вселенной — основной источник числа Ω — не излучает ни света, ни инфракрасных лучей, ни радиоволн, ни каких-либо других видов излучения. Поэтому ее очень трудно обнаружить.

Собранные с начала разработки этой темы доказательства существования темной материи теперь уже являются практически неоспоримыми. По тому, как движутся звезды и галактики, можно предположить, что что-то невидимое оказывает на них гравитационное воздействие. Это аргумент того же типа, какой мы приводим, предполагая существование черной дыры, когда видим звезду, которая выглядит так, словно обращается вокруг невидимого компаньона. Такую же аргументацию использовали в XIX в., когда планета Нептун была обнаружена из-за того, что орбита Урана искажалась под воздействием притяжения более отдаленного невидимого объекта.

В Солнечной системе существует равновесие между тяготением, которое заставляет планеты падать на Солнце, и центробежной силой орбитального движения. Подобным же образом в более крупном масштабе всей Галактики существует равновесие между тяготением, которое держит все вместе, и разрушительным эффектом движения, который, если бы не действовало тяготение, разбросал бы звезды в стороны. О существовании темной материи можно судить, потому что наблюдаемое нами движение оказывается удивительно быстрым — слишком быстрым, чтобы быть уравновешенным притяжением видимых звезд и газа.

Мы знаем, насколько быстро Солнце обращается вокруг центра Галактики. Мы можем рассчитать скорость звезд и газовых облаков в других галактиках. Эти скорости, особенно скорости «отщепенцев», вращающихся вдали от центра Галактики, дальше большинства других звезд, подозрительно высоки. Если бы внешний газ и звезды испытывали на себе только силу притяжения того, что мы видим, они бы уже покинули свои орбиты, как Нептун и Плутон покинули бы сферу влияния Солнца, если бы двигались так быстро, как Земля. Такие высокие наблюдаемые скорости говорят нам о том, что галактики окружает тяжелое невидимое гало: подобно тому как если бы Плутон двигался так же быстро, как Земля (но при этом оставался на своей орбите), нам бы пришлось предположить существование тяжелой невидимой оболочки, располагающейся вне орбиты Земли, но внутри орбиты Плутона.

Если бы не существовало большого количества темной материи, галактики были бы нестабильны и разлетелись на части. Красивые изображения дисков и спиралей представляют собой то, что, в сущности, является «светящимся осадком», который удерживают в гравитационной ловушке огромные скопления темных объектов, о природе которых мы знаем очень мало. Галактики в десять раз больше и тяжелее, чем мы привыкли думать. Тот же самый аргумент применим и к большему масштабу, к целым скоплениям галактик, которые в поперечнике занимают несколько миллионов св. лет. Чтобы удержать их вместе, требуется сила притяжения материи, которой должно быть раз в десять больше, чем мы видим.

Конечно, существует одно допущение, которое лежит в основе всех этих предположений о темной материи, а именно: мы считаем, что знаем силу притяжения, которую дают видимые нам объекты. Внутреннее движение внутри галактик и их скоплений по сравнению со скоростью света является медленным, поэтому никаких релятивистских усложнений нет. Следовательно, мы просто используем закон обратных квадратов Ньютона, который говорит о том, что если расстояние между нами и какой-то массой увеличивается вдвое, то сила притяжения становится в четыре раза слабее. Некоторые скептики могут нам напомнить, что этот закон по-настоящему был проверен только в пределах нашей Солнечной системы, и его приходится принимать на веру, когда речь идет о масштабах в сотни миллионов раз больших. На самом деле сейчас у нас есть весьма заманчивые данные (см. главу 10), указывающие на то, что в масштабах всей Вселенной силу тяготения, возможно, перекрывает другая сила, которая вызывает отталкивание, а не притяжение.

Мы должны сохранять объективность (или, по крайней мере, оставить пространство для маневра), подходя к возможности того, что нашим представлениям о тяготении потребуется

переоценка. Если действующая на больших расстояниях сила будет мощнее, чем мы ожидаем, опираясь на закон обратных квадратов (т.е. если она не будет становиться в четыре раза слабее при увеличении расстояния в два раза), то будет абсолютно ясно, что вопрос о темной материи требуется пересмотреть. Но мы не должны отказываться от своей теории тяготения без борьбы. У нас может возникнуть искушение так поступить, если не найдется вероятных кандидатов для темной материи. Тем не менее вариантов может быть много; только если все они окажутся несостоятельными, мы должны быть готовы к тому, чтобы отвергнуть и Ньютона, и Эйнштейна10.

Есть и другие признаки, которые говорят о наличии темной материи. Все перемещающееся под воздействием силы тяготения вещество, светящееся или темное, отклоняет свет, поэтому скопления можно «взвесить», изучив, насколько сильно они искажают лучи света, проходящие сквозь них. Действительно, отклонение света звезд, которое Эддингтон и другие ученые наблюдали во время полного солнечного затмения 1919 г., стало одной из первых широко известных проверок ОТО, которая принесла Эйнштейну мировую известность. Космический телескоп имени Хаббла сделал впечатляющие фотографии некоторых скоплений галактик, отстоящих от нас примерно на миллиард св. лет. На этих фотографиях мы можем видеть много тусклых полосок и арок. Каждая из них — это далекая галактика, находящаяся в несколько раз дальше самого скопления. Мы смотрим на нее через искажающую линзу. Обычный узор на обоях выглядит искаженным, если посмотреть на него через искривленный кусок стекла. Скопление выступает в роли именно такой «линзы», которая фокусирует проходящий через нее свет. Галактики, входящие в скопления, даже все вместе недостаточно тяжелы, чтобы создать такое искажение. Чтобы значительно искривить свет и вызвать явное искажение изображений, находящихся позади галактик, скопление должно быть в 10 раз тяжелее того, что мы видим. Эти огромные естественные линзы дают дополнительное преимущество астрономам, которые интересуются эволюцией галактик, так как позволяют увидеть очень отдаленные галактики, которые иначе были бы слишком тусклыми, чтобы мы могли за ними наблюдать.

На самом деле нет ничего удивительного, что темная материя, имеющая массу в 10 раз больше того, что мы видим, является основной гравитационной силой в космосе. Нет ничего невероятного в темной материи как таковой: почему все во Вселенной должно светиться? Трудность задачи состоит в том, чтобы сузить список кандидатов на ее роль.

Что может быть темной материей?

Предполагается, что темная материя не излучает свет — действительно, мы не обнаружили никакого излучения. Также она не поглощает свет и не рассеивает. Это означает, что она не может состоять из пыли. Мы знаем, что в нашей Галактике присутствует некоторое количество пыли, потому что свет звезд рассеивается и ослабевает, проходя сквозь облака, состоящие из крошечных частиц, похожие на те, что составляют клубы табачного дыма. Но если бы эти частицы весили достаточно, чтобы претендовать на темную материю, они бы закрыли от нас любую далекую звезду.

Главными подозреваемыми в принадлежности к темной материи являются маленькие тусклые звезды. Те из них, которые имеют массу менее 8% от массы Солнца, называются коричневыми карликами[23]. Они недостаточно сжаты и горячи, чтобы поджечь ядерное топливо, которое заставляет сиять обычные звезды. Коричневые карлики определенно существуют: некоторые из них находили как «побочный продукт» поиска планет на орбитах вокруг более ярких звезд. Другие, особенно находящиеся по соседству, обнаружили по очень слабому излучению красного света. Сколько всего коричневых карликов может существовать? Теория тут нам не очень помогает. Соотношение больших и маленьких звезд определяется чрезвычайно сложными процессами, которые мы до конца пока не понимаем. Даже самые мощные компьютеры не могут сказать нам, что происходит, когда межзвездный газ конденсируется в звезды. Эти процессы с трудом поддаются пониманию по тем же причинам, по каким так трудно предсказать погоду.

Отдельные коричневые карлики могут быть обнаружены с помощью гравитационного линзирования. Если один из них проходит напротив яркой звезды, тогда тяготение коричневого карлика фокусирует свет и блеск яркой звезды оказывается увеличенным. В результате этого

яркая звезда будет вспыхивать и тускнеть определенным образом, если перед ней проходит коричневый карлик. Это явление требует очень точного расположения звезд на одной линии относительно Земли, поэтому мы его наблюдаем очень редко, даже если и существует достаточно коричневых карликов, чтобы составить всю темную материю в нашей Галактике. Тем не менее астрономы ведут активные поиски таких явлений микролинзирования (приставка «микро» в данном случае добавляется, чтобы отделить это явление от линзирования целых скоплений галактик, о котором упоминалось выше). Ученые постоянно следят за миллионами звезд, чтобы найти те, яркость которых от ночи к ночи меняется. Но со многими звездами это происходит по самым разным причинам: одни пульсируют, другие вспыхивают, третьи обращаются вокруг своих соседей, составляя двойную звезду. Исследователи обнаружили тысячи таких звезд, которые, конечно, интересны, но являются лишь досадной помехой с точки зрения поиска явлений микролинзирования. Иногда находят звезды, демонстрирующие характерное повышение и ослабление яркости, и вполне возможно, что перед ними проходит невидимая масса, фокусирующая свет. Пока все еще не ясно, происходит ли достаточное количество таких событий, чтобы можно было говорить о новой, более-менее распространенной популяции коричневых карликов, или это всего лишь обычные тусклые звезды проходят перед более яркими.

Есть и несколько других кандидатов на звание темной материи. Холодные «планеты», блуждающие в межзвездном пространстве и не связанные ни с какой звездой, могут существовать в больших количествах и оставаться необнаруженными. То же самое можно сказать и о напоминающих кометы глыбах замерзшего водорода. Могут это быть и черные дыры.

Дело об экзотических частицах

Тем не менее есть подозрение, что коричневые карлики или кометы (или даже черные дыры, если считать их останками мертвых звезд) составляют лишь малую часть темной материи. Дело в том, что есть серьезные основания полагать, что темная материя вообще не состоит из обычных атомов. Это предположение связано с дейтерием (тяжелым водородом).

Как уже упоминалось в предыдущей главе, любой дейтерий, который мы наблюдаем, должен был появиться во время Большого взрыва, а не синтезироваться внутри звезд. О его количестве в нашей Вселенной до настоящего времени точно не было известно. Но астрономы нашли спектральный след дейтерия, отличающийся от обычного водорода, в свете, идущем от очень далеких галактик. Для измерений потребовались новые мощные телескопы с зеркалами диаметром 10 м. Наблюдаемое содержание дейтерия является ничтожным: только один атом из 50 000 является атомом дейтерия. Соотношение, которое должно было сохраниться со времен Большого взрыва, зависит от плотности Вселенной, и наблюдения согласуются с теорией, если плотность составляет 0,2 атома водорода на 1 м3. Это в достаточной степени соответствует реальному количеству атомов в светящихся объектах: половина приходится на галактики, а половина — на межгалактический газ, но тогда ничего не остается для объяснения темной материи.

Если существует достаточно атомов, чтобы составить темную материю, которая в пять (а возможно, и в десять раз) больше того, что мы действительно видим, результаты наблюдений перестанут соответствовать теории. Тогда расчеты Большого взрыва будут предсказывать еще меньше дейтерия и несколько больше гелия, чем мы действительно наблюдаем, и происхождение дейтерия во Вселенной станет загадкой. Это говорит нам о важной вещи: атомы во Вселенной, плотность которой составляет 0,2 атома на 1 м3, создают только 4% критической плотности, а основная масса темной материи состоит из чего-то инертного с точки зрения ядерных реакций. Экзотические частицы, а не обыкновенные атомы, вносят основной вклад в значение числа Ω11.

Неуловимые частицы, которые называются нейтрино, — один из кандидатов. У них нет электрического заряда, и они с трудом взаимодействуют с обычными атомами: почти все нейтрино, которые попадают в Землю, проходят сквозь нее насквозь. В течение первых нескольких секунд после Большого взрыва, когда температура достигала 10 млрд градусов, сжатие было столь велико, что реакции, превращающие фотоны (кванты излучения) в нейтрино, были достаточно быстры, чтобы создать равновесие. Следовательно, количество нейтрино, оставшихся от «космического огненного шара», должно быть связано с количеством фотонов.

Используя обыкновенные и непротиворечивые законы физики, любой может подсчитать, что соотношение нейтрино к фотонам должно составлять 3 к 11. Сейчас в излучении, оставшемся от Большого взрыва, содержится 412 млн фотонов на 1 м3. Существует три разновидности нейтрино, и в каждом кубическом сантиметре содержится 113 нейтрино каждого вида — другими словами, на каждый атом во Вселенной приходятся сотни миллионов нейтрино. Разумеется, в контексте темной материи важны самые тяжелые из этих трех видов.

Поскольку количество нейтрино значительно превышает количество атомов, они могут быть основной составляющей темной материи, даже если масса каждого из них составляет одну стомиллионную атома. До 1980-х гг. почти все считали, что нейтрино — это частицы с нулевой массой покоя; в таком случае они будут иметь энергию и двигаться со скоростью света, но их гравитационное воздействие не будет играть роли. (Подобным образом фотоны, оставшиеся от начального этапа существования Вселенной, теперь обнаруживаются в реликтовом излучении и не проявляют какого-либо заметного гравитационного воздействия.) Но сейчас считается, что нейтрино могут иметь какую-то массу, хотя и очень маленькую.

Лучшим доказательством того, что нейтрино имеют массу, стал эксперимент «Камиоканде» в Японии. В нем использовали огромный резервуар в форме цилиндра, размещенный в бывшей цинковой шахте. Экспериментаторы изучали нейтрино, идущие от Солнца, где они являются побочным продуктом ядерных реакций в центральной зоне, а также и другие нейтрино, которые генерируются очень быстрыми частицами (космическими лучами), попадающими в верхние слои атмосферы Земли. Эксперименты показали ненулевую массу нейтрино, возможно не такую значительную, чтобы сделать их весомой составляющей темной материи12. Тем не менее это было важнейшее открытие, связанное с природой самих нейтрино. С одной стороны, оно заставляет микромир казаться более сложным, с другой — масса нейтрино может предложить новые ключи к разгадке отношений между ними и другими частицами.

По крайней мере, нам известно, что нейтрино существуют, хотя мы по-прежнему точно не знаем их массы. Но есть длинный список гипотетических частиц, которые, возможно, существуют и (если это так) могли выйти из Большого взрыва в достаточном количестве, чтобы внести основной вклад в значение числа Ω. Нет никаких особенно убедительных оснований судить о том, насколько тяжелы могут быть эти частицы. Наилучшие предположения дают значение в сотни раз тяжелее атома водорода. Если бы в Галактике было достаточно таких частиц, чтобы составить темную материю, по соседству с Солнцем их бы насчитывалось по нескольку тысяч на 1 м3. Они бы двигались примерно с той же скоростью, что и средняя звезда в Галактике, — где-то 300 км/с.

Эти частицы, тяжелые, но электрически нейтральные, в основном, как и нейтрино, проходили бы прямо сквозь Землю. Тем не менее их небольшая часть могла бы взаимодействовать с атомами веществ, через которые они проходят. В течение дня происходило бы всего несколько столкновений с каждым из нас (притом что наше тело содержит примерно 1029 атомов). Мы же явно ничего не ощущаем. Однако эксперименты с высокой чувствительностью могут обнаружить очень слабые «удары» или отдачу, возникающую, когда такие столкновения происходят с куском кремния или подобным материалом. Детекторы должны быть охлаждены до очень низкой температуры и размещены глубоко под землей (например, их располагают в шахте в Йоркшире или в туннеле под горами в Италии). Это необходимо, чтобы снизить помехи от других событий, которые могут заглушить подлинные сигналы от соударений с темной материей.

Несколько групп физиков взялись за трудные задачи этой «подземной астрономии». Это тонкая и длительная работа, но, если ученые добьются успеха, они смогут не только узнать, из чего же в основном состоит наша Вселенная, но вдобавок еще и открыть новый важный вид частиц. Только величайший оптимист мог бы положиться на успех этого предприятия, потому что на настоящий момент у нас нет теории относительно частиц темной материи, следовательно, очень трудно найти оптимальный путь поиска13.

Сейчас рассматривается и множество других кандидатов, которые могут составлять темную материю. Некоторые физики-теоретики предпочитают версию о еще более легкой частице, которая называется аксионом. Другие предполагают, что эти частицы могут быть в миллиард раз тяжелее, чем те, которые ищут сейчас (в этом случае они должны встречаться в миллиард раз

реже, что делает поиск еще более трудным). Или они могли бы быть куда более экзотическими — например, черные дыры размером с атом, созданные под огромным давлением первоначальной Вселенной.

Сужаем варианты

Некоторые гипотезы относительно состава темной материи можно смело отбросить; на данном этапе с помощью разнообразной аппаратуры осуществляются серьезные поиски кандидатов. Гравитационное микролинзирование может обнаружить достаточное количество тусклых звезд или черных дыр. Экспериментаторы на дне шахт могут найти какой-то новый вид частицы, которая наполняет собой гало нашей Галактики. Даже отрицательные результаты могут иногда быть интересны, потому что исключают некоторые кажущиеся логичными варианты.

Может существовать несколько различных видов темной материи. Будет удивительно, если окажется, что нет какого-то дополнительного количества коричневых карликов или черных дыр. Тем не менее версия с экзотическими частицами больше похожа на правду, потому что есть доказательства того, что большая часть темной материи не состоит из обыкновенных атомов, полученных с помощью дейтерия.

Тот факт, что более 90% Вселенной остаются неведомыми, приводит в смущение. И куда хуже понимать то, что темная материя может состоять из структур, масса которых колеблется от 10–33 г (нейтрино) до 1039 г (тяжелые черные дыры), т.е. степень неуверенности составляет более 70 порядков. Эта ключевая проблема может привести к трем направлениям поиска:

1. Сущности, составляющие темную материю, можно обнаружить напрямую. Коричневые карлики могут быть причиной гравитационного линзирования звезд. Если темная материя в нашей Галактике представляет из себя рой частиц, некоторые из них могут быть найдены упорными экспериментаторами глубоко под землей. Я буду оптимистом, если напишу, что через пять лет смогу рассказать о том, что же представляет собой темная материя[24].

2. Экспериментаторы и теоретики уже предоставили нам много информации о нейтрино. Возможно (хотя сейчас это и кажется маловероятным), что у нейтрино достаточно массы, чтобы быть важной составляющей темной материи[25]. Когда мы будем лучше понимать физику высоких энергий и плотностей, мы узнаем, какие еще виды частиц могли когда-либо существовать, и сможем рассчитать, как эти частицы пережили первые миллисекунды существования Вселенной, так же надежно, как теперь можем предсказать количество гелия и дейтерия, пережившее первые три минуты после Большого взрыва.

3. Темная материя доминирует в галактиках. То, когда и как сформировались галактики, то, как они собираются в скопления, очевидным образом зависит от того, из чего состоит их гравитационная доминанта и как она ведет себя при расширении Вселенной. Мы можем строить различные предположения по поводу темной материи, рассчитывать результаты каждого из них и смотреть, что лучше подходит к тому, что мы наблюдаем. Такие расчеты (которые будут описаны в главе 8) могут дать непрямые подсказки к разгадке того, чем же все-таки является темная материя.

Почему вещество, а не антивещество?

Пока что мы не знаем ни о том, какие частицы могли существовать на самых первых стадиях развития Вселенной, ни о том, сколько из них могли пережить эти стадии. Если, как я считаю, главный вклад в значение числа Ω вносят новые виды частиц, наша космическая непритязательность продвинется еще на шаг вперед. Мы привыкли к укоренившейся после Коперника мысли о том, что не занимаем особого, центрального места в космосе, но теперь нам также следует отвергнуть и «шовинизм частиц». Атомы, из которых состоят наши тела, и все видимые звезды и галактики являются просто вторичным материалом во Вселенной, где структуры большого масштаба управляются какими-то совсем иными (и невидимыми) субстанциями. Мы видим, что называется, всего лишь пену на гребнях волн, а не сами огромные

волны. Мы должны допустить возможность того, что нашим космическим соседом окажется тьма, состоящая из практически неизвестного материала.

Обычные атомы, по всей видимости, составляют во Вселенной «меньшинство». Их окружают рои частиц различных видов, переживших первые мгновения Большого взрыва. Но куда более загадочным является вопрос: почему вообще есть какие-то атомы — почему наша Вселенная не состоит исключительно из темной материи?

Для каждого вида частиц существует соответствующая античастица. Есть протоны (состоящие из трех кварков) и антипротоны (состоящие из трех антикварков). Противоположностью электрона является позитрон. Античастицы аннигилируют при встрече с обычными частицами, и их энергия (mc^2) превращается в излучение. Никакая антиматерия не существует в больших количествах ни внутри Земли, ни на поверхности. Крупицы ее могут быть получены в ускорителях, где частицы разбиваются друг о друга с энергией, достаточной для создания дополнительных пар частиц и античастиц. Антивещество было бы идеальным топливом для ракет. Когда оно аннигилирует, вся его энергия массы покоя высвобождается, в отличие от малой доли $\varepsilon = 0{,}007$ для ракет, приводимых в движение термоядерной реакцией. Антивещество должно быть спрятано от обычной материи, иначе оно выдаст себя мощным гамма-излучением при аннигиляции. Мы можем быть уверены, что вся наша Галактика — все ее звезды и газ — состоит из вещества, а не из антивещества. Ее содержимое постоянно перемешивается и перерабатывается при рождении и смерти звезд, и если бы вначале половину ее составляла материя, а вторую — антиматерия, то сейчас не осталось бы ничего. Но в более крупных масштабах это сочетание может быть другим: например, мы не можем опровергнуть предположение о том, что сверхскопления галактик состоят вперемежку из вещества и антивещества. Тогда почему существует видимое смещение в сторону одного вида материи?

В наблюдаемой нами Вселенной содержится 1078 атомов (в основном это атомы водорода, каждый из которых состоит из протона и электрона), но антиатомов в ней, по всей видимости, не так много. Самая простая вселенная, какую только можно представить, начнется с частиц и античастиц, перемешанных в равной пропорции. К счастью, наша Вселенная не такая, иначе все протоны аннигилировали бы с антипротонами на первых стадиях, когда плотность была высока. Все бы закончилось большим количеством излучения и темной материи, но ни атомы, ни звезды, ни галактики не появились.

Почему возникает такая асимметрия? Целых 1078 «лишних» атомов могли быть здесь с самого начала, но такое количество кажется неестественно огромным, чтобы его можно было принять просто как часть «первоначальных условий». Русский физик Андрей Дмитриевич Сахаров, известный своей ролью в создании водородной бомбы, а в последние годы существования СССР как диссидент, привнес некоторые провидческие идеи в космологию. В 1967 г. он задумался, могла ли небольшая асимметрия, возникшая сразу после Большого взрыва, «отдать предпочтение» частицам перед античастицами. Это неравновесие могло создать небольшой излишек кварков по сравнению с антикварками (что в итоге вылилось в перевес протонов по сравнению с антипротонами).

Идея Сахарова явно требует некоторого отклонения от идеальной симметрии между веществом и антивеществом. Доказательство такого явления нашли в 1964 г. два американских физика — Джеймс Кронин и Вал Фитч, что стало удивительным событием в то время. Они изучали распад нестабильных частиц, которые называются К-мезонами. Ученые обнаружили, что эта частица и ее античастица не являются идеальными зеркальными отражениями друг друга, но распадаются с небольшим расхождением в скорости. (Это означает, что, если мы случайно установим контакт с инопланетными физиками, которые смогут рассказать нам об экспериментах, проведенных в другой галактике, мы сможем сказать, состоят ли они из материи или антиматерии, — было бы очень осмотрительно это уточнить, прежде чем планировать встречу!) Распад К-мезонов затрагивает только так называемое «слабое взаимодействие» (которое управляет радиоактивностью и нейтрино), а не сильное ядерное взаимодействие. Тем не менее в объединенной теории взаимодействий этот тип асимметрии поставил одну силу над другой, подведя основу под идею Сахарова.

Предположим, что для каждой из 109 пар «кварк–антикварк» такая асимметрия добавляет один лишний кварк. Во время охлаждения Вселенной антикварки будут аннигилировать с

кварками, испуская кванты излучения. Теперь оно, остыв до очень низких температур, объясняет 2,7-градусное фоновое излучение, заполняющее межгалактическое пространство. Но на каждый миллиард кварков, которые аннигилировали с антикварками, один остался, потому что не нашел себе пары для аннигиляции. Во Вселенной в самом деле более чем в 1 млрд раз больше квантов излучения (фотонов), чем протонов (на 1 м3 приходится 412 млн фотонов и 0,2 протона), и все существующие во Вселенной атомы могли остаться в результате крошечного перевеса вещества над антивеществом. Возможно, мы и вся видимая Вселенная вокруг нас существуем только благодаря разнице в девятом знаке между количеством кварков и антикварков.

Наша Вселенная содержит атомы, а не антиатомы, из-за крошечного «преимущества», которое существовало на очень ранней стадии ее развития. Это, конечно, подразумевает, что протоны (или составляющие их кварки) могут иногда появляться или исчезать без того, чтобы то же самое происходило с антипротонами. Здесь все происходит не так, как в результирующем электрическом заряде: там соотношение сохраняется точно, поэтому если Вселенная вдруг начнет разряжаться, то всегда будет сохраняться равенство положительных и отрицательных зарядов.

Атомы не существуют вечно, хотя скорость их распада является чрезвычайно низкой: наиболее точные расчеты говорят о том, что время жизни атома составляет примерно 1035 лет. Это означает, что в резервуаре, наполненном 1000 т воды, в среднем будет распадаться один атом в год. Эксперименты, проводимые в таких же огромных подземных резервуарах, как те, которые проводятся для обнаружения нейтрино, не дают такой чувствительности, но из них мы уже точно узнали, что срок жизни атома по крайней мере превосходит 1033 лет.

В отдаленном будущем все звезды превратятся в холодные белые карлики, нейтронные звезды или черные дыры. Но и сами белые карлики и нейтронные звезды разрушатся, когда распадутся атомы, из которых они состоят. Если это разрушение займет 1035 лет, то тепло, выделившееся при таком длительном распаде, заставит каждую звезду излучать, как бытовой электрический обогреватель. В далеком будущем, когда все звезды истощат свои запасы ядерной энергии, эти слабые излучатели будут единственными источниками тепла, если не считать случайных вспышек, возникающих при столкновении звезд.

Настройка первоначального расширения

Число Ω может быть не точно равно единице, однако его значение сейчас составляет как минимум 0,3[26]. На первый взгляд это не указывает на «точную настройку» Вселенной. Однако, предположительно, в ранние эпохи существования Вселенной число Ω в самом деле было близко к 1. Этот разброс значений происходит потому, что, несмотря на то, что энергия расширения и гравитационная энергия пребывают в равновесии, расхождение между этими двумя энергиями растет: если бы в первоначальной Вселенной число Ω было чуть меньше единицы, то в конце концов кинетическая энергия стала бы доминирующей (и тогда число Ω действительно сильно уменьшится). С другой стороны, если число Ω значительно превышало единицу, то тяготение вскоре возьмет верх и повернет расширение в обратную сторону.

Пределы «траекторий» для нашей Вселенной, согласующиеся с данными о темной материи, которые сообщают нам о нынешнем значении числа Ω, показаны на рисунке 6.1. Также на рисунке изображены возможные вселенные, в которых жизнь — в том виде, в котором мы ее знаем, — не могларазвиться. Рисунок демонстрирует главную загадку: почему наша Вселенная после 10 млрд лет все еще расширяется, притом что значение Ω не слишком отличается от единицы?

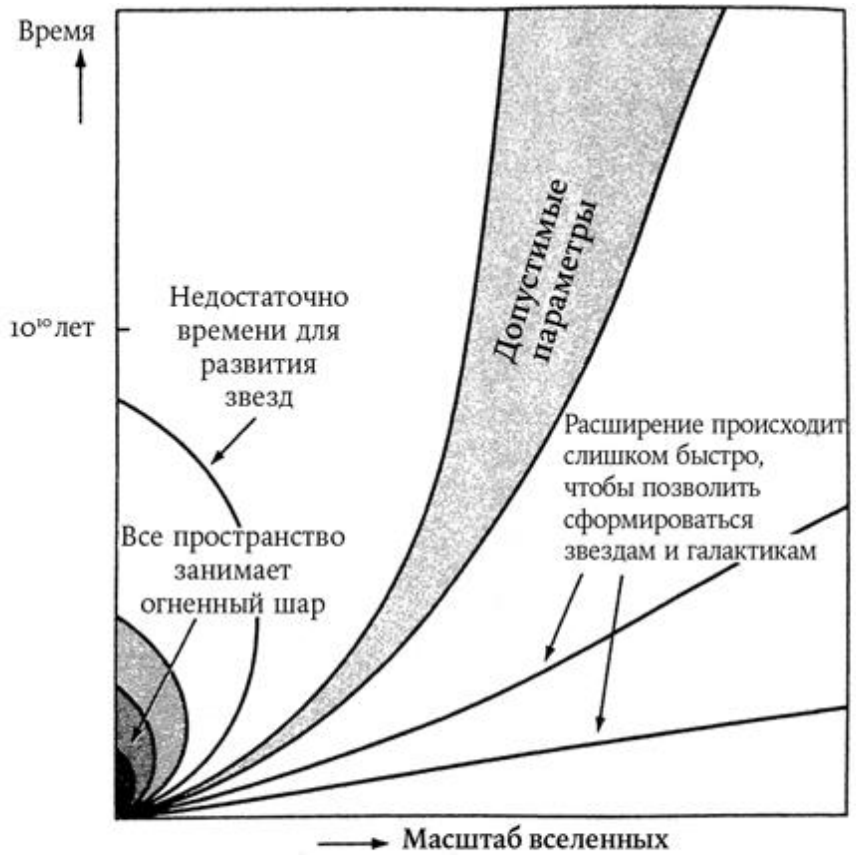


Рис. 6.1. Эта диаграмма показывает различные возможные пути развития вселенных. Несмотря на неуверенность в точном значении числа Ω в настоящее время, для того чтобы наша Вселенная попала в допустимый предел, первоначально условия должны были быть «настроены» с удивительной точностью. Без этой «настройки» расширение либо было бы таким быстрым, что галактики не успели бы сформироваться, либо таким медленным, что Вселенная схлопнулась бы до того, как наступило время для какой-либо более интересной эволюции. Объяснения такой точной «настройки» приводятся в главе 9

Как мы видели в предыдущей главе, мы уже можем сделать надежные выводы о том времени, когда возраст Вселенной составлял одну секунду, а температура — 10 млрд градусов. Теперь представьте, что вы «запускаете» вселенную. Траектория, по которой будет следовать ее развитие, зависит от того импульса, который вы ей дадите. Если она «полетит» слишком быстро, то энергия расширения вскоре станет настолько преобладать (другими словами, число Ω будет таким маленьким), что звезды и галактики так никогда и не смогут притянуться друг к другу и разлетятся в стороны. Вселенная будет расширяться вечно, но в ней не будет никакого шанса на жизнь. С другой стороны, расширение не должно быть слишком медленным: в таком случае вселенная быстро сожмется в «Большом хлопке».

Любая сложная структура должна поддерживаться неоднородностью в плотности и температуре (например, наша биосфера получает энергию, поглощая излучение Солнца и выделяя его в холодное межзвездное пространство). Если мы не антропоцентричны в своем восприятии жизни, мы можем прийти к заключению, что вселенная должна расшириться из состояния «огненного шара» и остыть по крайней мере ниже 3000 градусов, чтобы началась какая-то жизнь. Если первоначальное расширение будет слишком медленным, шанса для жизни не появится.

Удивительно, что наша Вселенная начала свое развитие с такой точной «настройкой» импульса, почти полностью компенсирующей замедляющее действие тяготения. Это похоже на то, как будто сидишь на дне колодца и бросаешь камень так, чтобы он достиг верхней точки траектории точно на уровне среза колодца. Требуется просто потрясающая точность: в первую секунду после Большого взрыва число Ω не могло отличаться от единицы больше, чем на одну часть из миллиона миллиардов (1 из 1015), чтобы Вселенная теперь, через 10 млрд лет, все еще расширялась со значением числа Ω, которое, без сомнений, не слишком отличается от единицы.

Мы уже отметили, что любой мало-мальски сложный космос должен взаимодействовать с «большим числом» N, отражающим слабость тяготения, а также иметь определенное значение числа ε, позволяющее протекать ядерным и химическим процессам. Но хотя эти условия и являются необходимыми, их недостаточно. Только вселенная с «хорошо отлаженной» скоростью расширения может позволить этим процессам развиваться. Поэтому число Ω нужно добавить в список критически важных чисел. В зарождающейся вселенной оно должно быть поразительно близким к единице. Если расширение будет слишком быстрым, тяготение никогда не стянет сгустки материи вместе, чтобы получились звезды и галактики. Если первоначальный импульс будет недостаточным, то «Большой хлопок» оборвет эволюцию, едва она только начнется.

На эту «настройку» специалисты по космологии реагируют по-разному. Самая распространенная реакция на первый взгляд кажется неправильной. Утверждается, что, поскольку первоначальная Вселенная началась со значения числа Ω, близкого к 1, должны быть какие-то глубинные причины того, почему оно является точно единицей. Другими словами, поскольку «настройка» очень точная, она должна быть абсолютно идеальной. Этот в данном случае странный способ рассуждения на самом деле отлично срабатывает в других контекстах: например, мы знаем, что в атоме водорода положительный электрический заряд протона нейтрализуется отрицательным зарядом вращающегося вокруг него электрона с огромной точностью — больше чем одна часть из 1021. Тем не менее никакие измерения не показывают, что общий заряд атома точно равен нулю, — всегда остается допуск на ошибку. Так называемая «теория великого объединения», которая установила взаимосвязь электрических сил с ядерными, в последние 20 лет предложила глубинную причину того, почему нейтрализация зарядов является точной. Тем не менее уже 50 лет назад многие физики предполагали, что нейтрализация зарядов является точной, хотя тогда у них не было никаких убедительных аргументов.

Другое удивительное открытие состоит в том, что скорость расширения (постоянная Хаббла) одна и та же во всех направлениях: ее можно описать единственным коэффициентом масштабирования, отображающим удлинение штырей в пространственной решетке Эшера (см. рис. 5.1). Мы легко можем представить себе вселенную, где растяжение в некоторых направлениях происходит быстрее, чем в других. Казалось бы, менее однородная вселенная представляет больше возможностей для этого. Почему, когда мы наблюдаем отдаленные районы Вселенной в противоположных направлениях, они выглядят такими похожими, словно копии? Или почему температура реликтового излучения везде практически одинакова? Как мы увидим в главе 9, для всех этих параметров нашей Вселенной и точной «настройки» числа Ω в первоначальной Вселенной существует интересное объяснение, ссылающееся на так называемую «инфляционную фазу».

глава 7

Число λ: замедляется или ускоряется космическое расширение?

Вселенная может огромной быть,
Не только такою слыть.
Но ты бы по ней не скучала,
Если б ее не существовало.
Пит Хейн[27]

Заглядывая в прошлое

В нашей Вселенной большая часть массы представлена в виде темной материи, а не в виде обычных атомов. Но достаточно ли сделать число Ω точно равным единице, чтобы полностью обеспечить «критическую плотность»? Предполагаемого количества атомов в галактиках и их скоплениях для этого не хватает. Тем не менее темная материя, равномерно распространенная по Вселенной, не влияла бы ни на внутреннее движение внутри скоплений, ни на возникающее вследствие влияния скоплений преломление света, увеличивающее и искажающее изображения далеких галактик. В силу вышесказанного она была бы еще более неуловимой. Дополнительное вещество выдавало бы свое присутствие, только воздействуя на космическое расширение в целом. Следовательно, можем ли мы узнать, как меняется скорость расширения?

В принципе это, конечно же, возможно. Красное смещение отдаленного объекта указывает нам, как он двигался, когда испустил луч света, по сравнению с тем, как он движется сейчас. Оценивая красное смещение и расстояние до отдаленных галактик (или каких-либо других объектов), мы можем найти скорость расширения в более раннюю эпоху, и сравнение с нынешней скоростью может дать нам сведения о том, как она изменилась, если вообще менялась.

Любые изменения в скорости расширения будут настолько плавными, что их можно заметить по прошествии нескольких миллиардов лет, поэтому их нельзя обнаружить никак иначе, кроме как наблюдая за объектами, отстоящими от нас на несколько миллиардов св. лет. Само по себе это не вызывает никаких затруднений, потому что превосходные телескопы с десятиметровыми зеркалами могут «нырнуть» во времена, кода возраст Вселенной составлял всего одну десятую от сегодняшнего. Гораздо серьезнее проблема поиска отдаленных объектов, которые были бы достаточно стандартны и при этом выглядели бы иначе, чем соседствующие с ними области, потому что мы наблюдаем их на более раннем этапе эволюции.

Объекты, у которых проще всего обнаружить красное смещение, — это квазары, высокоактивные центры галактик. Они совершенно не годятся на роль «стандартных светил» — квазаров со схожим красным смещением (другими словами, находящихся на одинаковых расстояниях), поскольку демонстрируют широкий разброс наблюдаемой светимости. Куда хуже то, что мы их настолько плохо понимаем, что не знаем, как их внутренние характеристики могут меняться при старении Вселенной.

Сами галактики мы знаем несколько лучше, чем квазары (хотя они и не такие яркие), и сейчас можем наблюдать у них подобное красное смещение, но тут есть свои сложности. Во Вселенной столько же видов галактик, сколько животных в зоопарке, и они с трудом поддаются классификации. С возрастом галактики развиваются. Происходит это по нескольким причинам: звезды эволюционируют и гибнут; новые звезды формируются из газа; к галактикам могут добавиться новые звезды — после захвата более мелких соседей (это называется «галактическим каннибализмом»).

Галактики слишком сложны, значительно отличаются друг от друга, и мы по-прежнему их недостаточно хорошо знаем, чтобы они могли служить «стандартными светилами». Мы понимаем их гораздо хуже, чем отдельные звезды. Одиночные звезды чересчур тусклы, чтобы их можно было обнаружить на космологических расстояниях: наши телескопы могут найти только целые галактики, уловив общий свет от миллиардов отдельных звезд. Но некоторые звезды в пору умирания взрываются, образуя сверхновые, и в течение нескольких дней сияют почти так же ярко, как целые галактики, состоящие из миллиардов звезд.

Охота за далекими сверхновыми

Особый вид сверхновых, имеющий обозначение «тип Ia», сигнализирует о своем появлении неожиданным термоядерным взрывом в центре умирающей звезды, когда ее сгорающее ядро достигает определенного минимума массы и становится нестабильным. Это, по существу, ядерная бомба с некоторой определенной мощностью. Физика происходящего процесса полностью ясна, и его детали для нас не очень важны. Важно то, что сверхновая Ia может расцениваться как «стандартное светило», достаточно яркое, чтобы его можно было обнаружить на больших расстояниях. По его яркости теоретически возможно сделать выводы о подлинных расстояниях и, также измерив красное смещение, связать скорость расширения и расстояние в прошлую эпоху. Специалисты по космологии надеялись, что такие измерения позволят определить, имеет ли место небольшое замедление (которое должно быть, если мы правильно

оцениваем количество всей темной материи) или некоторое ускорение расширения, которого можно ожидать, если, как подозревают многие теоретики, существует достаточное количество дополнительной темной материи, чтобы составить всю «критическую плотность», вследствие чего Вселенная напоминала бы простейшую теоретическую модель.

Эти сверхновые, кстати, демонстрируют и другую тенденцию, которая напрямую связана с их красным смещением: кажется, что те из них, которые находятся особенно далеко и дают наибольшее красное смещение, вспыхивают и горят медленнее, чем более близкие сверхновые того же типа. Это именно тот эффект, которого мы ожидали: часы на удаляющемся объекте должны идти медленнее. Если он будет «сигналить» через определенные промежутки времени, последним сигналам придется пройти большее расстояние, поэтому интервалы между их прибытием увеличатся14.

Процесс вспышки и затухания сверхновой сам по себе напоминает часы, поэтому замедление «кривой блеска», пропорциональное красному смещению, — это именно то явление, которого мы должны ожидать, если она отдаляется. В статической вселенной этому не могло быть никакого естественного объяснения. Это лучший ответ на гипотезу о том, что красное смещение является в некотором роде «эффектом усталости» света.

С социальной точки зрения астрономия является «большой наукой»: она требует сложного и дорогостоящего оборудования. Но сами по себе исследовательские программы не нуждаются в командной работе, которая необходима, например, в лабораториях, где используются мощные ускорители для изучения субатомных частиц. Астрономы по-прежнему могут оставаться одиночками, ведущими индивидуальные проекты, для которых требуется несколько ночей наблюдений на большом телескопе (что-то они могут делать и на небольших телескопах, как те астрономы, которые первыми открыли планеты, обращающиеся вокруг других звезд). Но мероприятия по наблюдению за сверхновыми в интересах космологии требуют продолжительных усилий многих сотрудников и использования нескольких телескопов. Первая непростая задача — поймать какое-то количество фотонов (слабых следов света), оставленных миллиарды лет назад взрывом звезды. Далекие сверхновые выявляются с помощью повторяющихся наблюдений одного и того же участка неба, в процессе которых ищут случайные, появляющиеся время от времени точки света в отдаленных галактиках. Поиски проводятся с помощью телескопов среднего размера, потому что большие приборы настолько востребованы, что в их рабочем графике невозможно выделить достаточно времени на полную программу, даже такую важную. Каждая сверхновая должна наблюдаться систематически, чтобы измерить видимую яркость так точно, как только возможно, и выстроить кривую блеска. Желательно это делать с помощью наземного телескопа с десятиметровым зеркалом или Космического телескопа имени Хаббла. Анализ поступающей информации и проверка ее надежности само по себе непростое дело.

Среди ученых существует вполне естественная традиция — воздерживаться от вынесения суждения по любому новому научному утверждению, особенно когда оно появляется неожиданно, пока не будут получены независимые доказательства. Иногда до того, как это случается, проходит довольно много времени. Поэтому очень большой удачей было то, что две отдельные команды посвятили себя проекту изучения сверхновых в космологии. Первым важным игроком в этой области стал Сол Перлмуттер, физик, работающий в Национальной лаборатории имени Лоуренса в Беркли, Калифорния. Возможно, из-за того, что в то время он не специализировался в области астрономии, Перлмуттера не испугали трудности и он начал работу примерно в 1990 г. Постепенно он объединил и вдохновил группу сотрудников как из Великобритании, так и из Соединенных Штатов. Вторая группа, также международная, появилась позже. В нее входили несколько исследователей, которые представили новые методы (позже использованные и группой Перлмуттера) для классификации сверхновых в подклассы, которые получили развитие.

К 1998 г. каждая команда обнаружила более 10 далеких сверхновых и добилась достаточной степени достоверности, чтобы объявить о предварительных результатах. Замедление было меньше, чем следовало ожидать, если бы число Ω было равно единице. Это само по себе было не удивительно — не имелось никаких доказательств того, что существует достаточно темной материи, чтобы оценить Ω выше 0,3, — хотя и шло вразрез с распространенным предубеждением

теоретиков, что космос был бы «проще», если бы число Ω точно равнялось единице. Но удивительно было то, что, по всей видимости, никакого замедления не существовало вообще и на самом деле расширение даже, казалось, ускоряется. Журнал Science назвал это научным открытием номер один в 1998 г. во всех областях знания.

Эти наблюдения были верными, если учесть возможности телескопов того времени. Далекая сверхновая так слаба, что ее параметры трудно измерить точно. Более того, некоторые астрономы беспокоились, что вмешивающийся в наблюдения «туман» от пылевых облаков ослабляет свет, из-за чего сверхновая кажется дальше, чем на самом деле. Также «термоядерная бомба» не всегда бывает точно откалибрована: например, ее мощность может зависит от количества углерода и других элементов у звезды-предшественницы. Запасы элементов будут ниже у тех объектов, которые сформировались, когда Вселенная была моложе (иными словами, у объектов с наибольшим красным смещением). Однако постоянно проводятся перекрестные проверки, и каждый месяц появляются новые сверхновые для сравнения[28].

Ускоряющаяся вселенная?

Ускорение расширения Вселенной подразумевает значительное и неожиданное знание о самом космосе: должна быть какая-то дополнительная сила, которая обеспечивает космическое отталкивание даже в вакууме. Эта сила неощутима в Солнечной системе, не оказывает она и каких-либо эффектов внутри нашей Галактики, но она может преодолеть тяготение в значительно более разреженной среде межгалактического пространства. Несмотря на гравитационное притяжение темной материи (которое само по себе вызвало бы постепенное замедление), расширение на самом деле может ускоряться. И мы должны добавить в наш список еще одно очень важное число, которое описывает силу этой «антигравитации».

Обычно мы думаем о вакууме как о среде, где ничего нет. Но если даже убрать из некоего района межзвездного пространства те несколько частиц, которые в нем содержались, прикрыть его от излучения и охладить до температуры абсолютного нуля, оставшаяся пустота все еще будет хранить в себе какие-то остаточные силы и проявлять их. Это предполагал и сам Эйнштейн. Уже в 1917 г., вскоре после того, как он разработал свою ОТО, ученый начал размышлять о том, как эту теорию можно приложить ко Вселенной. В то время астрономы изучили только нашу собственную Галактику, и естественно было бы предположить, что Вселенная статична: не расширяется и не сжимается. Эйнштейн определил, что, если бы Вселенная появилась в статическом состоянии, она немедленно начала бы сжиматься, потому что все в ней притягивается. Вселенная не могла бы оставаться в статическом состоянии, если только не существовала бы дополнительная сила, противостоящая тяготению. Поэтому Эйнштейн добавил к своей теории новое число, которое назвал «космологической постоянной» и обозначил греческой буквой λ (лямбда). В те времена уравнения Эйнштейна допускали существование статической вселенной, где при соответствующем значении λ космическое отталкивание полностью уравновешивает тяготение. Эта вселенная была конечной, но неограниченной: любой посланный вами луч света рано или поздно вернется и попадет вам прямо в затылок.

После 1929 г. эта так называемая «эйнштейновская вселенная» стала не более чем любопытной выдумкой. К тому времени астрономы поняли, что наша Галактика — это всего лишь одна из многих, а далекие галактики от нас удаляются, т.е. Вселенная не статична, а расширяется. После этого открытия Эйнштейн утратил интерес к числу λ. В самом деле, в своей автобиографии «Моя мировая линия» Георгий Гамов[29] вспоминает разговор за три года до смерти Эйнштейна, где последний назвал число λ «самым большим промахом», поскольку, если бы он его не ввел, уравнения приводили бы к выводу о том, что наша Вселенная расширяется (или сжимается). Возможно, Эйнштейн предсказал бы расширение еще до того, как Эдвин Хаббл открыл его[30].

На 70 лет причины, по которым Эйнштейн ввел число λ, стали неактуальными. Но это не дискредитировало само понятие. Напротив, сейчас число λ кажется менее надуманным и узкоспециализированным, чем считал его Эйнштейн. Теперь мы понимаем, что пустое пространство может быть каким угодно, только не простым. В нем в латентном состоянии находятся все виды частиц. Любая частица вместе с парной античастицей может быть создана

при правильной концентрации энергии. На еще более мелких масштабах пустое пространство может оказаться кипящей неразберихой струн, обнаруживающихся в дополнительных измерениях. С нашей современной точки зрения самая главная загадка состоит в том, почему число λ так мало. Почему бы всем сложным процессам, пусть даже они происходят в пустом пространстве, не иметь намного большего суммарного воздействия? Почему бы космосу не быть таким плотным, как атомные ядра или нейтронные звезды (в этом случае он замкнулся бы на себя в пределах 10–20 км)? Или даже, возможно, почему бы космосу не быть таким плотным, как Вселенная в первые 10–35 секунд — в эпоху, значение которой для обобщающих теорий мы обсудим в следующих главах? На самом деле это значение меньше плотности ультраранней Вселенной в 10120 раз — возможно, это было самое большое изменение порядка оцениваемой величины во всей науке в целом. Может быть, число λ точно и не равно нулю, но оно, конечно, очень мало и может конкурировать только с очень ослабленным тяготением межгалактического пространства.

Некоторые физики-теоретики предполагают, что пространство имеет сложную микроструктуру из крошечных черных дыр, которые способны компенсировать любую другую энергию в вакууме, что ведет к тому, что число λ точно равняется нулю. Однако эти доводы станут беспочвенны, если выяснится, что наша Вселенная действительно ускоряется и число λ не равно нулю, и заставят нас осторожнее относиться к высказываниям вроде: «Поскольку что-то является очень маленьким, обязательно должна быть веская причина того, почему оно точно равняется нулю».

Если число λ не равно нулю

Во время написания этой книги (в 1999 г.) мнение о том, что число λ не равно нулю, было широко распространено, но при этом не преобладало. Наблюдения за сверхновыми вполне могли содержать неучтенные ошибки. Но другие доказательства, пусть даже формальные и непрямые, укрепляют позиции ускоряющейся Вселенной. Реликтовое излучение — «остаточное свечение» после Большого взрыва — распределено по небу не совершенно однородно: существует небольшая разница температур, вызванная неоднородностями, которые потом превратились в галактики и их скопления. Ожидаемый размер самых заметных участков этих неоднородностей может быть вычислен. То, насколько крупными они кажутся на небе — составляют ли в поперечнике один или два градуса, — зависит от того, сколько источников тяготения, влияющих на фокусировку, находится вдоль луча зрения. Измерения такого рода не удавалось осуществить до конца 1990-х гг. (наблюдения проводятся в сухой высокогорной местности, Антарктике или во время длительных полетов воздушных шаров), и они свидетельствуют против модели Вселенной низкой плотности. Если бы число Ω действительно равнялось 0,3, а число λ было бы точно равно 0, то зародыши скоплений галактик выглядели бы меньше, чем на самом деле. Тем не менее любая латентная энергия в вакууме вносит свой вклад в фокусировку. Если бы число λ составляло около 0,7, мы получили бы удобную согласованность этих результатов точно так же, как с помощью наблюдений сверхновых доказываем ускорение расширения.

Тяготение — доминирующая сила для планет, звезд и галактик. Но в еще более крупных масштабах Вселенной средняя плотность так мала, что другая сила может взять верх. Космическое число λ, описывающее самую слабую силу во Вселенной, одновременно являющуюся и самой таинственной, кажется, контролирует расширение Вселенной и ее окончательную судьбу. «Самый большой промах» Эйнштейна может превратиться в конце концов в триумфальное открытие. Если подобное произойдет, то это будет не первый случай, когда работы Эйнштейна оказывают влияние, которое он сам не смог предвидеть. Самое значительное предвидение ОТО состоит в том, что она предсказала черные дыры, но об отношении Эйнштейна к этому явлению Фримен Дайсон писал так15:

Эйнштейн был не просто настроен скептически, он был откровенно враждебен к идее черных дыр. Он считал решение уравнений для черных дыр позором, который следует убрать из теории для улучшения ее выражения в виде формул, а не следствием из теории, которое следует подтвердить наблюдениями. Он никогда не выражал ни малейшего энтузиазма по поводу черных дыр ни в качестве понятия, ни в качестве физического явления.

Если число λ не равно нулю, мы сталкиваемся со следующей проблемой: почему значение, о котором мы можем судить из наблюдений, меньше на много порядков, чем то, что кажется «естественным» значением? Наша сегодняшняя Вселенная немногим отличалась бы, если бы была еще меньше (хотя долгосрочные прогнозы, о которых мы поговорим ниже, кое в чем были бы другими). Тем не менее значительно более высокое значение λ имело бы катастрофические последствия: вместо того чтобы начать соперничать с тяготением после того, как сформируются галактики, число λ с бóльшим значением взяло бы верх над гравитацией гораздо раньше, во время этапов высокой плотности. Если бы число λ начало доминировать до того, как галактики сконденсировались в расширяющейся Вселенной, или если бы оно обеспечило силу отталкивания, достаточную для того, чтобы разрушить их, тогда не было бы никаких галактик. Наше существование требует, чтобы число λне было слишком большим.

Отдаленное будущее

Геологи заглядывают в историю Земли, изучая отложения пластов; климатологи могут отследить изменения климата за последний миллион лет, «вгрызаясь» в идущие один за другим слои антарктического льда. Подобным же образом астрономы могут изучать космическую историю, делая снимки галактик, находящихся на разном расстоянии: те, которые находятся от нас дальше (имеют большее красное смещение), мы видим на более ранних этапах их развития. Трудной задачей для теоретиков (см. главу 8) является понимание галактик и их развития, а также создание компьютерных моделей, которые достоверно передают реальность.

Большинство галактик сейчас вступили в пору сонной зрелости, достигли состояния равновесия, когда их «метаболизм» замедлился. Формируется меньше новых звезд, и светит мало голубых звезд. Но что насчет отдаленного будущего? Что произойдет, если мы заглянем в момент, когда Вселенная будет в десять раз старше — т.е. ее возраст достигнет сотни миллиардов лет, а не десятка миллиардов? Мое любимое предположение (до того как появились более значимые доказательства) подразумевало, что в далеком будущем расширение остановится и сменится повторным сжатием, ведущим к «Большому хлопку», в котором все объекты Вселенной ждет та же самая судьба, что и астронавта, падающего в черную дыру. В этом случае нашей Вселенной для продолжения существования отведен конечный промежуток времени, а также она имеет границы. Но этот сценарий требует, чтобы значение числа Ω превысило единицу, что идет вразрез с доказательствами, накопленными в последние годы. Темная материя, несомненно, существует, но, кажется, ее недостаточно, чтобы составить всю критическую плотность: по всей видимости, Ω все-таки меньше единицы. Помимо всего прочего, дополнительное космическое отталкивание, описываемое числом λ, может на самом деле ускорять расширение Вселенной.

Кажется, расширение будет продолжаться бесконечно. Мы не можем предсказать, что будет с жизнью через десять миллиардов (или более) лет: она может исчезнуть, но, с другой стороны, может и развиться в состояние, когда станет способна влиять на весь космос и, возможно, сможет даже изменить эти прогнозы. Мы можем рассчитать окончательную судьбу неодушевленной Вселенной: даже самые медленно горящие звезды умрут, и все галактики нашей Местной группы — наш Млечный Путь, Туманность Андромеды и десяток более мелких галактик — сольются в единую систему. Бóльшая часть первоначального газа к тому времени будет связана мертвыми остатками звезд. Некоторые из них станут черными дырами, другие — очень холодными нейтронными звездами или белыми карликами.

Если заглянуть еще дальше, те процессы, которые сегодня идут слишком медленно, чтобы быть заметными, войдут в свои права. Столкновения звезд внутри обычной галактики сейчас случаются чрезвычайно редко (к счастью для нашего Солнца), но они будут происходить время от времени. Спокойное существование нашей Галактики станет иногда освещаться мощными вспышками, каждая из которых будет говорить о столкновении двух мертвых звезд. Потеря энергии через гравитационное излучение (эффект, предсказанный ОТО) сейчас идет неощутимо медленно, если не считать нескольких двойных звезд, с тесными орбитами, по которым они движутся с большой скоростью. Но при наличии достаточного времени это явление сожмет все звездные и планетные системы. Возможно, даже атомы не будут существовать вечно. Вследствие этого белые карлики и нейтронные звезды истощатся из-за распада частиц, их составляющих. В

конце концов распадутся и черные дыры. Поверхность дыры слегка расплывчата из-за квантовых эффектов, в результате чего она излучает. В нашей сегодняшней Вселенной этот эффект идет слишком медленно, чтобы нас заинтересовать, если только действительно не существуют мини-дыры размером с атом. Масштаб времени для полного распада черной дыры, равной по массе звезде, составляет 1066 лет, а черная дыра, равная по массе миллиону Солнц, исчезнет за 1093 лет.

В конце концов через 10100 лет единственное, что останется от нашей Местной группы галактик, — это всего лишь облачко темной материи и несколько электронов и позитронов. Все галактики внутри Местной группы подвергнутся внутреннему распаду и удалятся от нас. Но скорость, с которой они будут распыляться, полностью зависит от значения числа λ. Если λ будет равняться нулю, сила обычного тяготения замедлит удаление: хотя галактики станут неуклонно расходиться, их скорости (и красное смещение) будут постепенно уменьшаться, хотя так и не дойдут до нуля. Если у наших отдаленных потомков будут достаточно мощные телескопы, чтобы обнаружить галактики с большим красным смещением, несмотря на свойственное им потускнение и постоянно возрастающую дистанцию, они действительно смогут увидеть больше, чем видно на нашем сегодняшнем небе. Спустя, скажем, 100 млрд лет мы сможем видеть на 100 млрд св. лет: те объекты, которые сейчас находятся за пределом видимости (из-за того, что свету не хватило времени добраться до нас), появятся в поле зрения.

Но если число λ не равно нулю, космическое отталкивание будет тянуть галактики друг от друга с возрастающей скоростью. Они исчезнут из поля зрения быстрее, и их красное смещение станет возрастать. Наш предел видимости будет ограничен горизонтом, напоминающим некую версию вывернутого наружу горизонта событий вокруг черной дыры. Когда что-то падает в черную дыру, оно ускоряются, приобретает все большее красное смещение и исчезает из поля зрения, когда достигает «поверхности» дыры. Галактика в λ-доминирующей вселенной станет двигаться с ускорением по направлению от нас, и чем она ближе к горизонту, тем ее скорость будет ближе к скорости света. В более поздние времена мы увидим не больше, чем сейчас. Все галактики (за исключением Туманности Андромеды и других маленьких галактик, которые тяготение связывает в нашу Местную группу) обречены исчезнуть из поля зрения. Их далекое будущее лежит вне предела нашей видимости, и оно для нас так же недоступно, как события внутри черной дыры. С течением времени пустота межгалактического пространства будет увеличиваться по экспоненте.

глава 8

Первичная «рябь»: число Q

Вселенная была создана в менее чем оформленном состоянии, но была наделена даром изменяться из неоформленной материи в поистине великолепный набор структур и форм жизни.

Бл. Августин

Тяготение и энтропия

В природе, как и в музыке или живописи, даже самые замечательные творения не бывают ни строгими и абсолютно идеальными, ни совершенно хаотическими и непредсказуемыми. Они сочетают и то и другое. Искусно «выстроенная» космическая среда, которую мы видим вокруг, не полностью упорядочена, но и не является местом, которым правит исключительно случай. Всего существует 92 вида атомов, а не только простые водород, дейтерий и гелий, которые появились в момент Большого взрыва. Атомы теперь оказались в сложных организмах земной биосферы, в звездах, а некоторые рассеяны в пустоте межгалактического пространства. Разница температур также огромна: у звезд поверхность жарко пылает (а ядро еще горячее), но температура темного пространства близка к абсолютному нулю — оно подогрето всего до 2,7 °K реликтовым излучением, оставшимся после Большого взрыва.

Вся эта замысловатая многогранность развилась из скучного аморфного огненного шара, и это может показаться нарушением «священного» физического принципа — второго закона термодинамики. Этот закон описывает непоколебимое стремление к единообразию и отход от схем и структур: если что-то является горячим, то оно стремится остыть; если что-то является

холодным, оно нагревается. Чернила и воду легко смешать, в то время как обратный процесс — возможность взбалтывать мутную жидкость до того, чтобы краска собралась в темную каплю, — поразил бы нас. Упорядоченные структуры смешиваются и теряют порядок, но не наоборот. Используя термины физики, мы сказали бы, что энтропия не уменьшается. Ее заметное понижение в каком-то отдельном месте всегда уравновешивается увеличением энтропии в других местах. Классический пример этого принципа — паровой двигатель, где упорядоченное движение поршня всегда сопровождается потерей тепла.

Тем не менее когда мы рассматриваем действие тяготения, нам следует пойти вопреки интуиции. Звезды, например, удерживают форму благодаря направленной к их центру силе притяжения. Эта сила уравновешивается давлением раскаленных внутренних слоев, направленным наружу. Каким бы странным это ни казалось, но звезды нагреваются, когда теряют энергию. Представьте, что топливо, которое находится в центре Солнца, погаснет. Его поверхность будет продолжать сиять, потому что тепло распространяется от ядра, которое остается еще более горячим. Если процесс ядерного синтеза не будет поддерживать это тепло, Солнце начнет постепенно сжиматься, в то время как энергия станет вытекать наружу (это будет продолжаться примерно 10 млн лет, как и полагал лорд Кельвин в XIX в.). Но такое сжатие на самом деле сделает ядро еще горячее, чем раньше: тяготение на коротких расстояниях действует сильнее. Поэтому температура в центре будет подниматься для обеспечения достаточного давления, чтобы уравновесить бóльшую силу, давящую снаружи. Нечто подобное происходит, когда искусственный спутник постепенно опускается по спирали на более низкую орбиту, испытывая сопротивление атмосферы: он нагревается, но только половина энергии, высвобожденной благодаря тяготению, переходит в тепло. Другая половина идет на ускорение спутника, потому что чем орбита ниже, тем быстрее он движется.

Поэтому мы не должны удивляться тому, что новые звезды формируются внутри беспорядочных облаков холодного, пыльного газа. Районы с наибольшей плотностью стягиваются благодаря собственному тяготению, настолько сжимаясь, что вспыхивают, как звезды. К примеру, именно это происходит в облаках в Орионе или в Туманности Орел. Соотношение больших и маленьких звезд, возникших в результате этого процесса, все еще трудно вычислить даже с помощью самых мощных компьютеров. (Именно поэтому мы не уверены в том, сколько в нашей Галактике коричневых карликов, которые могут вносить вклад в темную материю.) Однако в формировании звезд нет никакой тайны: как только тяготение берет власть в системе, происходит неизбежное сжатие.

От Большого взрыва к галактикам

Облака газа внутри нашей Галактики (и внутри других галактик) настолько перемешаны и переработаны, что не сохранили никакой памяти о своем происхождении. Таким образом, формирование звезд совершенно не зависит от общей эволюции космоса. Но развитие самих галактик более замысловато, чем соответствующий процесс у звезд. Происхождение галактик связано с ранними эпохами развития Вселенной. Они приобрели форму благодаря своей «наследственности», а не только благодаря среде.

Если бы наша Вселенная с самого начала была полностью однородным и сглаженным образованием, то оставалась бы такой и во время расширения. После 10 млрд лет она состояла бы из рассеянной темной материи, а водород и гелий были бы так разрежены, что приходилось бы меньше одного атома на 1 м3. Это было бы холодное и скучное место: никаких галактик, а следовательно — и никаких звезд, никакой периодической таблицы, никаких сложных структур и, разумеется, никаких людей. Но даже очень незначительные неоднородности на первоначальном этапе имеют большое значение, потому что в процессе расширения плотность контрастирует с увеличением размеров. Любой клочок, который имеет плотность хотя бы чуть выше средней, замедляется сильнее, потому что испытывает на себе бóльшую силу тяготения; его расширение запаздывает все больше и больше по сравнению со средним значением. (По аналогии, если мы подбросим два мяча с чуть-чуть разными скоростями, их траектории вначале могут отличаться совсем незаметно. Более медленный мяч тем не менее полностью остановится и уже начнет падать, когда более быстрый мяч все еще будет двигаться вверх.) Тяготение усиливает самые крохотные неравномерности в практически однообразном огненном шаре,

усугубляет противопоставление плотностей, пока более плотные районы не перестают расширяться и не начинают конденсироваться в структуры, которые удерживает притяжение.

Самые заметные структуры в космосе — звезды, галактики и скопления галактик — удерживаются тяготением. Мы можем оценить, с какой силой они стянуты вместе — или, что то же самое, сколько энергии потребуется, чтобы разрушить и рассеять их, — используя пропорцию их энергии массы покоя (mc2). Для самых больших структур в нашей Вселенной — скоплений и сверхскоплений — результат равен примерно одной части к 100 000. Это безразмерное число — соотношение двух энергий, и мы называем его Q.

Тот факт, что число Q так мало (порядка 10–5), означает, что тяготение на самом деле достаточно слабо действует в галактиках и их скоплениях. Таким образом, теория Ньютона достаточно хороша, чтобы описать, как звезды двигаются внутри галактик и как каждая галактика обращается по своей орбите под влиянием притяжения других галактик и темной материи внутри скопления. Малость Q также означает, что вполне допустимо рассматривать нашу Вселенную как приблизительно однородное образование: точно так же мы можем рассматривать земной шар как гладкий и круглый, если высота волн и неровностей на его поверхности составляет всего 1/100 000 радиуса (всего лишь 60 м для шара размером с Землю).

Неравномерности были «впечатаны» в ее структуру очень рано, еще до того как Вселенная «узнала» о галактиках и их скоплениях. Об их пропорциях (или, более того, о любом их параметре, который в нашей сегодняшней Вселенной считается значительным) нельзя ничего сказать. Проще всего предположить, что в первоначальной Вселенной ничто не выделялось по размеру, поэтому неравномерности были одинаковы в любых масштабах. Степень изначальной «шероховатости» каким-то образом сложилась, когда Вселенная имела микроскопический размер. О том, как это могло произойти, мы поговорим в следующей главе. Число Q принципиально важно для определения «консистенции» структуры нашей Вселенной, которая могла быть совершенно иной, если бы значение этого числа было намного больше или намного меньше.

Неравномерность реликтового излучения

В самом начале Вселенная была плотной и непрозрачной, похожей на раскаленный газ внутри звезды. Но после 0,5 млн лет расширения температура упала примерно до 3000 °С — чуть ниже, чем на поверхности Солнца. Когда Вселенная остыла еще сильнее, наступила буквально темная эра. Темнота царила до тех пор, пока не сформировались первые протогалактики и свет не появился снова.

Сейчас перед астрономами стоит трудная задача — узнать, как закончилась темная эра. В этом плане много надежд возлагается на космический телескоп нового поколения. Планируется, что у него будут детекторы красного света и инфракрасного излучения и зеркало диаметром 6,5 м (по сравнению с зеркалом диаметром всего 2,4 м у Космического телескопа имени Хаббла)[31].

Реликтовое излучение, оставшееся после Большого взрыва, — прямое послание из той эпохи, когда галактики существовали только в форме «зародышей». Чуть более плотные районы Вселенной расширялись медленнее среднего значения. Им было предрешено стать галактиками или их скоплениями. Другие, чуть менее плотные, были обречены стать пустотой. И температура реликтового излучения должна нести на себе отпечаток этих флуктуаций. Ожидаемый результат составляет одну часть из 100 000 — в точности то же самое значение, что и у Q, фундаментального числа, характеризующего неравномерность.

Несомненным космологическим успехом 1990-х гг. было реальное нанесение на карту этих предшественников космической структуры. Реликтовое излучение примерно в 100 раз слабее излучения Земли, температура поверхности которой составляет около 300 градусов выше абсолютного нуля. Очень серьезную техническую трудность представляет измерение разницы температур еще в сотню тысяч раз меньше. Спутник NASA COBE, запущенный в 1990 г., достиг потрясающей точности в подтверждении того, что реликтовое излучение имеет спектр «черного тела» (см. главу 5). Также у него на борту был первый в истории инструмент, достаточно чувствительный к тому, чтобы распознавать, что температура излучения в некоторых направлениях чуть-чуть выше, чем в других. Спутник просканировал все небо, измеряя температуру с достаточной точностью, чтобы составить карту неоднородностей.

Измерения такого рода лучше всего делать из космоса, потому что испарения воды в атмосфере поглощают часть излучения. За данными, полученными с COBE, последовали другие измерения, сделанные на вершинах гор, на Южном полюсе (где очень низкая влажность) и с помощью оборудования, находящегося на воздушных шарах. С помощью этих экспериментов удалось нанести на карту только небольшую площадь, а не все небо, как это мог сделать спутник, но была достигнута та же степень чувствительности при значительно более низких затратах.

Тем не менее следующее большое достижение было сделано с помощью двух космических аппаратов, оснащенных более совершенными и чувствительными датчиками, чем COBE: аппарат NASA MAP[32] и аппарат Европейского космического агентства (ESA) Planck. В течение нескольких лет они собрали достаточно точную информацию о неоднородности первоначальной Вселенной по многим разным параметрам, что позволило разрешить ключевые вопросы о возникновении галактик. Реликтовое излучение содержит массу информации об очень ранней Вселенной. Например, оно помогло определить числа Ω и λ, а также число Q.

Обнаружение неоднородностей в температуре остаточного излучения, составляющих одну часть из 100 000, вызвало скорее облегчение, а не удивление. Если бы реликтовое излучение предполагало еще бóльшую однородность ранней Вселенной, то существование скоплений и сверхскоплений в нашей сегодняшней Вселенной было бы загадкой: для этого потребовалась бы еще какая-то дополнительная сила, помимо тяготения, которая смогла бы увеличивать контраст плотности.

Но тот факт, что число Q составляет всего лишь 1/100 000, на самом деле самая удивительная характерная черта нашей Вселенной. Если вы подберете камень, имеющий форму шара с точностью до 1/100 000, вы, конечно, можете задаться вопросом о том, что вызвало маленькие неоднородности, но еще сильнее вас удивит его почти идеальная гладкость. «Инфляция», описанная в главе 9, — это лучшая из имеющихся теорий об этом, и температурные флуктуации являются важными критериями для проверки соответствующих идей.

Эволюция «виртуальных» вселенных

Когда возраст Вселенной составлял миллион лет, она все еще достаточно равномерно расширялась. Как же сформировались структуры и возникла та космическая картина, которую мы сейчас наблюдаем? В наши дни мы можем использовать компьютеры, чтобы изучать «виртуальные» вселенные. В начале симуляции материя расширяется, но не совсем одинаково, потому что неоднородности, отвечающие значению числа Q, заложены как часть первоначальных условий.

Основным веществом, создающим тяготение, является «темная материя» — частицы, оставшиеся от начальной эпохи развития Вселенной, которые едва ли когда-либо сталкивались друг с другом, но испытывают воздействие тяготения. Если вы станете брать среднее значение из все более и более крупных объемов, то Вселенная на ранней стадии будет казаться все более гладкой16. Это означает, что, если бы тяготение было единственной реальной силой, первыми сформировались детали мелкого масштаба. Космические структуры формируются иерархически. Первыми сгустились тучи темной материи на субгалактическом уровне. Они развились в объекты, по массе равные галактикам, которые позже сформировали скопления. Тяготению потребовалось больше времени, чтобы развернуть вспять расширение в более крупных масштабах.

Но это иерархическое объединение в группы само по себе ведет к темной и стерильной вселенной. «Закваска» для вселенной — это атомы. Их общая масса намного меньше массы темной материи, они пассивно движутся по Вселенной, создавая разреженный газ, который испытывает на себе притяжение темной материи. Но все, что мы сейчас наблюдаем, зависит от этого газа.

Он ведет себя более сложно, чем темная материя, потому что тяготение — это не единственная сила, которая на него действует. Газ испытывает на себе притяжение, но одновременно он испытывает и давление. Это давление не позволяет притяжению затолкать газ в очень мелкие сгустки темной материи. Первые сформировавшиеся сгущения газа — те самые, которые стали «первым светом», положившим конец космической темной эпохе, — были, как

следствие, в миллион раз тяжелее звезд. Компьютерные программы, используемые для того, чтобы проследить движение газа, похожи на те, которыми пользуются авиационные инженеры, чтобы изучать потоки воздуха, возникающие вокруг крыльев и проходящие сквозь турбины. Такие расчеты считаются достаточно надежными, чтобы заменить проверки в аэродинамической трубе, но тем не менее вычислить, что же происходит внутри этих сжимающихся облаков, гораздо труднее, и никому пока не удалось создать модель, которая начиналось бы с одного облака, а заканчивалась популяцией звезд[33]. Облако, внутри которого содержится газ, равный по массе миллионам Солнц, может распасться на миллион отдельных звезд, таких, как Солнце, или на меньшее количество объектов, бóльших по массе. Облако даже может остаться единым целым и сжаться до одной суперзвезды или квазара.

Эти первые объекты сформировались, когда возраст Вселенной составлял всего несколько сотен миллионов лет — несколько процентов от ее сегодняшнего возраста. К тому времени, как Вселенная достигла 1 млрд лет, появились структуры размером с галактику, у каждой из них был свой набор звезд, и удерживались они вместе не только собственным тяготением, но и с помощью темной материи, которая сформировала «рои» в десять раз больше и тяжелее. Газ продолжает падать внутрь этих объектов и остывать. Если они вращаются, то газ превращается в диск и сгущается в звезды, тем самым начиная процесс переработки, который синтезирует и распространяет все элементы периодической системы Менделеева.

Компьютерные модели, которые показывают этот процесс хотя бы в грубом приближении, можно прокручивать, как фильмы, ускоряя расширение Вселенной и развитие галактик примерно в 1016 раз по сравнению с реальными событиями! На рисунке 8.1 показаны шесть кадров из такой симуляции.

Как и отдельные галактики, скопления и сверхскопления появились в результате тяготения. Недавно сформированные галактики не распространялись совершенно однородно — в некоторых местах их было немного больше, чем в других. С продолжением расширения районы, где находились излишки массы, испытывали дополнительное замедление, поэтому галактики в этих районах в конце концов оказались расположены более плотно, чем в среднем17.

Как мы можем проверить, отражает ли виртуальная вселенная события, происшедшие в нашей реальной Вселенной? Модель должна имитировать наблюдаемые характеристики сегодняшних галактик — их типичные размеры и формы, пропорции спиральных галактик и пропорции эллиптических, а также то, как они объединяются в скопления. Но требуется сделать даже больше: модель должна соответствовать тем «моментальным снимкам», которые показывают нам, как выглядели галактики в прошлом и как они объединялись в скопления.

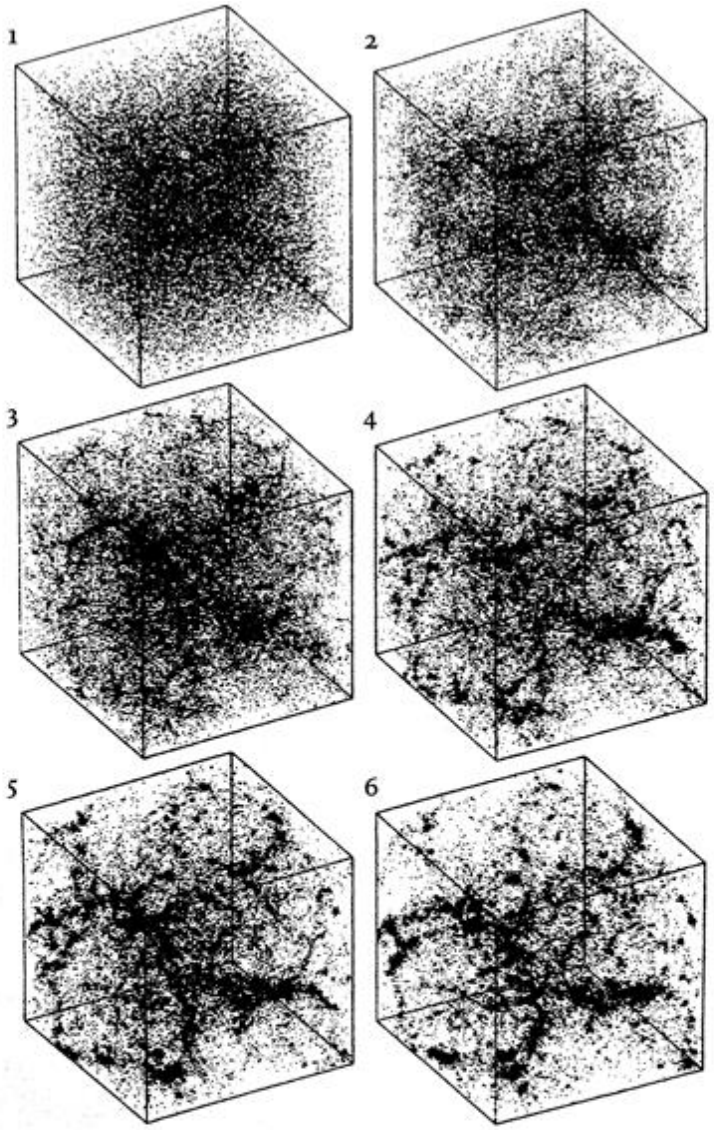


Рис. 8.1. Шесть кадров компьютерной модели, показывающей, как развивается структура расширяющейся вселенной. На этих рисунках мы не показываем общее расширение, поэтому кубы остаются одного и того же размера. Первоначально зарождающаяся структура состоит из практически неотличимых неоднородностей. Во время расширения районы с большей плотностью все больше и больше отстают от других. Расхождение плотности все возрастает, и в конце концов формируются удерживаемые тяготением структуры. Они сливаются вместе, создавая галактики, — это необходимо как условие нашего собственного появления

Как уже говорилось раньше, сейчас до нас доходит свет от самых отдаленных галактик, которые телескопы нового поколения могут обнаружить и проанализировать. Этот свет покинул галактики, когда те только-только были сформированы, и они выглядят не так, как современные галактики. Ничто не напоминает устойчиво вращающиеся диски, и только небольшая часть составляющего их газа уже превратилась в звезды. Большинство таких галактик невелики по размеру: потребуются дальнейшие объединения и «каннибализм» со стороны доминирующих галактик, чтобы получились крупные образования, которые мы видим сегодня.

В качестве побочного продукта образования ранних звезд происходит еще нечто интересное. Некоторая часть газа попадает в центр скопления частиц темной материи, притягивается

собственным тяготением и создает «суперзвезду», которая более чем в миллион раз тяжелее обычной. Столь большой объект светит так ярко, что его ядерного топлива хватает ненадолго. Жизнь этой звезды кончается не взрывом, а сжатием, в результате которого формируется черная дыра. Таким образом, когда начинается формирование галактик, пространство «протыкается» такими дырами. Газ продолжает в них течь, высвобождая энергию более мощную, чем энергия света всей остальной галактики.

Такие объекты называют «квазарами» или «активными ядрами галактик», и они интересны по двум причинам. Во-первых, они светят ярче, чем сами галактики, и таким образом выполняют роль прожекторов, освещающих отдаленные части Вселенной. Спектр светящегося облака газа квазара дает нам убедительные данные о количестве дейтерия, что является, как мы уже видели, важной проверкой теории Большого взрыва. Во-вторых, квазары предоставляют нам существенные доказательства ОТО Эйнштейна. Энергия, которую они излучают, исходит от материи, которая вращается очень близко к черной дыре, а возможно, и от самой вращающейся дыры. Нет никакого шанса получить подлинное изображение потока, — это будет, пожалуй, даже более трудной задачей, чем получить снимок землеподобной планеты, обращающейся вокруг другой звезды, — но исходящее от него излучение имеет красное смещение из-за сильной гравитации (и оно, конечно же, добавляется к обычному космологическому красному смещению). Также будут присутствовать большие доплеровские смещения, возникающие из-за высокой скорости, с которой газ вращается вокруг дыры (в красную часть спектра на той стороне, которая удаляется; в синюю часть — для газа, который приближается с другой стороны). Благодаря прогнозируемому движению и гравитационным полям мы можем проверить, имеют ли черные дыры на самом деле те самые свойства, которые предсказывает теория Эйнштейна.

Как много можно предсказать?

Если бы кому-то захотелось в одном предложении подвести итоги и ответить на вопрос: «Что же произошло после Большого взрыва?», лучше всего набрать полную грудь воздуха и сказать: «Практически с самого начала тяготение формирует космические структуры и увеличивает разницу температур, необходимую для развития многогранности, которая простирается вокруг нас на 10 млрд св. лет и частью которой мы являемся».

Как только формируются системы, достаточно тяжелые, чтобы иметь свое собственное тяготение, отклонения от среднего нарастают. Вследствие этого наша Вселенная могла развиться из первоначального огненного шара, равномерно горячего, в упорядоченную систему, в которой есть очень горячие звезды, испускающие излучение в очень холодный космос. Так начинается эпоха все более усложняющейся космической эволюции и появления жизни. Отдельные звезды в процессе развития становятся плотнее (некоторые заканчивают как нейтронные звезды или черные дыры), тогда как в целом материя распространяется более тонко. Эта многогранность является результатом цепочки событий, которую специалисты по космологии могут проследить до ультраплотной первоначальной среды, которая практически не имела структуры.

Наша точка зрения на то, как появились космические структуры, как и точка зрения Дарвина на биологическую эволюцию, является убедительной общей схемой. Начало всего процесса, как и в теории Дарвина, все еще остается загадкой: то, как обусловлено число Q (возможно, микроскопическими вибрациями в очень ранней Вселенной), все еще вызывает недоумение, как и происхождение первых организмов на Земле. Но космология проще в одном очень важном отношении: после того как установлена начальная точка, результат в общих чертах предсказуем. Все огромные части Вселенной, которые одинаково начались, закончат статистически одним и тем же образом. Напротив, общий курс биологической эволюции чувствителен к «происшествиям» — изменениям климата, падениям астероидов, эпидемиям и т.д., поэтому, если заново запустить историю Земли, она может закончиться в совсем другой биосфере.

Поэтому так важно компьютерное моделирование структурных образований. Галактики и их скопления появились в результате воздействия тяготения на первоначальные неоднородности. Мы не пытаемся объяснить всю схему в деталях, а хотим только выявить ее статистические свойства — точно так же, как океанограф ставит себе целью получить статистические данные о волнах, а не детали одной волны в единственном снимке в конкретном месте и времени.

Начальная точка для такого анализа — это расширение Вселенной, описываемое с помощью чисел Ω, λ и Q. Результат очень чувствителен к этим трем ключевым числам, установленным (мы еще точно не уверены как) на самом раннем этапе существования Вселенной.

Настройка Q

Очевидно, что для образования галактик, их скоплений и сверхскоплений требуется достаточное количество темной материи во Вселенной, а также достаточное количество атомов. Значение числа Ω должно быть не слишком низким: во вселенной, где очень много излучения и мало чего-либо еще, тяготение никогда не сможет преодолеть давления. А число λ не должно быть таким высоким, чтобы космическое отталкивание преодолело тяготение до того, как сформируются галактики. Также должно иметься достаточное количество обыкновенных атомов, первоначально находящихся в рассеянном газе, чтобы сформировать все звезды во всех галактиках. Но мы уже видели, что нужно и кое-что еще, а именно изначальные неоднородности, которые должны стать «ростками» будущих структур.

Число Q измеряет разброс этих неоднородностей или «ряби». Почему Q составляет примерно 10–5, по-прежнему загадка. Но его значение очень важно: будь оно намного меньше или намного больше, «ткань» нашей Вселенной была бы совсем иной и менее способствовала образованию жизни.

Если Q будет меньше 10–5, но при этом другие космические числа не изменятся, то скоплениям темной материи потребуется больше времени, чтобы развиться, и они будут меньше и более разреженными. Получившиеся в результате галактики будут «анемичными», формирование звезд в них пойдет медленно и неэффективно, а «отработанная» материя улетит из галактики и не будет перерабатываться в новые звезды, которые могли бы образовать вокруг себя планетные системы. Если Q будет меньше 10–6, газ вообще никогда не сконденсируется в связанные тяготением структуры, и такая вселенная навсегда останется темной, не имеющей ярко выраженных особенностей, даже если изначальная «смесь» атомов, темной материи и излучения была той же самой, что в нашей Вселенной.

С другой стороны, вселенная, где число Q будет значительно больше 10–5 — где первоначальные неоднородности возникают с бóльшим разбросом, — будет беспокойным и жестоким местом. Районы, по размеру превышающие галактики, сконденсируются гораздо раньше. Они не станут раздробляться на звезды, а вместо этого сожмутся в огромные черные дыры, каждая из которых будет гораздо тяжелее целого скопления галактик в нашей Вселенной. Весь сохранившийся газ будет таким горячим, что станет испускать интенсивные рентгеновские и гамма-лучи. Галактики (если и сумеют сформироваться) будут связаны гораздо сильнее, чем галактики в нашей Вселенной. Звезды будут находиться ближе друг к другу и сталкиваться слишком часто, чтобы вокруг них могли существовать стабильные планетные системы. (По тем же причинам планетные системы не могут существовать очень близко к центру нашей собственной Галактики, где звезды находятся в куда более плотных скоплениях по сравнению с нашим отдаленным районом.)

Тот факт, что число Q составляет 1/100 000, к слову сказать, значительно облегчает жизнь специалистов по космологии: нам гораздо легче понимать сущность явлений, чем в том случае, если бы Q было больше. Маленькое число Q гарантирует, что структуры малы по сравнению с горизонтом и что наше поле зрения достаточно велико, чтобы вместить множество независимых друг от друга участков, каждый из которых достаточно велик. Если Q будет намного больше, то сверхскопления сами объединятся в такие структуры, которые уйдут за горизонт (а не ограничатся, как в нашей Вселенной, размером примерно 1% этой шкалы). Тогда нет никакого смысла говорить о средних, «сглаженных» свойствах нашей наблюдаемой Вселенной и невозможно будет определить такие числа, как Ω.

Малость Q, без которой специалисты по космологии не смогли бы добиться никаких успехов, до недавнего времени казалась приятной случайностью. Только сейчас мы начинаем понимать, что это не просто удобство для космологов; жизнь не могла бы развиться, если бы у Вселенной не было такой все упрощающей особенности.

Наша космическая среда обитания III: Что лежит за горизонтом?

…Нет никакого сомнения, что мир сотворен не во времени, но вместе с временем. Ибо что происходит во времени, то происходит после одного и прежде другого времени, — после того, которое прошло, и прежде того, которое должно наступить; но никакого прошедшего времени быть не могло, потому что не было никакой твари, движение и изменение которой определяло бы время. Но несомненно, что мир сотворен вместе с временем…[34]

Бл. Августин

Насколько достоверна история Большого взрыва?

Теорию Большого взрыва пытаются опровергнуть вот уже более 30 лет[35]. Различные данные могли доказать ее несостоятельность, если бы были иными. Вот пять из них.

- Астрономы могли обнаружить объект, содержание гелия в котором равняется 0 или имеет уровень ниже 23% от содержания водорода. Это было бы фатальным для теории, поскольку термоядерная реакция с водородом может легко произвести гелий сверх того количества, которое было до появления галактик, но нет никакого способа превратить весь гелий обратно в водород.

- Фоновое излучение, так точно измеренное аппаратом COBE, могло иметь спектр, отличающийся от ожидаемого спектра «абсолютно черного тела» (или теплового равновесия)18.

- Изучая нейтрино, физики могли обнаружить что-нибудь, несовместимое с Большим взрывом. В «огненном шаре» нейтрино должны были по численности превосходить атомы во много раз — примерно в миллиард, как и фотоны. Если бы каждый нейтрино весил хотя бы миллионную долю от веса атома, то они в целом составили бы слишком большую массу для ныне существующей Вселенной — даже бóльшую, чем скрыта в темной материи. Как мы уже говорили в главе 6, реальная масса нейтрино (если она не равна нулю), по всей видимости, слишком низка, чтобы опровергнуть теорию. Но может выясниться, что она выше.

- Количество дейтерия могло пойти вразрез с той величиной, которая, как ожидалось, сохранилась от Большого взрыва.

- Температурные флуктуации на небесной сфере могли бы дать значение числа Q, которое было бы несовместимо с тем, что логически выводится из нынешней структуры Вселенной, если бы оно не равнялось 1/100 000, как уже говорилось в главе 8.

Теория Большого взрыва прошла все испытания. Обоснования, позволяющие экстраполировать величины на события, происходившие, когда наша Вселенная расширялась всего одну секунду (когда начал формироваться гелий), достойны того, чтобы приниматься так же серьезно, как, например, выводы о ранней истории Земли, которые делаются на основании исследования камней и окаменелых остатков организмов. Они точно так же являются непрямыми и имеют меньше количественных характеристик.

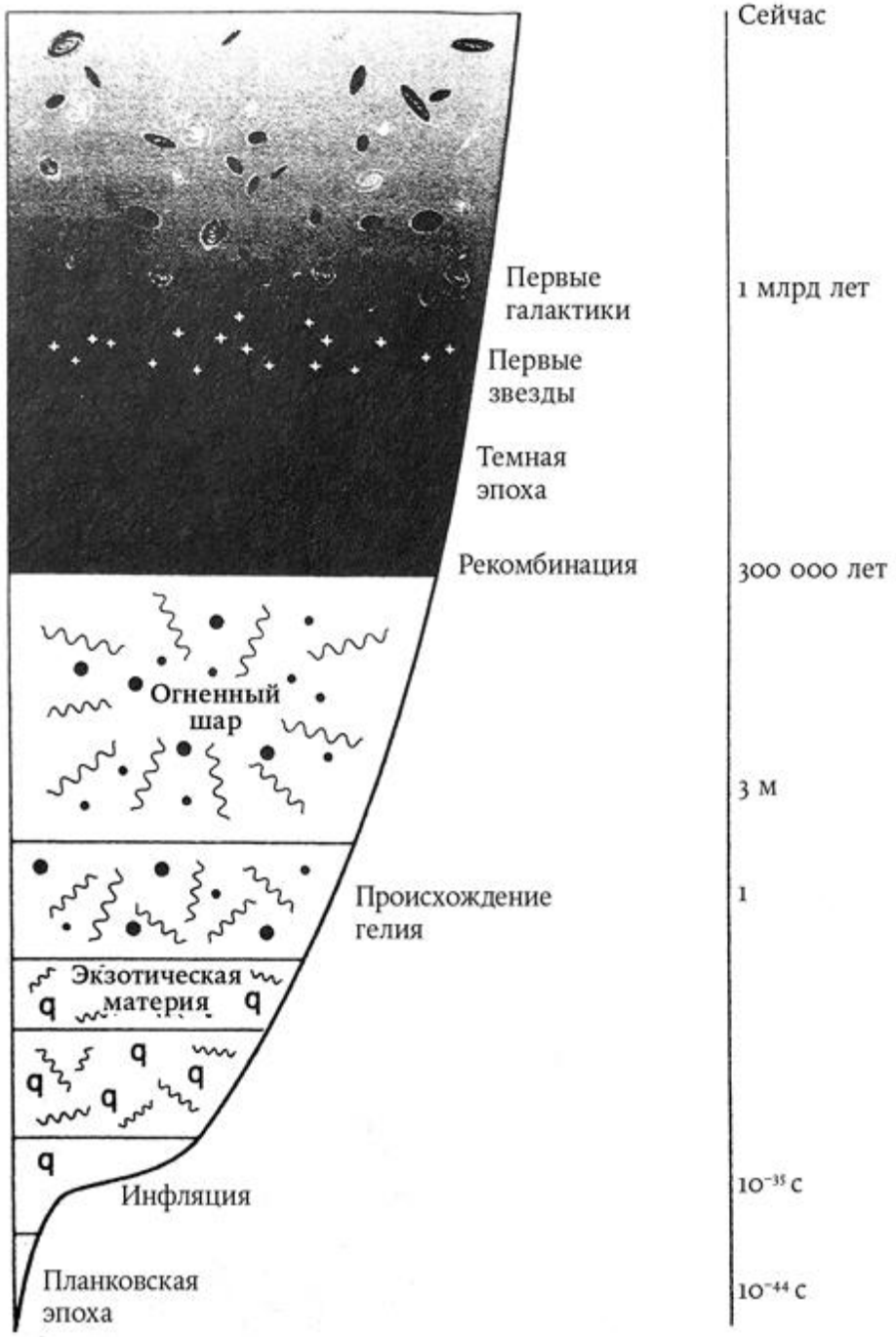


Рис. 9.1. Временна́я таблица некоторых ключевых этапов расширения нашей Вселенной

Возможно, мы могли бы углубить наше понимание ключевых космических чисел и даже «объяснить» их, продолжив экстраполяцию дальше — не только на первую секунду, но и на первую крохотную долю секунды.

Мы определенно можем вернуться ближе к Большому взрыву, но не намного. В течение первой миллисекунды мы менее уверены в физической сущности происходящего, потому что плотность материи превышала плотность нейтронной звезды. Очень высокую температуру и степень сжатия можно имитировать в микроскопическом масштабе с помощью экспериментов, где частицы с высокой энергией сталкиваются друг с другом. Но у этой методики имеются определенные пределы. Даже гигантский Большой адронный коллайдер, построенный Европейским центром ядерных исследований (CERN) в Женеве, не достигнет тех энергий,

которые имели частицы в первые 10–14 секунд Большого взрыва. Многие характерные черты нашей Вселенной могли сформироваться, когда космические часы показывали 10–35 секунд или даже меньше. В таких условиях каждая степень десяти на космических часах, отсчитывающих возраст Вселенной, — каждый лишний ноль после запятой — была наполнена событиями и должна в равной мере приниматься в расчет. Таким образом, переход от отметки 10–14 к 10–35 секунд больше (по той причине, что между ними больше степеней десяти), чем временнóй интервал между трехминутным пределом, когда сформировался гелий (примерно 200 секунд от начала Большого взрыва) и настоящим временем (3×1017 секунд или 10 млрд лет). С такой точки зрения даже на более ранних этапах произошло множество событий.

Единообразие в микромире

Возвращаясь к началу нашего разговора, можно сказать, что загадки космоса и микромира пересекаются. Чтобы изучить эти загадки, нам нужно установить связи между тяготением (силой, которая доминирует в больших масштабах) и другими силами, которые управляют отдельными частицами. Это дело все еще не завершено. Но различные силы и частицы внутри атома сейчас представляются нам вполне согласованными.

В начале XIX в. Майкл Фарадей понял, что электричество и магнетизм непосредственно связаны: движущийся магнит создает электрические токи, а движущийся электрический заряд, наоборот, создает магнитное поле. Эти принципы легли в основу электромоторов и динамо-машин. В 1864 г. Джеймс Кларк Максвелл описал открытия Фарадея в знаменитых уравнениях, которые выражают, как изменяющееся электрическое поле создает магнитное и наоборот. В открытом пространстве эти уравнения имеют решения, при которых электрические и магнитные поля колеблются. Именно сочетанием таких полей и является свет — это волна электрической и магнитной энергии (как и радиоволны, рентгеновские лучи и все остальное, что мы сейчас называем электромагнитным спектром).

Таким образом, мы видим две основные силы: электромагнетизм (понимаемый как единая сила) и тяготение. Даже Фарадей стремился отыскать общность между тяготением и электромагнетизмом, хотя и понимал, что это преждевременно. Сто лет спустя Эйнштейн провел свои последние годы в поисках глубокой связи между этими двумя силами. Эти искания вновь оказались напрасными. На самом деле теперь мы понимаем, что они были обречены, потому что Эйнштейн не знал о работающих на коротких расстояниях силах, которые действуют внутри атомного ядра: сильное или ядерное взаимодействие, которое связывает вместе протоны и нейтроны в атомном ядре (и определяет наше число ε); и слабое взаимодействие, важное для радиоактивного распада и нейтрино. По несколько грубому мнению физика Абрахама Пайса, самого прославленного биографа великого ученого, Эйнштейн «мог с таким же успехом заниматься рыбалкой» в последние 30 лет своей жизни.

Теперь трудность задачи состоит в том, чтобы объединить четыре силы: три, которые управляют микромиром, — электромагнетизм, сильное взаимодействие и слабое взаимодействие — и силу тяготения. Первый современный шаг к их унификации связан с именами Шелдона Глэшоу и Стивена Вайнберга в США, Герарда ‘т Хоофта в Голландии и пакистанского физика Абдуса Салама. Результаты их работы показали, что электрическая и магнитная силы (объединенные Максвеллом) сами по себе связаны, по-видимому, с совершенно иной силой — так называемым слабым взаимодействием, важным для нейтрино и радиоактивности. В очень ранней Вселенной эти силы были объединены в одну и начали различаться только после того, как Вселенная остыла ниже критической температуры примерно 1015 градусов (что произошло, когда ее возраст составлял 10–12 секунд). Самые большие ускорители могут имитировать такие температуры, и Салам и Вайнберг получили доказательства своей правоты, когда во время экспериментов в CERN открыли новые частицы, существование которых они предсказывали.

В 1950-х и 1960-х гг. было открыто так много новых частиц (добавившихся к хорошо знакомым электронам, нейтронам и протонам), что казалось: ученые, занимающиеся физикой частиц, рискуют превратиться в «коллекционеров марок». Но в череде этих частиц обнаружилась система; субатомные частицы можно было объединять в «семьи», подобно тому как атомы в периодической таблице Менделеева подразделяются на периоды и группы. В 1964 г. Мюррей Гелл-Ман и Джордж Цвейг, два американских физика-теоретика, предложили «кварковую

модель». Кварки имеют заряд, составляющий 1/3 или 2/3 от заряда электрона. Экспериментальную поддержку теории обеспечили Джером Фридман, Генри Кендалл и Ричард Тейлор, которые использовали новейший линейный ускоритель в Стэнфорде, чтобы бомбардировать протоны электронами. Ученые обнаружили, что электроны рассеиваются так, будто каждый протон состоит из трех «точечных зарядов», содержащих соответственно 2/3, 2/3 и – 1/3 общего заряда. Тем не менее один из неожиданных аспектов «кварковой модели» состоит в том, что отдельный кварк вычленить никак нельзя, хотя внутри протона кварки ведут себя как свободные частицы. (Все попытки обнаружить частично заряженные частицы провалились.) В конце 1970-х гг. бóльшая часть «зоопарка частиц» была объяснена в категориях 9 типов кварков.

Так называемая «стандартная модель», которая появилась в 1970-х гг., внесла в микромир потрясающий порядок. Электромагнитная сила и слабое взаимодействие были объединены, а сильные или ядерные силы были интерпретированы с точки зрения кварков, которые скрепляет вместе еще одна частица под названием «глюон». Но никто не считал, что последнее слово в этой области сказано: количество элементарных частиц остается обескураживающе большим, а уравнения все еще включают числа, которые были определены экспериментальным путем и пока не подтверждены теорией. В частности, объяснение на основе глюонов не связано с конкретным значением силы ядерного взаимодействия, которое решающим образом проявляет себя в нашем основном числе $\varepsilon = 0{,}007$.

После объединения электромагнитной силы и слабого взаимодействия следующей целью стало добавить ядерную силу и таким образом добиться так называемой «теории великого объединения» всех сил, управляющих физикой микромира (хотя все эти теории пока что недостаточно «велики», чтобы включить в себя тяготение, это по-прежнему трудная задача). Камень преткновения в том, что великое объединение, как полагают, имеет место при температуре 1028 градусов. Это в миллион миллионов раз выше, чем можно достичь в процессе современных экспериментов, а чтобы добиться требуемой энергии, потребуется ускоритель размером больше Солнечной системы. Поэтому на Земле эти теории проверить очень трудно.

Их специфическое влияние на мир низких энергий имеет зачаточный характер: например, протоны, главные составляющие всех звезд и планет, распадаются очень медленно — этот эффект будет важен в отдаленном будущем, но сейчас не имеет значения. Тем не менее все было горячее 1028 градусов в первые 10–35 секунд после Большого взрыва. Возможно, ранняя Вселенная была единственным местом, где была возможна температура, требуемая для объединения сил. Этот «эксперимент» кончился более 10 млрд лет назад, но оставил ли он во Вселенной какие-то следы, наподобие того как гелий остался от первых нескольких минут ее существования? По всей видимости, да: перевес вещества над антивеществом (который мы обсуждали в главе 6), возможно, был запечатлен на этой ультраранней стадии. Что куда более важно, огромный масштаб Вселенной и тот факт, что она вообще расширяется, может быть, был предопределен тем, что случилось в эти краткие первые мгновения.

Понятие «инфляции»

Два фундаментальных вопроса, связанных со Вселенной, звучат так: «Почему она расширяется?» и «Почему она такая большая?» Мы можем проследить, что происходит во время расширения, и экстраполировать процессы на несколько самых первых секунд (и подтвердить наши гипотезы распространенностью гелия и дейтерия). Но теория Большого взрыва в действительности является описанием (и достаточно успешным) того, что происходило после Большого взрыва, она ничего не говорит о том, что же положило начало расширению вообще. Другую загадку можно сформулировать так: «Почему наша Вселенная в целом однородна (что делает космологические данные легко поддающимися обработке), но в то же время позволяет образовываться галактикам, скоплениям и сверхскоплениям?» И, если продолжать дальше: «Что предопределило сами физические законы?»

Наша главная загадка (которую мы обсуждали в главе 6) — почему Вселенная расширяется спустя 10 млрд лет, притом что значение числа Ω все еще не слишком отличается от единицы. Наша Вселенная не «схлопнулась» много лет назад и не расширяется настолько быстро, чтобы ее кинетическая энергия значительно преодолела эффект тяготения. Это требует, чтобы число Ω в ранней Вселенной было удивительно близко к единице. Что же заставило все вокруг

расширяться таким особенным образом? Почему, когда мы наблюдаем отдаленные районы Вселенной в разных направлениях, они выглядят такими похожими? Или почему температура реликтового излучения практически одна и та же на всем небе?

Эти вопросы имеют ответ, если допустить, что все части нашей сегодняшней Вселенной были синхронизированы друг с другом на очень раннем этапе, а потом развивались по отдельности. Это является ключевым постулатом теории «инфляционной Вселенной»[36]. В 1981 г. тогда еще молодой американский физик Алан Гут выдвинул эту идею. Как часто случается в науке, у него было несколько предшественников — физики-теоретики Алексей Старобинский и Андрей Линде из СССР и Кацумото Сато из Японии, но Гут сделал положения теории достаточно ясными, чтобы убедить большинство специалистов в том, что эта теория была революционным прозрением. В своей книге «Инфляционная Вселенная»19 Гут вспоминает момент, когда его осенила эта идея, а также то, как живо обсуждали ее физики-теоретики и как развили дальше. (Гут также осуществил «социологический прорыв» в американскую академическую науку с точки зрения молодого исследователя, ищущего свою нишу в переполненной области.)

Согласно теории инфляционной Вселенной, причина того, почему Вселенная столь велика и почему тяготение и расширение так четко уравновешены, лежит в каком-то значительном событии, которое произошло очень рано, когда вся наша наблюдаемая Вселенная была буквально микроскопических размеров. При колоссальной плотности той эпохи в игру вступило некое «космическое отталкивание», похожее на невообразимо сильное число λ. Именно оно взяло верх над обычным тяготением. Расширение «рвануло на верхней передаче», что привело к неудержимому ускорению, позволившему зародышу Вселенной раздуться, гомогенизироваться и установить «хорошо настроенное» равновесие между тяготением и кинетической энергией.

Предполагается, что все это произошло в пределах всего лишь первых 10–35 секунд Большого взрыва! Условия, которые существовали тогда, очень далеки от тех, которые мы можем проверить экспериментально, поэтому о деталях можно говорить только умозрительно. Тем не менее мы можем строить предположения, согласующиеся с другими физическими теориями и с тем, что мы знаем о более поздней Вселенной.

Идея, стоящая за инфляционной теорией, чрезвычайно привлекательна, потому что она, по-видимому, показывает, как целая вселенная могла развиться из крошечного «зернышка». Мы считаем, что это произошло, поскольку расширение идет по экспоненте: оно удваивается, снова удваивается, затем удваивается еще раз… Математические формулы (если только они не очень длинные и в самом деле сложные) обычно не оперируют огромными числами. Единственный естественный путь для «скромного» числа — создать гигантское — такое, как 1078, общее число атомов в наблюдаемой Вселенной, — если оно является показателем экспоненциальной зависимости (так можно сказать, если использовать математические термины), т.е. оно говорит нам, сколько раз параметр удваивается. Каждый раз, когда радиус сферы увеличивается вдвое, ее объем возрастает в восемь раз (в обычном евклидовом пространстве). Для того чтобы достичь такого числа, как 1078, потребуется лишь сотня подобных удвоений.

Именно это, предположительно, и происходило во время инфляционной фазы эволюции нашей Вселенной. Неистовое отталкивание, управлявшее раздуванием, должно было «выключиться», позволив Вселенной, которая к тому времени достаточно увеличилась, чтобы вместить в себя все, что мы сейчас видим, перейти к более ленивому и спокойному расширению. Этот переход превратил огромную энергию, скрытую в первоначальном «вакууме», в обычную энергию, являющуюся источником тепла в огненном шаре, и начал более привычный процесс расширения, который и сделал нашу Вселенную такой, какой мы ее видим сегодня.

Понятие «инфляция» эмоционально обсуждалось с тех пор, как впервые было выдвинуто десятки лет назад. Оно прошло через множество вариантов, основанных на разных предположениях о том, как давление, плотность и т.д. вели себя при условиях, очень далеких от того, что мы можем изучать напрямую. Но сама идея в целом, разумеется, будет сохранять свою популярность, пока не появится теория получше. В настоящий момент только инфляционная теория дает достоверное объяснение того, почему наша Вселенная так велика и так единообразна. Она предлагает объяснение того, почемуВселенная расширяется с такой кажущейся хорошо настроенной скоростью, что смогла растянуть себя во всех направлениях на 10 млрд св. лет.

Можем ли мы проверить инфляционную теорию?

Если сморщенную поверхность растягивать во много раз, неровности будут уменьшаться и поверхность станет гладкой. Аналогией «гладкости» в космологии является точное равновесие между (отрицательной) энергией тяготения и (положительной) энергией расширения. Это самое надежное обобщенное предсказание инфляционной теории. Выполняется ли оно? Простейшая плоская вселенная — это как раз та самая, где число Ω равно точно единице. Доказательства, приведенные в главе 5, говорят о том, что атомы и темная материя составляют только 0,3 критической плотности, и это на первый взгляд говорит о неудаче. Вследствие этого физики-теоретики с энтузиазмом ухватились за утверждение о том, что расширение ускоряется, потому что к нему добавляется энергия, связанная с числом λ. Наша Вселенная и в самом деле кажется «плоской» (хотя самые осторожные среди нас могут сказать, что «присяжные все еще не собрались», и будут избегать окончательного вердикта еще несколько лет)[37]. «Смесь» того, что составляет критическую плотность Вселенной, всего на 4% состоит из атомов и на 25% — из темной материи. Все остальное — сам «вакуум».

Доказательство «плоскостности» несколько воодушевляет. По крайней мере оно поощряет нас проводить дальнейшие опыты, особенно «диагностику», которая может выявить детали того, что происходило во время быстрого расширения. Большинство обстоятельных идей об ультраранней Вселенной имеют очень короткий срок годности. По поводу первых 10–35 секунд сегодняшние физики испытывают такую же неуверенность, какую испытывали по поводу первой секунды после Большого взрыва, когда Гамов и другие исследователи начали изучать космологическое происхождение элементов. Их первичные идеи были неверными во многих отношениях, но они были исправлены и твердо встали на ноги за следующие 10–20 лет. Возможно, мы можем питать такие же надежды по поводу союза физики сверхвысоких энергий и космологии в ближайшее десятилетие.

Образование гелия в первые несколько минут Большого взрыва было связано с ядерными реакциями и столкновениями атомов, которые можно воспроизвести экспериментально. Напротив, процессы в инфляционную эпоху, которые определяют такие фундаментальные космические числа, как Q, слишком экстремальны, чтобы имитировать их на Земле, даже в ускорителях. Это усложняет задачу. С другой стороны, сам факт мотивирует к изучению очень ранней Вселенной, которое может обеспечить надежную проверку новых теорий объединения, потому что это единственный момент, когда энергии были достаточно высоки, чтобы продемонстрировать явные практические следствия этих теорий. Когда астрономы пытаются понять космические феномены, они обычно пользуются результатами тех открытий, которые физики делают в лабораториях. Возможно, сейчас у астрономов появился шанс «отплатить услугой за услугу», открыв новые фундаментальные физические принципы. Есть и другие примеры подобного — скажем, нейтронные звезды расширили наши знания о материи с высокой плотностью и большой силе тяготения. Но самым показательным был сам Большой взрыв. В 1950-х гг. космология находилась вне основного русла физики — только несколько «оригиналов» вроде Гамова обращали на нее какое-то внимание. Напротив, в настоящее время проблемы космологии вызывают интерес многих ведущих физиков-теоретиков. И это, разумеется, дает нам поводы для оптимизма.

Микроскопические «вибрации», появившиеся, когда наша Вселенная была меньше мяча для гольфа, теперь растягиваются через всю Вселенную. В них содержатся неоднородности, из которых рождаются галактики и скопления галактик. Теоретики все еще не доказали, могут ли инфляционные модели «естественным образом» давать объяснение числу Q, равному 10–5 и характеризующему уровень этой неоднородности. Это зависит от некоторых физических свойств, которые все еще «не проверены в бою». Но мы можем узнать какие-нибудь детали и исключить какие-то варианты, потому что отдельные версии инфляции дают совершенно отличные друг от друга предсказания. Измерения, сделанные космическими аппаратами WMAP и Planck, и наблюдения за тем, как галактики объединяются в скопления, дают ключи к инфляционной эпохе и некоторые сведения о «физике великого объединения», которая не может быть напрямую выведена из экспериментов на уровне «обычных» энергий.

Наряду с флуктуациями, которые развиваются в галактиках и их скоплениях, раздувание, как считается, создает «гравитационные волны» — колебания в самой ткани пространства, пересекающие Вселенную со скоростью света. Объекты, попавшие под такую волну, испытывают на себе силу притяжения, которая вначале тянет их в одну сторону, а потом — в другую; в результате они слегка «трясутся». Этот эффект очень мал, и его обнаружение действительно представляет собой огромную техническую трудность. В рамках проекта LISA Европейского космического агентства планируется запустить на орбиту вокруг Солнца три космических аппарата, разделенных миллионами километров. Расстояния между ними будут измеряться лазерными лучами с точностью до миллионных долей метра.

Но даже аппараты LISA могут оказаться недостаточно чувствительными для того, чтобы поймать эти первозданные вибрации. Тогда их разработчиков успокоит то, что гораздо легче будет обнаружить другие сигналы. Например, интенсивный всплеск гравитационных волн создается, когда две черные дыры сталкиваются и сливаются. Мы ожидаем, что такие события время от времени случаются[38]. В центре большинства галактик имеется черная дыра, по массе равная миллионам звезд. Пары галактик часто сталкиваются и смешиваются (мы наблюдаем, как происходит множество таких событий). Когда это случается, черные дыры в центре обеих галактик сливаются.

Таким образом, мы можем вскоре ждать эмпирических сведений об инфляционной эпохе. Даже если нам неизвестны соответствующие физические принципы, мы можем вычислить последствия определенных допущений этой теории (значение Q, гравитационные волны и т.д.). Тогда мы сможем сравнить их с наблюдениями и, таким образом, по крайней мере сузить круг возможных вариантов.

Другие реликты

Любые остатки ультраранней эпохи будут важны как необходимые связующие звенья между космосом и микромиром. Одна интересная возможность (которая неясно вырисовывалась еще в сознании Гута, когда он работал над своей теорией) — это мысль о том, что магнитные монополи могли остаться от ранней Вселенной. Фарадей и Максвелл показали тесные взаимосвязи между электричеством и магнетизмом, но было одно ключевое различие (и они это понимали) между этими двумя силами: положительные и отрицательные электрические заряды существуют, но «северный» и «южный» магнитные полюса, по всей видимости, не могут существовать по отдельности. Магниты — это диполи (имеют два полюса), а не монополи (один полюс), и, если мы разрубим диполь пополам, мы никогда не получим два монополя, а только диполи меньшего размера. Несмотря на долгие замысловатые изыскания, никому так и не удалось «поймать» монополь.

Современные физики-теоретики предполагают, что монополи могут существовать, но они должны быть чрезвычайно тяжелыми (в миллион миллиардов раз тяжелее протона). Из-за высокой массы, для того чтобы они возникли, необходима огромная концентрация энергии — т.е. такая энергия, которая властвовала в самой ранней Вселенной и больше никогда. В нашей сегодняшней Вселенной монополей ничтожно мало: магнитные поля пронизывают межзвездное пространство, и их просто «закоротило» бы, если бы монополей было много. Гут был озадачен отсутствием монополей, потому что, по всей видимости, они неизбежно появлялись в ранней Вселенной. В связи с этим его лучшим предположением была мысль о том, что их общая масса составила бы в миллионы раз больше темной материи, чем ее существует на самом деле. Важным преимуществом расширения (если оно началось после того, как сформировались монополи) было то, что оно рассеяло предполагаемые монополи, и это объясняет их очевидное отсутствие сегодня.

Монополи — это нечто вроде «узлов» в космосе. На научном языке такие явления называются «топологическими дефектами». Куда более интересно, что это дефекты в форме линий, а не в форме точек — районы космоса, которые завязаны узлом в трубки тоньше атома. Они могли бы формировать замкнутые петли, как эластичные ленты, вращаясь практически со скоростью света, или же вытягиваться прямо через всю Вселенную. Некоторые специалисты по космологии строят предположения о том, что эти топологические дефекты могут быть ростками космических структур — в результате они вносят свой вклад в значение числа Q. Эта идея

привлекла внимание в начале 1990-х гг., но оказалось, что она не согласуется с некоторыми деталями в процессах образования скоплений галактик, выявленными позднее. Однако эти петли все же могут существовать, и они имеют такие необыкновенные характеристики (тоньше атома, но настолько тяжелые, что каждый километр может сравниться по массе с Землей), что астрономы должны приложить массу усилий, чтобы их обнаружить.

Другая интересная возможность — миниатюрные черные дыры. Дыра размером с один атом может быть такой же массивной, как гора. Как мы уже видели в главе 3, есть прямой результат того, что число N так огромно: тяготение так слабо, что не может преодолеть другие силы в масштабе атомов, если только не «упаковать» массу N атомов в размер одного. Очень может быть, что в ультрараннюю эпоху существовало давление, способное сформировать такие маленькие черные дыры. Хотя сегодня никакие процессы не могут обеспечить такую степень сжатия, возможно, какая-нибудь будущая высокоразвитая цивилизация сможет это сделать. Особенно интересные перспективы открываются, если соединить эту мысль с другой — о том, что внутри черной дыры может развиваться новая вселенная, расширяясь в новое (возможно, бесконечное) пространство-время, никак не связанное с нашим.

Из «ничего»?

Может показаться парадоксальным, что целая Вселенная протяженностью 10 млрд св. лет (которая, возможно, расширится еще дальше, за пределы нашего горизонта) могла появиться из бесконечно малой крупицы. Это возможно потому, что, сколько бы Вселенная ни раздувалась, ее полная энергия по-прежнему может быть равна нулю. Согласно знаменитому уравнению Эйнштейна, все имеет энергию, равную mc^2. Но все также имеет и отрицательную энергию из-за тяготения. Нам нужна энергия, чтобы выбраться за пределы земного притяжения, т.е. нам нужно сжечь достаточно ракетного топлива, чтобы достичь скорости 11,2 км/с. Таким образом, по сравнению с астронавтом в космосе на Земле мы испытываем дефицит энергии. Но этот дефицит (который можно назвать «потенциальной гравитационной энергией») с учетом того, что все во Вселенной складывается, может достичь значения минус mc^2. Другими словами, Вселенная создает для себя такую глубокую «гравитационную яму», что все в ней имеет отрицательную гравитационную энергию, которая точно компенсируется ее энергией массы покоя. Поэтому энергия, затраченная на раздувание нашей Вселенной, на самом деле может быть равной нулю.

Специалисты по космологии иногда заявляют, что Вселенная могла развиться «из ничего». Но они должны внимательно относиться к своим словами, особенно когда обращаются к философам. Со времен Эйнштейна мы понимаем, что пустое пространство может иметь искривленную и деформированную структуру. Даже сжатая до «точки», она таит в себе частицы и силы, а это куда больше, чем философское «ничто». Когда-нибудь физики-теоретики, возможно, смогут написать фундаментальные уравнения, описывающие физическую реальность. Но физики никогда не объяснят того, что «вдыхает огонь» в уравнения и делает их реальностью в настоящем космосе. Фундаментальный вопрос «Почему есть что-то, а не ничто?» остается в ведении философов. И возможно, мы можем дать им мудрый ответ в духе Людвига Витгенштейна[39]: «О чем невозможно говорить, о том следует молчать».

За линию горизонта, к мультивселенной

Долгосрочные прогнозы, описанные в главе 7, на самом деле основаны на предположении, которое мы не можем проверить, а именно на том, что те участки Вселенной, которые сейчас находятся вне нашего горизонта, похожи на то, что мы наблюдаем. Если вы находитесь в середине океана, вы не ожидаете, что земля находится сразу за горизонтом, но знаете, что океан не бесконечен и вы в конце концов причалите к континенту. Подобным же образом мы можем ошибаться, считая, что наша Вселенная бесконечно простирается в любую сторону одинаковым образом. Возможно, мы живем в пузыре с низкой плотностью, достаточно большом, чтобы его край лежал за нашим теперешним горизонтом, но окруженным куда более крупным районом, который в конце концов схлопнется вокруг нас. Не стоит ждать каких-либо резких перемен сразу за горизонтом; с другой стороны, нет никаких гарантий того, что мы можем экстраполировать местные условия на бесконечность.

Одно из самых важных значений раздувания состоит в том, что оно грандиозно и наглядно расширило наши представления о Вселенной. Чтобы объяснить Вселенную, которую мы видим,

инфляция должна быть достаточно интенсивной, чтобы объяснить наличие 1078 атомов в пределах досягаемости наших телескопов. Но это всего лишь минимум. Возможно, для того, чтобы остановить начавшееся раздувание, потребуется много времени (физики-теоретики говорят об этом как о проблеме «изящного выхода» из инфляции). В самом деле, большинство версий теории инфляции предполагают, что количество «удвоений» должно быть намного больше, чем то, которое нужно, чтобы объяснить наблюдаемую нами Вселенную. В главе 1 мы рассмотрели последовательность «кадров» нашей Вселенной, каждый из которых охватывает в 10 раз больший масштаб. Если начинать с масштабов, привычных нам в обычной жизни, то 25 «кадров» приводят нас к границе того, что мы видим сегодня. Эта граница, по существу, установлена тем, какое расстояние может пройти свет за 10 млрд лет или около того с тех пор, как образовались первые галактики. Но теоретики инфляции представляют себе настолько более крупную Вселенную, что она может вместить в себя миллионы кадров, каждый из которых увеличен в десять раз, пока достигнет какого-то «края». Это колоссальное расширение пространства невозможно охватить умом (для меня, по крайней мере). Разрыв в масштабах между микромиром и горизонтом видимой нами Вселенной — это ничто по сравнению с разрывом с реальными границами Вселенной. Хотя она и не бесконечна, наша территория пространства и времени простирается гораздо дальше того, что мы можем видеть. Для того чтобы записать время, за которое свет с «края» Вселенной доберется до нас, потребуется не просто десять нулей и даже не сотня нулей, а миллионы.

Но это еще не все. Даже эта колоссальная Вселенная, имеющая объем, для выражения которого потребуется число в миллион знаков, может оказаться не «всем, что есть». Это результат одного эпизода инфляции, но этот эпизод — Большой взрыв — может сам по себе быть всего лишь одним событием в бесконечной серии. Можно отметить, что это естественное следствие из «вечной инфляции» особенно поддерживал космолог из России Андрей Линде. По этому сценарию, который требует особых (хотя и по-прежнему умозрительных) предположений о физических процессах при экстремальной плотности, у космоса может быть бесконечное прошлое. Участки, где раздувание не кончается, всегда растут достаточно быстро, чтобы обеспечить семена других Больших взрывов. Есть варианты этих гипотез, согласно которым эпизод инфляции может произойти внутри черной дыры, создав новые участки пространства-времени, не связанные с нашим собственным.

В этом месте позвольте мне добавить одно семантическое замечание по поводу определения слова «вселенная». Его правильное определение — это, конечно, «все, что есть». В этой главе я заявляю, что сущность, традиционно называемая Вселенной, — то, что изучают астрономы, или то, что осталось от Большого взрыва, — может быть одной из целого ряда сущностей, каждая из которых, возможно, началась со своего собственного Большого взрыва. Педанты могли бы захотеть называть Вселенной весь этот ансамбль. Но я думаю, что будет меньше путаницы, если оставить термин «вселенная» для того понятия, которое ему традиционно соответствует, хотя тогда потребуется новое слово «мультивселенная» для обозначения всего ансамбля «вселенных» — к этому понятию я вернусь в главе 11.

глава 10

Три измерения (и больше)

Земля (орбита Земли) есть мера всех орбит. Вокруг нее опишем додекаэдр. Описанная вокруг додекаэдра сфера есть сфера Марса. Вокруг сферы Марса опишем тетраэдр. Описанная вокруг тетраэдра сфера есть сфера Юпитера. Вокруг сферы Юпитера опишем куб. Описанная вокруг куба сфера есть сфера Сатурна. В сферу Земли вложим икосаэдр. Вписанная в него сфера есть сфера Венеры. В сферу Венеры вложим октаэдр. Вписанная в него сфера есть сфера Меркурия. Теперь у нас есть объяснение количеству планет.

Иоганн Кеплер

Почему значение D = 3 особенное

У нашего пространства три измерения. Существуют точки (ноль измерений), линии (одно измерение), плоскости (два измерения) и тела (три измерения). Но на этом нам придется остановиться, хотя с точки зрения математики мы можем представить себе пространство, в

котором измерений больше. Что же в числе 3 такого особенного? С классических времен геометры заметили любопытные черты разных измерений. Например, в двух измерениях мы можем нарисовать правильный многоугольник с любым количеством равных сторон (равносторонний треугольник, квадрат, пятиугольник, шестиугольник и т.д.). Но в трех измерениях есть только пять платоновских «правильных тел», в которых равны все стороны и углы. В четырех измерениях таких объектов шесть, а в более высоких измерениях — всего по три.

Одно из следствий трехмерного мира состоит в том, что такие силы, как тяготение и электричество, подчиняются закону обратных квадратов, т.е. сила или заряд становятся в четыре раза слабее, если расстояние увеличивается в два раза. Майкл Фарадей в своих новаторских трудах по электричеству использовал графический способ (по сути правильный), чтобы понять это. Он представил «силовые линии», исходящие от каждого заряда или массы, при этом величина силы зависит от концентрации этих линий. На расстоянии r линии распространяются по площади, пропорциональной r2; на бóльших расстояниях, таким образом, действие силы ослабевает. Ее величина обратно пропорциональна r2. Тем не менее площадь четырехмерной «сферы» будет изменяться пропорционально r3, и если удвоить r, то она станет не в четыре, а в восемь раз больше. Так, размышления Фарадея будут выражать закон обратных кубов.

Как понял Ньютон, траектории планет управляются равновесием между действием силы тяготения, которая тянет их вовнутрь, и центробежным эффектом их движения. Орбиты в Солнечной системе стабильны в том смысле, что небольшие изменения скорости планеты изменяют ее орбиту очень незначительно. Но эта стабильность исчезнет, если тяготение не будет опираться на закон обратных квадратов, а начнет следовать закону обратных кубов (или закону с еще более круто наклоненным графиком зависимости). Тогда, если движущаяся по орбите планета хоть чуть-чуть замедлится, она не просто перейдет на чуть меньшую орбиту, а ее затянет прямо в Солнце, потому что сила по закону обратных кубов резко возрастает по направлению к центру. Напротив, если идущая по орбите планета чуть-чуть ускорится, она быстро уйдет по спирали во внешнюю темноту.

Английский философ XVIII в. Уильям Пейли знаменит своим доводом о том, что видимое строение нашей Вселенной подразумевает существование Творца точно так же, как часовой механизм подразумевает часовщика. В Кембридже Пейли получил достаточно хорошую подготовку в области математики, чтобы оценить эту тайную черту закона обратных квадратов и включить ее в свою защиту довода о Творце всего сущего. Большинство из его «доказательств творения» происходили из биологии и были опровергнуты даже теологами в постдарвиновскую эпоху. Впечатляющие адаптивные возможности глаз, конечностей и т.д. являются результатом естественного отбора, симбиоза между живыми организмами и средой их обитания. Довод Пейли о том, что закон обратных квадратов особенно подтверждает высшую благодать, сейчас кажется одним из самых здравых: нет никаких следов естественного отбора в выборе любимого закона действия сил, и ничто не могло воздействовать на Вселенную так, чтобы его изменить. Пейли писал более чем за 100 лет до того, как стало понятно, что атомы состоят из положительно заряженного ядра и электронов, вращающихся вокруг него; иначе он смог бы укрепить свою позицию, заметив, что по подобным причинам атомы были бы невозможны во Вселенной, управляемой законом обратных кубов, потому что в ней не было бы стабильных орбит у электронов.

Таким образом, если количество пространственных измерений превышает три, возникает проблема. Могли бы мы жить в мире, где их меньше чем три? Лучший довод здесь — самый простой: во «Флатландии»[40] (или, на самом деле, на любой двухмерной поверхности) существуют принципиальные ограничения сложных структур. Невозможно создать компьютерную сеть без перекрестных соединений, и точно так же ни у какого объекта не может быть сквозного канала (например, представим себе пищеварительный тракт) без двух сторон. А в одномерном «Линейноземье» ограничения будут еще жестче.

Это только самые очевидные причины — а математики нашли и другие — того, почему мы не должны удивляться, что живем в трехмерном пространстве.

Время и его стрела

Время, конечно, является четвертым измерением, которое мы можем ощутить на себе. Чтобы обозначить событие, нам нужно четыре числа: три пространственные координаты, чтобы описать, гдеоно произошло, и четвертая, которая сообщает, когда оно случилось. Одно из граффити неизвестного автора гласит: «Время — это способ природы сделать так, чтобы все не происходило одновременно». Как бы то ни было, события разворачиваются вереницей вдоль дорог, веховыми столбами на которых служат стрелки часов. Но время отличается от других трех измерений, поскольку, по всей видимости, по нему мы можем двигаться только в одном направлении — «вперед», тогда как в трех других мы можем пойти в любом направлении (на восток, на запад, на север или на юг; вверх или вниз). Таким образом, нашу Вселенную лучше всего описывать как имеющую 3+1 измерения. Согласно учению Эйнштейна, пространство и время связаны и скорость, с которой идет время, «эластична», зависит от того, не находится ли владелец часов около большой массы. Но в идеях Эйнштейна сохраняется различие между пространством и временем — между тем, что находится вокруг нас, и тем, что лежит в прошлом или будущем.

«Стрела времени» настойчиво движется из прошлого в будущее. Кадры, где сняты повседневные события, смотрятся совершенно иначе, если прокрутить их задом наперед. Причина и следствие меняются местами: разбитые осколки стекла и капли жидкости выглядят так, будто целенаправленно торопятся собраться в бокал с вином. Пар, вырывающийся из чайника, конденсируется в воду. В ироническом романе Мартина Эмиса «Стрела времени»[41], где время перевернуто, нью-йоркские таксисты «платят тебе вперед и ни о чем не спрашивают… Неудивительно, что мы потом стоим по нескольку часов, прощально махая или салютуя — отдавая должные почести такому прекрасному сервису».

Асимметрия между прошлым и будущим настолько прочно укоренилась в нашем сознании, что лишь немногие, не считая некоторых философствующих физиков, останавливаются, чтобы поразмыслить о загадках, которые она ставит перед нами. Она приводит в замешательство, потому что в основные законы, управляющие микромиром, подобная асимметрия не встроена. Мир меняется безвозвратно, хотя лежащие в его основе законы безразличны к прошлому и будущему. Кадры, на которых заснято одно-единственное столкновение двух бильярдных шаров, будут выглядеть более-менее одинаково независимо от того, прокручивают их вперед или назад, но запись всех столкновений в игре отчетливо отображает «стрелу времени». Подобным же образом наш мир выглядит направленным по определенному пути.

Мы пойманы в ловушку времени, но можем достигнуть более ясного понимания, если посмотрим с воображаемой точки зрения, находящейся «вне времени», как существа из «Сирен Титана»[42] Курта Воннегута, которые воспринимали людей как «великих многоножек, на одном конце которых — ноги младенцев, а на другом — ноги стариков». Тогда наша Вселенная будет казаться статической четырехмерной сущностью — «застывшей вселенной»: «мировые линии» повседневных предметов будут менее организованы на одном конце (который мы называем будущим) по сравнению с другим (который мы называем прошлым). Но по-настоящему трудно объяснить, почему вообще существуеткакое-то «упорядоченное» состояние. Если на одном конце длинной струны завязан какой-то необыкновенный узор, мы будем одинаково удивлены, завязан ли он на левом конце или на правом. Подобным же образом в «застывшей вселенной», где будущее, по всей видимости, существует на равных основаниях с прошлым, мы не должны сильнее (или меньше) удивляться, обнаружив упорядоченность на старте, а не на финише.

Когда мы говорим о расширении Вселенной, мы, конечно, подразумеваем «стрелу времени» и то, что мы можем упорядочить отдельные кадры в фильм (или трехмерные слои в нашей «застывшей вселенной»), поэтому Вселенная сильнее разрежена в тех временах, которые мы определяем как «позже».

Асимметрия во времени может быть связана с расширением Вселенной. В связи с этим я уже писал в главе 8, как во время расширения тяготение усиливает первоначальные неравномерности в плотности, позволив структурам проявиться из огненного шара, который начал свое существование без заметных отличительных черт. На ранних этапах эта асимметрия не будет проявляться на местах, поскольку в то время плотность была так высока, что микроскопические

процессы — столкновения частиц, излучение и поглощение фотонов и т.д. — происходили очень быстро по сравнению со скоростью расширения. В каждое мгновение все будет находиться в состоянии равновесия. Вещество не хранит никакой памяти о том, было оно ранее менее или более плотным, никакого следа не остается и на направлении течения времени. Но когда Вселенная становится более разреженной, эти реакции идут медленнее, и тогда расширение имеет огромное значение.

Например, если бы наша Вселенная долго оставалась при температуре миллиард градусов или ядерные реакции протекали быстрее, все атомы превратились бы в железо. К счастью, расширение было достаточно быстрым, чтобы прервать ядерные реакции до того, как они смогли зайти дальше превращения 23% водорода в гелий. Это яркий пример того, как космическое расширение создает такие отклонения от равновесия, что происходит далеко не то же самое, что происходило бы в сжимающейся вселенной.

Как первым отметил академик Сахаров, само наше существование зависит от необратимого эффекта, который установил превосходство вещества над антивеществом на очень раннем этапе развития Вселенной. Если бы этого не произошло, вся материя аннигилировала бы с равным количеством антиматерии, оставив Вселенную вовсе без атомов. Тогда не было бы звезд, а также никаких химических процессов, которые позволили бы появиться сложным структурам.

Время все еще задает загадки, для которых нет абсолютно никакого решения. Физик Джулиан Барбур провел неофициальный опрос специалистов, задав им вопрос: «Считаете ли вы, что время в самом деле является фундаментальным принципом, или его можно вывести из более простых понятий (например, так, как температура предмета выводится из хаотичного движения атомов, из которых предмет состоит)?» Ответы разделились достаточно явно, однако с небольшим перевесом большинство поддержало точку зрения о том, что время в конце концов объяснят через призму чего-то более глубокого.

Свернутые измерения в больших масштабах

Несомненно, пространство и время имеют сложную структуру. Мы знаем, что космос пронизан черными дырами, в которых пространство и время переплетены, их в нашей Галактике миллионы, а те, что расположены в центрах галактик, имеют гигантские размеры. Но эти сложные структуры ограничены районами, которые с космологической точки зрения можно назвать «местными». Почти полная однородность нашей Вселенной в масштабах сверхскоплений предполагает, что геометрия пространства является простой и гладкой в пределах нашего сегодняшнего поля зрения. О том же говорит тот факт, что реликтовое излучение имеет практически одну и ту же температуру на всем небе.

Расположенные к математике специалисты по космологии тем не менее задаются вопросом о том, не является ли эта простота иллюзией: возможно, мы в действительности видим один и тот же участок пространства, как в коридоре с зеркальными стенами или калейдоскопе, а на самом деле пространство свернуто или имеет какую-то сотовую структуру. Если бы мы в самом деле находились в такой странной вселенной, размер каждой соты должен был составлять по крайней мере несколько процентов прямой видимости (другими словами, иметь более нескольких сот миллионов св. лет в поперечнике). Мы знаем это, потому что, если ячейки будут меньше, мы будем видеть, как повторяются такие характерные структуры, как скопление галактик в созвездии Девы. Более жесткие ограничения появились после измерения маленьких неоднородностей в температуре реликтового излучения по всему небу. В них нет никакой регулярной структуры, поэтому теперь мы можем смело отбросить размер ячейки меньший, чем наш предел видимости.

О том, что находится за пределом видимости, установленным конечной скоростью света, наблюдения могут сказать нам немногое. Пространство может быть сложным образом свернуто в масштабах, намного превышающих 10 млрд св. лет. Могут даже быть изменения и в количестве измерений. Но мы никогда не получим ничего, кроме косвенных данных, о том, что происходит за пределом видимости любого телескопа.

А что же насчет очень маленьких масштабов? Здесь наши простые понятия, конечно, несостоятельны. В самом деле, возможно, нам придется схватиться с очень сложными

понятиями, которые включают в себя и дополнительные измерения пространства, чтобы правильно понять частицы, силы и наши космические числа.

Микроструктура пространства и времени: квантовая гравитация

У нас было целое столетие, чтобы привыкнуть к мысли о том, что обычные вещества — твердые тела, жидкости и газы — имеют дискретную атомную или молекулярную структуру. Не может ли быть дискретного строения и у пространства, и у времени? Пространство кажется гладким континуумом, но это только из-за опыта, которым мы обладаем, и даже самые мудреные эксперименты слишком грубы, чтобы обнаружить тот самый масштаб, в котором такая структура может себя проявить.

Мы не знаем подробной микроструктуры пространства и времени, но самые общие рассуждения говорят о том, что они не могут быть разделены на сколь угодно мелкие частицы. Деталь соответствующего масштаба может быть обнаружена только с помощью излучения, имеющего длину волны короче этого масштаба. Например, здания не преграждают путь радиоволнам длиной во много метров, но отбрасывают тени, когда на них падает солнечный свет. Свет состоит из волн, имеющих длину в миллионную долю метра, поэтому ничто более мелкое нельзя увидеть с помощью обычного оптического микроскопа. Чтобы разглядеть более мелкие детали, требуются еще более короткие волны (или какие-то другие технические приспособления, такие как электронный микроскоп). Но согласно квантовой теории, более короткие волны связаны с бóльшими квантами (или порциями) энергии.

Основной единицей измерения квантов энергии служит постоянная Планка (число, названное в честь великого физика Макса Планка, который столетие назад первым ввел представление о квантовании). До определенного момента мы можем искать все более мелкую деталь, со все возрастающей энергией используя кванты, связанные со все более короткими волнами. Но существует предел. Этот предел появляется, когда необходимый квант имеет такую концентрацию энергии, что сворачивается в черную дыру. Это происходит при достижении планковской длины, которая примерно в 1019 раз меньше протона; каждый квант с такой крошечной длиной волны несет в себе столько же энергии, сколько составляет энергия массы покоя 1019 протонов. Свету требуется примерно 10–43 секунд, чтобы преодолеть это расстояние, и это «планковское время» — кратчайший временной интервал, который может быть измерен. Поэтому даже пространство и время являются объектами квантовых эффектов. Тем не менее из-за слабости тяготения эти эффекты включаются в масштабах, значительно меньших обычных атомов, в то время как на типичных для мира атомов расстояниях управление берут на себя электрические силы. (Это последствие огромности нашего первого космического числа N.)

Некоторые физики-теоретики более склонны к домыслам, чем другие. Но даже самые дерзкие из них признают масштаб планковских величин как конечный предел. Мы не можем измерить расстояние меньшее, чем планковская длина; мы не можем разграничить два события (или решить, какое из них произошло первым), когда временной интервал между ними меньше планковского времени. Эти масштабы меньше атомов во столько же раз, во сколько сами атомы меньше звезд. В этом царстве нет никаких перспектив для непосредственных измерений: для них потребуются частицы с энергией в миллион миллиардов раз выше, чем можно получить в лаборатории.

Два великих «столпа науки» XX в. — это квантовая механика, действующая в микромире, и теория тяготения Эйнштейна, которая не включает квантовые понятия. У нас нет единой основы, чтобы согласовать и объединить эти теории. Этот недостаток не препятствует ни прогрессу земной науки, ни развитию астрономии, потому что большинство явлений связаны либо с квантовыми эффектами, либос тяготением, но не с тем и другим сразу. Благодаря нашему огромному числу N тяготением можно пренебречь в микромире атомов или молекул, где важны квантовые эффекты. Квантовую неопределенность можно игнорировать в небесном царстве планет, звезд и галактик, где притяжение берет власть в свои руки. Но в самом начале квантовые вибрации могли потрясать всю Вселенную, и тяготение может быть важным в масштабе одного кванта. Это происходит в масштабах планковского времени, 10–43 секунды. Чтобы понять, что происходило в первые мгновения Большого взрыва, или выяснить структуру пространства и

времени зоны сингулярности внутри черных дыр, нам нужно объединение квантовой теории и теории тяготения.

Обычное восприятие бессильно, когда речь идет о скоростях, приближающихся к скорости света, или о том, что происходит около черных дыр, в экстремальных условиях ранней Вселенной или в микромасштабах, близких к планковской длине. Тут мы должны отбросить наши уютные общепринятые представления о пространстве и времени: черные дыры могут появляться и исчезать; пространство-время в этих крошечных масштабах может иметь хаотичную, напоминающую пену, структуру без четко определенного направления течения времени. Флуктуации могут создавать новые области, которые развиваются в отдельные вселенные. Пространство может иметь нечто вроде решетчатой структуры или быть сотканным из узелков, как кольчуга. Время может стать таким, как пространство, поэтому в этом смысле нельзя говорить о начале времени.

Единственное место, где еще может существовать квантовая гравитация, — это центральная сингулярность внутри черной дыры, скрытая за горизонтом событий. Теорию, следствия из которой не проявляются нигде, кроме таких экзотических мест, трудно проверить. Чтобы принимать ее всерьез, она должна либо полностью встроиться в какую-либо всеохватывающую теорию, которую можно проверить разными способами, или должна восприниматься как единственная в своем роде, такая, к выводам из которой все неизбежно сводится.

Существует несколько подходов, но нет единого мнения по поводу того, какой из них является правильным. (Стивен Хокинг[43] сейчас бьется об заклад, что в течение 20 лет появится всеобщая теория, хотя и признает, что ему пришлось платить, проиграв подобное пари, которое он заключал 20 лет назад!) Самым амбициозным и многообещающим подходом является, по всей видимости, теория суперструн, которая обходным манером идет прямиком к объединенной теории всех сил и в качестве дополнительного бонуса объясняет квантовую гравитацию.

Суперструны

Как заявляют сторонники теории суперструн, она может соединить три силы, которые управляют микромиром, — электромагнетизм, ядерную силу и слабое взаимодействие, а также объяснить элементарные частицы (кварки, глюоны и т.д.). Существование тяготения — на самом деле основной компонент этой теории, а не дополнительное препятствие, с которым надо бороться. Ключевая идея состоит в том, что фундаментальные сущности нашей Вселенной — это не точки, а крошечные петли струн, при этом различные частицы внутри атомного ядра — это разные типы вибраций — разные гармоники — этих струн. Струны имеют масштаб планковской длины; другими словами, они на много порядков меньше тех размеров, которые мы можем исследовать. Более того, эти струны вибрируют не в привычном нам пространстве из 3+1 измерений, а в десятимерном пространстве.

Идея существования дополнительных измерений не нова. Еще в 1920-х гг. Теодор Калуца и Оскар Клейн пытались расширить теорию пространства-времени Эйнштейна, введя в нее электрические силы. Они стремились представить себе электрические поля и движение частиц, добавляя дополнительную структуру к каждой точке обычного пространства. Дополнительное измерение было «закручено» в крошечных масштабах и никак не проявляло себя для нас, так же как очень туго свернутый лист бумаги выглядит как существующая в одном измерении линия, хотя на самом деле является двумерным. Теория Калуца — Клейна столкнулась с трудностями, но само понятие дополнительных измерений позже с пафосом вернулось. В теории суперструн каждая «точка» обычного пространства — сложная геометрическая структура в шести измерениях, свернутая в масштабе планковской длины.

Все физические теории имеют уравнения и формулы, описывающие техническую сторону дела (но, к счастью, не ключевые идеи) и непонятные для неспециалистов. Но в целом математическая основа уже разработана и может быть «взята с полки» физиками. Например, геометрические понятия, которые Эйнштейн использовал в своей теории «искривленного пространства-времени», были разработаны еще в XIX в. То же самое можно сказать и о математическом языке, с помощью которого описывается квантовый мир. Но суперструны задают задачи, которые сбивают с толку математиков. Скажем, есть ли какая-то особая причина, по которой Вселенная в конце концов остановилась на четырех«развернутых» измерениях (время

и три пространственных измерения), а не на каком-то другом числе? Природа нашего мира и силы, управляющие им, полностью зависят от того, как «запакованы» дополнительные измерения. Как это случилось и есть ли другие варианты того, как это могло быть?

Теории суперструн впервые привлекли внимание в 1980-х гг. (хотя идеи появились на несколько десятков лет раньше), и с тех пор они поглотили усилия целой когорты великолепных знатоков математической физики. Первоначальный радостный энтузиазм сменился периодом разочарования из-за приводящей в замешательство сложности теории. Но с 1995 г. у суперструн началась «вторая жизнь». Ученые поняли, что дополнительные измерения могут «упаковываться» всего в пять различных классов шестимерного пространства. На более глубоком математическом уровне они могут быть разделены, но связанные структуры встроены в 11-мерное пространство. Более того, понятие струн (одномерных сущностей) может быть расширено до двумерных поверхностей (мембран). На самом деле в 10-мерном пространстве могут быть поверхности с бóльшим количеством измерений: другими словами, если двумерную поверхность назвать 2-браной[44], может существовать и 3-брана, и т.д. Тем не менее по-прежнему существует непреодолимая пропасть между замысловатой сложностью 10-мерной теории струн и любым явлением, которое мы можем наблюдать или измерить.

Ранее уже случалось, что теории принимали всерьез, даже если у них не было прямой эмпирической поддержки, особенно в тех случаях, когда казалось, что они имеют неповторимую элегантность и правильность, — отдающаяся эхом доля истины, которая заставляет соглашаться. Например, в 1920-х гг. многие физики приняли ОТО Эйнштейна из-за ее великолепной содержательной концепции. Сейчас она подтверждена точными наблюдениями, но в начале своего существования доказательства были очень скудными. Самого Эйнштейна больше впечатляла элегантность его теории, а не какие-либо эксперименты. Подобным же образом в наши дни Эдвард Виттен, которого сейчас признают интеллектуальным лидером в области математической физики, сказал, что «хорошие неправильные идеи чрезвычайно редки, а хороших неправильных идей, которые могли хотя бы соперничать в величии с теорией струн, вообще никто не видел».

Тем не менее есть особые причины, не связанные с красотой, для того, чтобы испытывать оптимизм по поводу суперструн. Во-первых, это ОТО Эйнштейна, в которой тяготение понимается как искривление в четырехмерном пространстве-времени, а эта теория неизбежно встраивается в теорию суперструн. Долго являвшийся предметом поиска синтез между тяготением и квантовыми принципами, таким образом, должен появиться естественным путем.

Также эта теория уже предложила более глубокое понимание черных дыр. Эта история восходит к началу 1970-х гг. Якоб Бекенштейн, израильский физик, работавший в Принстонском университете, обдумывал последствия недавнего для того времени открытия, что черные дыры являются унифицированными объектами (об этом было упомянуто в главе 3). Это подразумевало, что они теряют любую память о том, как были сформированы. Казалось, существует огромное количество способов, которыми черные дыры могут добывать себе строительный материал — в них могут провалиться осколки, планеты, газ и даже космические корабли, — но какие-либо следы этих историй выглядели полностью стертыми. Бекенштейн заметил, что это напоминает рост энтропии, который происходит при смешении двух газов: множество возможных первоначальных состояний ведут к неразличимой структуре в конце. Потеря информации соответствует увеличению энтропии, и Бекенштейн пришел к выводу о том, что черная дыра может иметь энтропию, которая является мерой количества всех различных путей, которыми она могла быть образована. Если Бекенштейн был прав, то черные дыры должны также иметь температуру, и его идея была поставлена на более прочное основание, когда Хокинг на самом деле вычислил, что черные дыры не являются абсолютно черными, а испускают излучение. (Это излучение является слишком слабым, чтобы его можно было измерить, но может быть важным, если окажется, что мини-дыры размером с атом, описанные в главе 3, действительно существуют.)

Теории суперструн, которые описывают структуру пространства в планковских масштабах, позволили сделать еще одно открытие. Американский физик-теоретик Эндрю Строминджер в 1996 г. доказал, что черные дыры (пусть даже одного определенного вида) могут быть представлены как собранные из элементов масштаба струн, а заодно показал, как рассчитать

количество «перестроений» этих крошечных строительных кирпичиков, которые ведут к той же самой дыре. Это число точно согласуется со значением энтропии, вычисленным Бекенштейном и Хокингом. Это, конечно, не эмпирическое доказательство, но оно повышает нашу уверенность в теории, поскольку расчеты основаны на более традиционной физике и она углубляет наше проникновение в таинственные свойства черных дыр.

Еще одна надежда — хотя в настоящее время она более противоречива и менее твердо обоснована — это надежда на то, что суперструны могут помочь проникнуть в тайны квантов. Ричард Фейнман сказал, что «никто по-настоящему не понимает квантовую механику». Она работает как по мановению волшебной палочки, большинство ученых применяют ее почти не задумываясь, но у нее есть свои «призрачные» стороны, о которые многие мыслители, начиная с самого Эйнштейна, «ломают зубы». Трудно поверить, что мы уже достигли оптимального ее понимания.

Даже если мы не можем непосредственно исследовать планковские величины, некоторые черты физического мира, который мы можем наблюдать, — например, особая ситуация, заключающаяся в том, что в микромире присутствуют три основные силы, особые виды частиц и т.д., — могут «выплыть» из теории суперструн, как, по всей видимости, и теория тяготения Эйнштейна. Если это случится, мы сможем быть полностью уверены во всей математической конструкции. Теория суперструн, как мы обсудим в следующей главе, может предложить всеобъемлющую теорию мультивселенной.

глава 11

Совпадение, провидение или мультивселенная?

В религии я склоняюсь к деизму, однако доказательство его считаю в основном проблемой астрофизиков. Существование космологического Бога, который создал Вселенную (как это заявляется в деизме), возможно и в конце концов может быть обосновано в форме таких материальных доказательств, которые мы пока не можем даже вообразить.

Э. О. Уилсон. Непротиворечивость

Что означает точная настройка?

Замысловатая структура нашей Вселенной выросла из простых законов, которые, однако, совершенно не гарантируют сложные последствия; мы видели, что различные варианты наших шести чисел привели бы к скучным и стерильным вселенным. Подобным же образом математические формулы могут приводить к очень ярким результатам, но чаще всего этого не происходит. Например, множество Мандельброта со всей его бесконечной глубиной витиеватой структуры выводится из простой формулы (см. рис. 11.1), но другие формулы, на первый взгляд похожие, создают очень скучные графики.

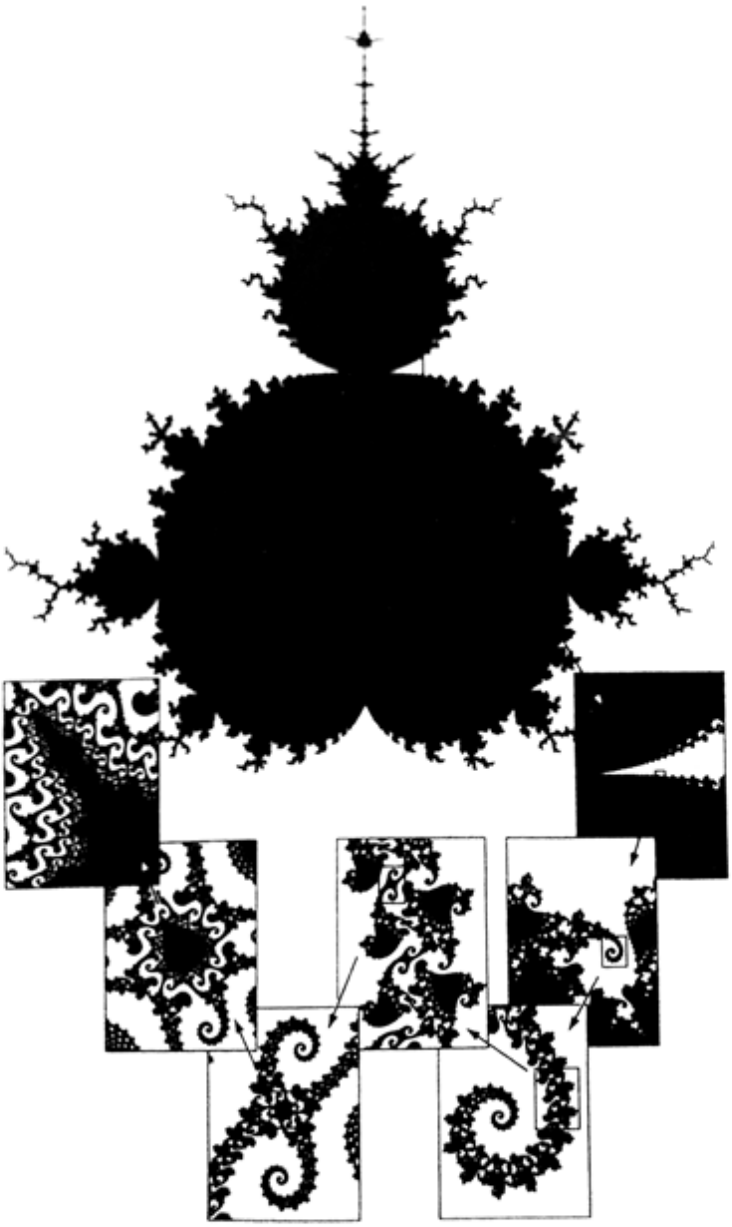


Рис. 11.1. Множество Мандельброта: общая структура и семь увеличенных изображений фрагментов. Эта бесконечно сложная схема, которая слой за слоем раскрывает замысловатые структуры, вытекает из короткой и простой формулы. Но многие похожие формулы описывают скучные и не имеющие отличительных черт структуры. Наша Вселенная управляется законами, которые допускают чрезвычайно большой разброс сценариев развития

Есть самые разные способы реагировать на очевидную точную «настройку» наших шести чисел. Один трезвый ответ состоит в том, что мы не существовали бы, если бы эти числа не были «подогнаны» правильным образом: очевидно, что мы есть, поэтому удивляться нечему. Многие ученые придерживаются этой линии, но меня она, конечно, оставляет неудовлетворенным. На меня производит впечатление метафора канадского философа Джона Лесли. Представьте себе, что вы стоите перед расстрельной командой. Пятьдесят человек в вас целятся, но все промахиваются. Если бы кто-то не промахнулся, вы бы не выжили и не смогли бы задуматься об этом. Но вы не можете это просто забыть — вы озадачены и будете искать причины своего фантастического везения.

Другие ученые представляют «настройку» чисел как доказательство существования всеблагого Творца, который сформировал Вселенную с определенным намерением создать нас (или, если быть менее антропоцентричными, чтобы позволить возникнуть замысловатым структурам). Это в традициях Уильяма Пейли и других защитников «аргумента творения по замыслу» в качестве доказательства существования Бога. Сейчас варианты этой идеи поддерживаются знаменитыми учеными-теологами, такими как Джон Полкинхорн. Он пишет, что Вселенная — это «не просто “какой-то старый мир”, но особенное и отлично настроенное для жизни место, поскольку она является созданием Творца, который пожелал, чтобы было так»20.

Если кто-то не принимает аргументы о «провидении», есть еще одна точка зрения, которую — хотя она и является гипотетической — я нахожу весьма привлекательной. Это идея о том, что наш Большой взрыв не был единственным. Отдельные вселенные могли остывать по-разному, и, в конце концов, ими управляют разные законы, и определяются они разными числами. Эта гипотеза не выглядит «экономной», — в самом деле, возможно, ничто не кажется более экстравагантным, чем обращение ко множеству вселенных, — но естественным образом проистекает из некоторых (пусть даже и умозрительных) теорий и открывает новое видение нашей Вселенной как всего лишь одного «атома» бесконечной мультивселенной.

Мультивселенная

Некоторые люди склонны отвергать «метафизические» понятия (обидное слово с точки зрения физика!). Но я считаю, что мультивселенная полностью находится в компетенции науки, хотя пока что является всего лишь осторожной гипотезой. Однако мы уже наметили, какие вопросы следует задать, чтобы поставить эту теорию на более надежное основание. Куда более важно (поскольку любая хорошая научная теория должна быть уязвима для опровержения) то, что мы можем представить, какое развитие событий заставит нас отказаться от этой концепции.

Основной камень преткновения — это, конечно же, затруднение с физикой предельных состояний, которые существовали в первые мгновения Большого взрыва. Существуют все более прочные основания воспринимать теорию инфляции всерьез в качестве объяснения расширения нашей Вселенной: самые надежные и обобщенные предсказания этой теории о том, что Вселенная должна быть «плоской», по всей видимости, подкрепляются доказательствами, полученными из последних данных (пусть даже и не в самой простой форме: три составляющих Вселенной — атомы, темная материя и энергия вакуума λ — способствуют большей «плоскостности»). Современные особенности раздувания зависят от физических законов, которые властвовали в первые 10–35 секунд Большого взрыва, когда условия были такими критическими, что находятся далеко за пределами прямых экспериментов. Но есть два пути, с помощью которых мы действительно можем надеяться подвести итог с пониманием того, что же представляли собой эти условия. Во-первых, ультраранняя Вселенная могла оставить очевидные «реликты» в нашей современной Вселенной: например, скопления и сверхскопления галактик были «засеяны» микроскопическими флуктуациями, которые во время инфляции выросли, и их подробные свойства, которые сейчас могут изучать астрономы, несут в себе ключи к экзотической физике, которая господствовала, когда зародились эти структуры. Во-вторых, обобщенная теория может укрепиться, предложив новый взгляд на те аспекты микромира, которые сейчас выглядят необоснованными и таинственными, например на различные типы субатомных частиц (кварки, глюоны и т.д.) и их поведение. Тогда у нас будет и уверенность насчет того, что мы можем применить эту теорию для эпохи инфляции.

Движение этими двумя путями может дать нам убедительное описание физики ультраранней Вселенной. Компьютерные модели того, как Вселенная развивается из чего-то, имеющего микроскопический размер, станут тогда такими же достоверными, как наши сегодняшние расчеты того, как гелий и дейтерий сформировались в первые несколько минут расширения (глава 5), или того, как галактики и их скопления развились из маленьких флуктуаций (глава 8).

Андрей Линде и другие ученые уже доказали (как было описано в главе 9), что некоторые предположения, согласующиеся со всем, что мы знаем, говорят о существовании множества вселенных, которые появились после отдельных «больших взрывов» и стали несвязанными участками пространства-времени. Эти вселенные мы никогда не сможем наблюдать напрямую,

мы даже не можем достоверно сказать, существуют ли они «до», «после» или «одновременно» с нашей Вселенной. Первоначальные предположения, которые предсказывают многочисленные вселенные, все еще являются умозрительными, но, если их удастся укрепить и связать с теорией, которая убедительно объясняет то, что мы можем наблюдать, тогда нам придется принимать другие (ненаблюдаемые) вселенные всерьез, так же как мы доверяем тому, что наши сегодняшние теории говорят о кварках внутри атомов или о том, что скрыто внутри черных дыр.

Если и в самом деле существует множество вселенных, возникает следующий вопрос: насколько они разнообразны. Ответ опять же зависит от характеристик физических законов на более глубинном и более обобщенном уровне, чем тот, который мы сейчас понимаем. Возможно, какая-то «окончательная теория» даст обобщенную формулу всех наших шести чисел. Если это произойдет, то другие вселенные, даже если они и существуют, являются, в сущности, повторениями нашей, а очевидная «настройка» будет являться тайной не более, чем таинственна наша Вселенная. Мы все еще затрудняемся сказать, каким образом набор чисел, созданный в экстремальных условиях Большого взрыва, попал в узкий промежуток, который допускает такие интересные последствия 10 млрд лет спустя.

Но есть и иная возможность. Всеобъемлющие законы, распространенные в мультивселенной, могут оказаться более мягкими. Мощность сил и масса элементарных частиц (а также значения чисел Ω, Q и λ) могут не быть повсюду одними и теми же, а принимать различные значения в каждой вселенной. Тогда то, что мы называем «законами физики», с точки зрения мультивселенной будет всего лишь регламентом, применимым внутри только нашей собственной Вселенной, и результатом ее ранней истории.

Здесь можно провести аналогию с фазовым переходом, таким как хорошо знакомое явление превращения воды в лед. Когда инфляционная эпоха отдельной вселенной заканчивалась, сам космос (вакуум) претерпевал резкие изменения. Фундаментальные силы — гравитационная, ядерная и электромагнитная — с падением температуры «застывают», фиксируя значения N и ε способом, который может считаться «случайным», совсем как рисунок ледяных кристаллов, когда замерзает вода. Число Q, закрепленное квантовыми флуктуациями, когда вселенная имела микроскопический размер, также может зависеть от того, как происходит этот переход.

В некоторых вселенных может быть иное количество измерений, в зависимости от того, сколько из первоначальных девяти пространственных измерений свернулось вместо того, чтобы развернуться. Даже в трехмерных пространствах может быть разная микрофизика и, возможно, разные значения числа λ, зависящие от типа шестимерного пространства, в которое свернулись другие измерения. Во вселенных могут быть разные значения числа Ω (которое фиксирует плотность и длительность их «цикла», если вселенные схлопываются) и Q (которое показывает «гладкость» вселенной и таким образом определяет, какие структуры могут в ней возникнуть). В некоторых тяготение может настолько взять верх над отталкивающим эффектом «энергии вакуума» (λ), что не смогут сформироваться ни галактики, ни звезды. Или ядерные силы могут не попадать в диапазон (число ε, близкое к 0,007), который позволяет таким элементам, как углерод и кислород, оставаться стабильными и синтезироваться в звездах, — следовательно, там не будет элементов из периодической таблицы. Некоторые вселенные могут иметь короткий срок жизни и быть такими плотными, что все в них остается близким к равновесию, с одной и той же температурой повсюду.

А другие вселенные могут быть просто слишком маленькими и простыми, чтобы вообще позволить развиться какой-либо сложной структуре. Я уже выделял одно основное число N, которое является чрезвычайно огромным — в нем 36 нулей. Его размер отражает слабость тяготения: чтобы оно могло иметь значение, должно собраться очень большое количество частиц, как это происходит, например, в звездах (связанных тяготением термоядерных реакторах). То, что звезды живут очень долго, — прямое следствие их размера. Этот долгий срок дает достаточно времени фотосинтезу и эволюционным процессам на планетах, обращающихся вокруг звезд. В главе 3 мы представляли себе вселенную, где число N было бы меньше 1036, но все остальное (в том числе остальные пять чисел) осталось бы прежним. Звезды и планеты все еще могли бы существовать, но они были бы меньше и развивались быстрее. Они не дали бы достаточно длинных промежутков времени, которые требуются для эволюции. И притяжение раздавило бы все достаточно большое, чтобы развиться в сложный организм.

«Рецепт» любой «интересной» вселенной должен включать по крайней мере одно очень большое число: понятно, что не так уж много событий может случиться во вселенной, которая так ограниченна, что вмещает всего несколько частиц. Каждый сложный объект должен состоять из большого количества атомов. Чтобы развиваться по пути усложнения, требуется много времени — во много, много раз больше, чем нужно для одного атомного события.

Но изобилия частиц и длинного промежутка времени еще не достаточно. Даже если вселенная так же огромна, стабильна и имеет долгий срок жизни, как наша, она все равно может состоять только из инертных частиц темной материи. Это могло произойти как из-за того, что физические условия не позволили существовать обычным атомам, так и потому, что все они аннигилировали с равным количеством антиатомов.

Загадка числа λ

Все эти умозрительные идеи дают новую точку зрения на число λ — ключевое число, которое определяет, сколько энергии содержится в пустом пространстве. Считается, что эта энергия, управляющая инфляцией, в латентном состоянии существует в вакууме. Это означает, что λ в отдаленном прошлом была больше на 120 порядков по сравнению со значением, которое оно может иметь сейчас. С такой точки зрения кажется удивительным, что число λ должно было ослабеть до такой степени, чтобы его значение приближалось к нулю. Есть три разных решения этой загадки.

Одно из них состоит в том, что микроструктура пространства (возможно, структурированные подобно пене объединения крошечных взаимосвязанных черных дыр) как-то направляет это число в нужном направлении. Вторая идея заключается в том, что спад происходит постепенно и каким-то образом связан с плотностью обычного вещества. Раз так, то, возможно, не случайно вакуум сейчас вносит в это число практически такой же вклад, как и обычное вещество, поэтому значение Ω составляет примерно 0,3, но в вакууме все еще хранятся запасы энергии, достаточные для того, чтобы обеспечить недостающие 0,7, которые нужны, чтобы довести общую плотность до критического значения для плоской вселенной.

Третья возможность состоит в том, что не существует никакого фундаментального объяснения малости числа λ в нашей Вселенной, но его «настройка» (как и «настройка» всех остальных наших чисел) — это необходимое условие нашего существования. Мы можем считать λ силой, нейтрализующей тяготение при определенной плотности. Именно это должно было происходить в статичной вселенной, которую имел в виду Эйнштейн, когда придумал это число. Поэтому, когда вселенная расширяется и обычное вещество становится более рассеянным, плотность на определенном этапе падает ниже критического уровня и отталкивание начинает «побеждать» тяготение. Возможно, наша собственная Вселенная уже прошла этот критический уровень, поэтому галактики ускоряются в своем движении от нас. Но представьте себе вселенную, которая была бы «установлена» точно так же, как наша, за исключением одного факта — число λ было бы намного больше. Тогда отталкивание взяло бы верх намного раньше. Если бы этот переход произошел до того, как сформировались галактики, они бы так и не возникли — такая вселенная была бы стерильной.

В мультивселенной число λ может принимать множество различных значений: оно может быть представлено как рядом дискретных чисел (определяемых тем, как свернулись дополнительные измерения), так и бесконечным множеством возможностей. В большинстве вселенных λ будет намного выше, чем в нашей. Но наша Вселенная может быть типичной в ряду тех, где галактики могут сформироваться.

Аргумент Кеплера

Проблема мультивселенной может выглядеть сложной даже по космологическим стандартам, но она влияет на то, как мы оцениваем полученные из наблюдений доказательства в сегодняшних спорах о числах Ω и λ. Некоторые теоретики отдают предпочтение самой простой вселенной с достаточным количеством межгалактической темной материи (что противоречит лучшим сегодняшним доказательствам), чтобы число Ω стало точно равным единице. Это подразумевает некоторую «настройку» ранней Вселенной, довольно значительную и абсолютно идеальную. Эти ученые чувствуют себя неуютно с числом Ω, равным, скажем, 0,3, а еще хуже им делается от дополнительных усложнений, таких как число λ, не равное нулю. Как мы увидели,

сейчас ситуация выглядит так, что, несмотря на их страстное желание такого упрощения, они будут разочарованы.

Возможно, здесь мы можем провести параллель со спорами, которые происходили 400 лет назад. Кеплер открыл, что планеты движутся не по круговым, а по эллиптическим орбитам. Галилей был этим огорчен. Он писал: «Для поддержания наилучшего расположения и совершенного порядка частей вселенной… нет ничего другого, кроме кругового движения»[45].

Галилею окружности казались более красивыми, и они были проще — они определяются всего одним числом, радиусом, тогда как для эллипса понадобится дополнительное число, чтобы обозначить его форму (эксцентриситет). Ньютон позже доказал тем не менее, что все эллиптические орбиты можно понять с помощью одной объединенной теории тяготения. Если бы Галилей был еще жив, когда были опубликованы «Математические начала», открытие Ньютона, разумеется, заставило бы его обрадоваться и изменить свое мнение по поводу эллипсов.

Параллель очевидна. Вселенная с низким числом Ω и ненулевым числом λ и т.д. может показаться уродливой и сложной. Но возможно, вся проблема в нашем ограниченном видении. Наша Земля следует по одному эллипсу из бесконечного множества возможных, ее орбита ограничена только требованием, которое позволяет окружающей среде благоприятствовать эволюции (не слишком близко к Солнцу, но и не слишком далеко). Подобным же образом наша Вселенная может быть всего лишь одной из целого набора возможных вселенных и ограничиваться только требованием, которое допускает наше появление. Поэтому я предпочитаю быть осторожнее с бритвой Оккама21: предпочтение, отданное более «простой» космологии, может быть таким же близоруким, как страстная влюбленность Галилея в окружности.

Если на самом деле существует множество вселенных, описываемых различными «космическими числами», тогда мы обнаружим себя в одной маленькой и нетипичной подгруппе, где шесть чисел допускают сложную эволюцию. Кажущиеся «спроектированными» особенности нашей Вселенной не должны удивлять нас больше, чем мы удивляемся тому, что вообще в ней находимся. Мы обитаем на планете с атмосферой, обращающейся на определенном расстоянии от своей звезды-прародительницы, хотя на самом деле это очень «особенное» и нетипичное место. Случайно выбранное место в космосе окажется очень далеко от любой звезды; более того, скорее всего, оно будет находиться где-то в межгалактической пустоте, в миллионах св. лет от ближайшей галактики.

Во время написания этой книги точка зрения о том, что наши шесть чисел в космической истории являются не более чем случайностью, всего лишь интуитивное подозрение. Но оно может укрепиться, если наше понимание лежащих за ними физических процессов углубится. Куда важнее для ее положения в качестве настоящей научной гипотезы то, что она может быть опровергнута: нам нужно будет искать другое объяснение, если выяснится, что эти числа еще более особенные, чем это необходимо для нашего присутствия. Например, предположим, что (вопреки текущим показаниям) число λ вносит менее 0,001 в критическую плотность и, таким образом, оказывается в тысячи раз меньше значения, которое необходимо, чтобы быть уверенным в том, что космическое отталкивание не препятствовало образованию галактик. Это породит подозрение в том, что на самом деле число λравняется нулю по каким-то фундаментальным причинам. Подобным же образом, если бы орбита Земли представляла собой совершенную окружность (хотя нам не менее удобно существовать и на орбите с умеренным эксцентриситетом), это заставило бы отдать предпочтение объяснению, которое понравилось бы Кеплеру и Галилею и в соответствии с которым орбиты планет фиксируются в точных математических соотношениях.

Если лежащие за ними законы определяют все ключевые числа единственным образом, так что никакая другая вселенная математически не согласуется с этими законами, тогда нам придется принять то, что «настройка» есть неумолимый факт и была сделана по воле Провидения. С другой стороны, всеобщая теория может позволять существование мультивселенной, эволюция которой отмечена регулярно повторяющимися «большими взрывами». Тогда лежащие в основе мультивселенной физические законы могут позволять многообразие отдельных вселенных.

Успехи и перспективы: резюме

Объяснение ультраранней вселенной и разработка понятия мультивселенной — задачи текущего столетия. Они будут выглядеть не такими устрашающими, если мы оглянемся на то, что было достигнуто за XX в. Сто лет назад загадкой было само сияние звезд; мы и понятия не имели о том, что находится за пределами нашего Млечного Пути, который считался статической системой. Для сравнения: сейчас наша панорама расширилась на 10 млрд св. лет, и ее историю можно проследить до первых долей секунды в «начале».

Конечно, физически мы можем осуществлять исследования по-прежнему только в нашей Солнечной системе, но усовершенствование телескопов и датчиков позволяет нам изучать такие далекие галактики, что свет от них шел до нас 90% времени после Большого взрыва. Мы нанесли на карту — по крайней мере в общих чертах — бóльшую часть пространства, которое для нас в принципе доступно, хотя подозреваем, что за границами нашего поля зрения Вселенная занимает гораздо более значительный объем, свет от которого до нас еще не добрался (и, возможно, никогда не доберется).

Из подробных наблюдений мы узнаём, как возникают космические структуры и как развиваются галактики — не только близлежащие к нам, но и популяции далеких галактик, которые мы видим такими, какими они были до 10 млрд лет назад.

Такое продвижение возможно только благодаря пониманию, которое само по себе примечательно: основные физические законы постижимы и применимы не только к Земле, но и к самым отдаленным галактикам, причем не только в настоящее время, но даже в первые секунды расширения Вселенной. Только в первые миллисекунды космического расширения и глубоко внутри черных дыр мы сталкиваемся с условиями, где основные физические принципы остаются для нас неизвестными.

Специалисты по космологии больше не страдают от недостатка информации. Современные достижения в большей мере принадлежат наблюдателям и экспериментаторам, а не кабинетным мыслителям. Но в будущем появятся кабинетные «наблюдатели». Результаты обзорных наблюдений галактик, подробные карты неба и т.д. будут доступны для всех имеющих подключение к интернету. Куда более широкое научное сообщество сможет принимать участие в исследовании нашей космической среды обитания, проверять свои интуитивные догадки, искать новые закономерности и т.д.

Наблюдения в значительной степени улучшились, но наше понимание продвигается вперед зигзагом. Его можно изобразить как пилообразный график — теории приходят и оспариваются, но в целом такой график направлен вверх. Для успеха необходимо больше мощных телескопов и нужны более мощные компьютеры, которые позволят создать более реалистичные модели.

В науке есть три великих фронта познания: очень большое, очень маленькое и очень сложное. Космология связана со всеми тремя. В течение нескольких лет космические числа λ, Ω и Q должны быть измерены так, как были измерены размер и форма Земли после XVIII в. Тогда мы, возможно, решим проблему темной материи.

Но фундаментальной трудностью по-прежнему является понимание самого начала: для победы на этом фронте придется подождать окончательной теории — «теории всего», возможно одного из вариантов теории суперструн. Такая теория положит конец интеллектуальному поиску, который начал еще Ньютон, а затем продолжали Максвелл, Эйнштейн и их последователи. Она углубит наше понимание пространства, времени и основных сил, а также прольет свет на загадки ультраранней Вселенной и центров черных дыр.

Возможно, такая цель недостижима. Может не быть никакой «теории всего», или, если она есть, возможно, ее постижение находится за пределами наших умственных способностей. Но даже если эта цель и будет достигнута, это еще не означает конца научных исканий. Являясь фундаментальной наукой, космология одновременно самая грандиозная из наук об окружающей среде. Ее целью является понимание того, как простой «огненный шар» развился в сложную среду обитания, которую мы видим вокруг себя, — того, как здесь, на Земле, и, возможно, во многих других биосферах где-то еще развитие живых существ могло увенчаться их собственными размышлениями о том, как они появились.

Чтобы изложить эту точку зрения, Ричард Фейнман использовал прекрасную аналогию. Представьте себе, что вы никогда раньше не видели, как играют в шахматы, а потом, понаблюдав за несколькими партиями, смогли понять правила этой игры. Подобным же образом физики изучают законы и процессы, которые управляют основными элементами природы. В шахматах знание о том, как ходят фигуры, — это всего лишь заурядный первый шаг к тому, чтобы превратиться из новичка в мастера. Аналогично даже если мы и знаем основные законы, исследование того, как следствия из них определили космическую историю, — бесконечный поиск. Пренебрежение квантовой гравитацией, субатомной физикой и подобным препятствует нашему пониманию «начала». Но трудности интерпретации повседневного мира и явлений, которые наблюдают астрономы, проистекают из их сложности. Все может быть результатом процессов на субатомном уровне, но, хотя мы знаем соответствующие уравнения, управляющие микромиром, на практике мы не можем их решить, применив к чему-либо более сложному, чем одна молекула. Более того, если бы мы и могли, получившееся в результате «редукционистское» объяснение не проливало бы свет на загадки. Чтобы понять значение сложного явления, мы вводим новые «эмерджентные» понятия. (Например, турбулентное движение, способность жидкости к увлажнению и строение поверхностей твердых тел проистекают из коллективного поведения их атомов. Их можно «упростить» до атомной физики, но эти понятия являются важными сами по себе, такими же как «симбиоз», «естественный отбор» и другие биологические процессы, которые в еще большей степени важны по отдельности.)

Аналогия с шахматами напоминает нам еще кое о чем. Нет никакого шанса, что наша конечная Вселенная, которую мы можем наблюдать, могла «отыграть» все эти потенциальные возможности, несмотря на то что она простирается на десятки миллиардов св. лет вокруг нас. Это так, потому что любая оценка того, сколько различных цепочек событий могло произойти, быстро превосходит числа, намного большие тех, с которыми мы уже сталкивались. Количество различных вариантов развития шахматной игры после того, как каждый игрок сделал всего по три хода, составляет примерно 9 млн. Существует гораздо больше партий из более чем 40 ходов, чем те 1078 атомов, которые находятся в пределах нашей видимости. Даже если все вещество во Вселенной образует собой шахматные доски, большинство возможных партий так и не будет сыграно. А разброс вариантов в настольной игре, очевидно, гораздо меньше по сравнению с тем разнообразием, которое предлагает природа.

Даже простые неодушевленные системы в целом слишком «хаотичны», чтобы быть предсказуемыми: Ньютону на самом деле повезло, когда он обнаружил в орбитах планет один из немногих законов природы, который можно предсказать с высокой степенью вероятности! Любой биологический процесс связан с гораздо большим разнообразием, чем шахматная партия, — с повышением сложности на каждом этапе становится больше точек ветвления. Если в каждой галактике, где есть жизнь, имеются миллионы планет, похожих на Землю, то каждая из них будет отличаться от других. (Далеко за пределами нашей видимости может существовать в буквальном смысле бесконечное пространство, где возможна любая комбинация обстоятельств и повторения могут возникать бесконечно часто22.) Эта точка зрения должна заставить нас быть осторожнее с научным триумфаторством — не стоит преувеличивать, как много мы в действительности понимаем в хитросплетениях мира.

Темой этой книги должны были стать глубинные связи между микромиром и космосом, символом которых является Уроборос (рис. 1.1). Наша повседневная жизнь, явно сформированная субатомными силами, также обязана своим существованием точной настройке скорости расширения нашей Вселенной, процессам образования галактик, синтезу углерода и кислорода в древних звездах и т.д. «Правила» устанавливают всего лишь несколько основных физических законов; наше появление из Большого взрыва очень восприимчиво к шести «космическим числам». Если бы эти числа не были «хорошо настроены», постепенное — слой за слоем — разворачивание сложной структуры Вселенной не состоялось бы. Существует ли бесконечное множество других вселенных, которые были «плохо настроены» и поэтому стерильны? Является ли вся наша Вселенная «оазисом» в мультивселенной? Или мы должны искать другие причины для таких благоприятных значений наших шести чисел?

Примечания

1. Космос и микромир

1. Изображения, отражающие весь диапазон масштабов нашей Вселенной от самых больших к самым маленьким, впервые были представлены голландцем Кисом Биком в книге «Космическая точка зрения: Вселенная в сорока прыжках» (Cosmic View: the Universe in Forty Jumps, John Day, 1957). Эти изображения развились далее и стали популярны после выхода книги и фильма под названием «Степени десяти» (Powers of Ten), представленных Чарльзом и Рэй Имз совместно с Филиппом и Филлис Моррисон (W. H. Freeman, 1985).

2. Наша космическая среда обитания I: планеты, звезды и жизнь

2. Был разработан альтернативный метод — систематическое измерение положения звезды, достаточно точное, чтобы отследить ее орбитальные колебания. (Тогда как метод Доплера измеряет движение вдоль луча зрения, этот метод обнаруживает поперечное движение в плоскости неба.)

3. Огромное число N: сила тяготения в космосе

3. Для того чтобы атом вышел из сферы действия тяготения, должна быть проделана работа. Ее можно считать силой «обратного квадрата» и вычисляется она как соотношение (масса) / (радиус)2, умноженное на расстояние, через которое действует сила и которое пропорционально (радиусу). Также известна и энергия связи. Она пропорциональна соотношению (масса) / (радиус). Следовательно, эту формулу можно представить как (масса)2/3, потому что при постоянной плотности радиус вычисляется как (масса)1/3.

4. Имеется в виду книга Джулиана Барбура «Конец времени» (The End of Time, Weidenfeld & Nicolson, 1999). На русский язык не переводилась.

5. Эта неуверенность по поводу экстремальных условий около сингулярности не подрывает нашей уверенности в существовании черных дыр или в нашем понимании их свойств. Подобным образом тайна кварков не уменьшает нашей уверенности в обычной физике атомов, которая зависит от поведения электронов на орбитах в несколько больших масштабах.

4. Звезды, периодическая таблица и число ε

6. Ливио и др. (Nature, 340, 281 1989) вычислили, насколько производство углерода чувствительно к изменениям в закономерностях ядерной физики.

5. Наша космическая среда обитания II: за пределами нашей Галактики

7. Согласно теории Эйнштейна гравитация зависит не только от плотности, но от [(плотность) + 3 (давление) / c2]. Если игнорировать второй член, то в случаях, когда важно давление излучения, мы получаем разницу в два раза. Тем не менее мы увидим в главе 7, что даже в пустом пространстве может быть какая-то энергия. Если это так, она будет иметь отрицательное давление (иначе говоря, «упругость»). Тогда второй член компенсирует первый, и это вызывает крупное качественное изменение: расширение на самом деле ускоряется вместо того, чтобы замедляться. Этот интуитивно непостижимый результат важен в ранней Вселенной, а также в настоящее время, если энергия пустого пространства (λ — см. главу 7) станет доминирующей.

8. Смешивания между центральной областью Солнца и его внешними слоями не происходит, поэтому в ядре все еще будет больше гелия из-за скопления отработанного ядерного топлива, которое заставляет Солнце светиться более 4,5 млрд лет.

6. Хорошо настроенное расширение: темная материя и число Ω

9. Точное значение критической плотности и, кстати, некоторых других плотностей, упомянутых здесь, зависит от текущего масштаба Вселенной — это то, что известно с точностью всего 10–20% из-за проблем определения так называемой постоянной Хаббла. Эти проблемы сами по себе могут составить содержание целой книги. Тем не менее я должен упомянуть, из уважения к специалистам, что числа в этой книге соответствуют постоянной Хаббла, составляющей (в обычных единицах) 65 км/с на мегапарсек.

10. Куда более интересный вопрос — не нарушается ли закон обратных квадратов в очень маленьких масштабах или — что примерно является тем же самым — не вступает ли в масштабах меньше нескольких метров в игру «пятая сила». Рассуждения, связанные с теорией суперструн (см. главу 10), предполагают, что таким образом могут проявляться дополнительные пространственные измерения. Здесь нам снова не хватает экспериментальных доказательств, и они оказываются куда менее точными, чем нам бы хотелось, потому что тяготение между лабораторными объектами является очень слабым.

11. Меньшее количество дейтерия в случае, когда плотность выше, на первый взгляд кажется ошибочным результатом, но на самом деле это вполне естественно. Чем выше плотность, тем чаще ядра сталкиваются друг с другом и тем быстрее ядерные реакции будут превращать водород (с одним протоном) в гелий (с двумя протонами и двумя нейтронами). Дейтерий (с одним протоном и одним нейтроном) — промежуточный продукт реакции. Если плотность высока, его остается не слишком много, потому что реакции проходят так быстро, что почти весь дейтерий перерабатывается в гелий. С другой стороны, если бы плотность была ниже, нам стоило бы ожидать большего количества «остаточного» дейтерия, оставшегося после первых трех минут существования нашей Вселенной. Эта зависимость тонкая, поэтому любые достаточно точные измерения доли дейтерия говорят нам о средней плотности атомов во Вселенной.

12. Это доказательство на самом деле говорит нам о разнице квадратов масс двух различных видов нейтрино. Более ранний вариант эксперимента «Камиоканде» записал данные 11 событий, связанных с высокоэнергетическими нейтрино от появившейся в 1987 г. неподалеку от нас сверхновой, о чем было упомянуто в главе 4. Американский эксперимент в соляной шахте в Огайо зафиксировал данные еще восьми событий. (Также нейтринные события зарегистрировал детектор в Баксанской лаборатории на Кавказе. — Прим. науч. ред.) Полученные цифры порадовали астрофизиков, поскольку хорошо согласовываются с предсказаниями теорий сверхновых.

13. Следующий шаг в теоретическом понимании субатомной физики может затрагивать понятие, которое называется «суперсимметрия». На этом этапе необходимо связать ядерные силы с другими силами внутри атомов (и таким образом обеспечить лучшее понимание нашего космического числа ε). Тут задействованы и некоторые виды электрически нейтральных частиц, которые были созданы во время Большого взрыва и массу которых можно вычислить.

7. Число λ: замедляется или ускоряется космическое расширение?

14. Следующие друг за другом «гребни волн» в излучении любого атома или молекулы связаны с их колебанием, которое, в сущности, является микроскопическими часами. Вершины волн прибывают медленнее, когда источник удаляется и длина волны увеличивается.

15. Из книги «Воображение природы» (Nature’s Imagination) под редакцией Дж. Корнуэлла (Oxford University Press, 1998).

8. Первичная «рябь»: число Q

16. На первый взгляд может показаться, что это противоречит утверждению о том, что число Q остается одним и тем же во всех масштабах. Тем не менее Q на самом деле рассчитывается как избыточная плотность, умноженная на квадрат масштаба длины. Согласно законам тяготения Ньютона, гравитационная энергия связи на поверхности сферы зависит от массы, деленной на радиус. Тем не менее для сфер различной массы, но одинаковой плотности масса зависит от (радиус)3, поэтому энергия связи отличается на (радиус)2. Следовательно, в более крупных масштабах колебания плотности имеют меньшую амплитуду.

17. Кто-то может задаться вопросом, почему исчезают подструктуры внутри галактик, тогда как отдельные галактики продолжают существовать внутри скоплений, которые не становятся едиными «супергалактиками». Это происходит потому, что на более поздних этапах создания иерархии в скоплениях газ является слишком горячим и рассеянным, чтобы сконденсироваться в звезды. Процесс формирования звезд «угасает» в масштабах больших, чем галактики.

9. Наша космическая среда обитания III: что лежит за горизонтом?

18. В частности, интенсивность излучения, измеренная аппаратом COBE в миллиметровых длинах волн, может быть слабее, чем предсказанная экстраполяция того, что было надежно определено в сантиметровых длинах волн. Многие процессы могут сопровождаться дополнительным излучением на миллиметровых волнах, например излучение от пыли или от звезд с очень сильным красным смещением, и поэтому мы не должны быть обескуражены тем, что на этих длинах волн излучение будет более интенсивным, чем у абсолютно черного тела. Сложнее будет объяснить более низкую температуру на миллиметровых волнах.

19. «Инфляционная Вселенная: В поисках новой теории происхождения космоса» (The Inflationary Universe: The Quest for a New Theory of Cosmic Origins, Addison-Wesley, Reading, 1997).

Глава 11. Совпадение, провидение или мультивселенная?

20. Из книги «Кварки, хаос и христианство» (John Polkinghorne, Quarks, Chaos and Christianity, SPCK Triangle Press, 1994).

21. Уильям Оккам привел взгляд на вещи, который в переводе с латинского означает: «Не следует умножать сущности сверх необходимого».

22. Как саркастически заметил космолог Джон Барроу, если это замечание верно, то оно, конечно, не является оригинальным.

[1] Большая книга афоризмов (изд. 9-е, исправленное) / составитель К. В. Душенко. — М.: Эксмо, 2008.

[2] В настоящее время наибольшее количество экзопланет обнаружено методом транзитов, в первую очередь благодаря работе спутника «Кеплер». — Прим. науч. ред.

[3] Современный уровень точности составляет десятки сантиметров в секунду. — Прим. науч. ред.

[4] Сейчас чувствительность приборов позволяет обнаруживать землеподобные планеты в зонах обитаемости вокруг звезд, более легких, чем Солнце. Кроме того, потенциально обитаемые планеты обнаруживаются другими методами, в первую очередь методом транзитов. — Прим. науч. ред.

[5] О современных представлениях по этому вопросу см.: Никитин М. Происхождение жизни. От туманности до клетки. — М.: Альпина нон-фикшн, 2018. — Прим. науч. ред.

[6] Бруно Д. Философские диалоги. — М.: ИП Карелин, 2013.

[7] Англ. SETI, Search for Extraterrestrial Intelligence. — Прим. пер.

[8] Галилео Г. Избранные произведения в двух томах. Т. 2. Составитель У. И. Франкфурт. — М.: Наука, 1964. С. 216–217.

[9] Эддингтон А. Внутреннее строение звезд. Лекция, прочитанная в Английском Королевском институте 23 февраля 1923 г. Приложение к Nature от 12 мая 1923 г., с. 15, https://ufn.ru/ufn24/ufn24_1/Russian/r241b.pdf

[10] Современное значение ближе к 4 млн масс Солнца. — Прим. науч. ред.

[11] Уилер лишь популяризировал термин, предложенный журналисткой Энн Юинг. — Прим. науч. ред.

[12] В 2015 г. было также обнаружено гравитационное излучение от слияния черных дыр. — Прим. науч. ред.

[13] Уитмен У. Избранные стихотворения и проза. — М.: Гослитиздат, 1944.

[14] «В настоящее время имеются данные по десяткам так называемых «предсверхновых». — Прим. науч. ред.

[15] Заметим, что эта пропорция верна лишь для самых развитых стран. В мире же не наберется и 100 000 астрономов. — Прим. науч. ред.

[16] Есть и атомы с большим числом протонов, так что таблица продолжается, но такие элементы в основном создаются искусственно. В природе их крайне мало. — Прим. науч. ред.

[17] Современные данные говорят о том, что значительное количество тяжелых элементов также синтезируется при слияниях нейтронных звезд. — Прим. науч. ред.

[18] Бирс А. Словарь Сатаны. — М.: Центрполиграф, 2003.

[19] Такие галактики астрономы обычно называют спиральными. — Прим. пер.

[20] По сегодняшним уточненным данным, 13,7–13,8 млрд лет. — Прим науч. ред.

[21] В русскоязычной литературе используется термин «реликтовое излучение», который мы и будем использовать в этой книге. — Прим. ред.

[22] С тех пор важные наблюдения были сделаны на спутнике WMAP и ряде наземных установок. На сегодняшний день самые полные и детальные данные получены спутником Planck. — Прим. науч. ред.

[23] Иногда их также называют бурыми карликами. — Прим. науч. ред.

[24] Даже сейчас надо быть оптимистом, чтобы это повторить. — Прим. науч. ред.

[25] Современные данные исключают возможность того, что три известных сорта нейтрино могут объяснить всю темную материю. — Прим. науч. ред.

[26] Сейчас мы знаем, что оно еще ближе к 1. — Прим. науч. ред.

[27] Пит Хейн-младший (1905–1996) — датский ученый, писатель, изобретатель, художник и инженер. Наибольшую известность приобрел благодаря созданию коротких стихотворных афоризмов, которые называл груками. — Прим. пер.

[28] Сейчас данные по ускоренному расширению вселенной проверены несколькими разными методами, и результаты 1998 г. подтвердились. За это открытие была вручена Нобелевская премия по физике. — Прим. науч. ред.

[29] Гамов Д. Моя мировая линия: Неформальная автобиография. — М.: Наука, 1994.

[30] Такое предсказание было сделано в 1922 г. Александром Фридманом в России. — Прим. науч. ред.

[31] Космический телескоп им. Джеймса Вебба планируется к запуску в 2019 г. — Прим. науч. ред.

[32] Спутник получил название в честь известного астронома Вилкинсона WMAP — Wilkinson Microwave Anisotropy Probe. — Прим. науч. ред.

[33] В последние годы такие расчеты появились. — Прим. науч. ред.

[34] Бл. Августин. О граде Божием. — М.: Харвест, АСТ, 2000.

[35] На сегодняшний день — более 50 лет. — Прим. науч. ред.

[36] Слово происходит от лат. inflatio — раздувание. — Прим. пер.

[37] На настоящий момент мы можем говорить о том, что наблюдаемая Вселенная описывается плоской геометрией с точностью около 1%. — Прим. науч. ред.

[38] Первое такое событие (слияние черных дыр) было зарегистрировано в 2015 г. — Прим. науч. ред.

[39] Людвиг Йозеф Иоганн Витгенштейн — австрийский философ и логик, представитель аналитической философии, один из крупнейших философов XX в. — Прим. пер.

[40] Двумерный мир из одноименного романа Эдвина Эбботта. — Прим. ред.

[41] Эмис М. Стрела времени, или Природа преступления. — М.: Астрель, CORPUS, 2011.

[42] Воннегут К. Сирены Титана. — М.: Neoclassic, АСТ, 2017.

[43] На момент подготовки к печати русского издания этой книги (март 2018 г.) Стивен Хокинг уже ушел из жизни. — Прим. ред.

[44] Бра́на (от мембрана) в теории струн — гипотетический фундаментальный многомерный физический объект размерности, меньшей, чем размерность пространства, в котором он находится (протяженная p-мерная мембрана, где p — количество пространственных измерений). — Прим. пер.

[45] Галилей Г. Диалог о двух главнейших системах мира — Птолемеевой и Коперниковой. М.: Л.: ГИТТЛ, 1948.

Переводчик Виктория Краснянская
Редактор Антон Никольский
Научный редактор Сергей Попов, д-р физ.-мат. наук
Руководитель проекта Д. Петушкова
Арт-директор Ю. Буга
Корректоры М. Миловидова, С. Чупахина
Компьютерная верстка М. Поташкин

© 2000 by Martin Rees
Published by Basic Books, A Member of the Perseus Books Group
© Издание на русском языке, перевод, оформление. ООО «Альпина нон-фикшн», 2018
© Электронное издание. ООО «Альпина Диджитал», 2018

Рис М.
Всего шесть чисел: Главные силы, формирующие Вселенную / Мартин Рис; Пер. с англ. — М.: Альпина нон-фикшн, 2018.

ISBN 978-5-0013-9019-0