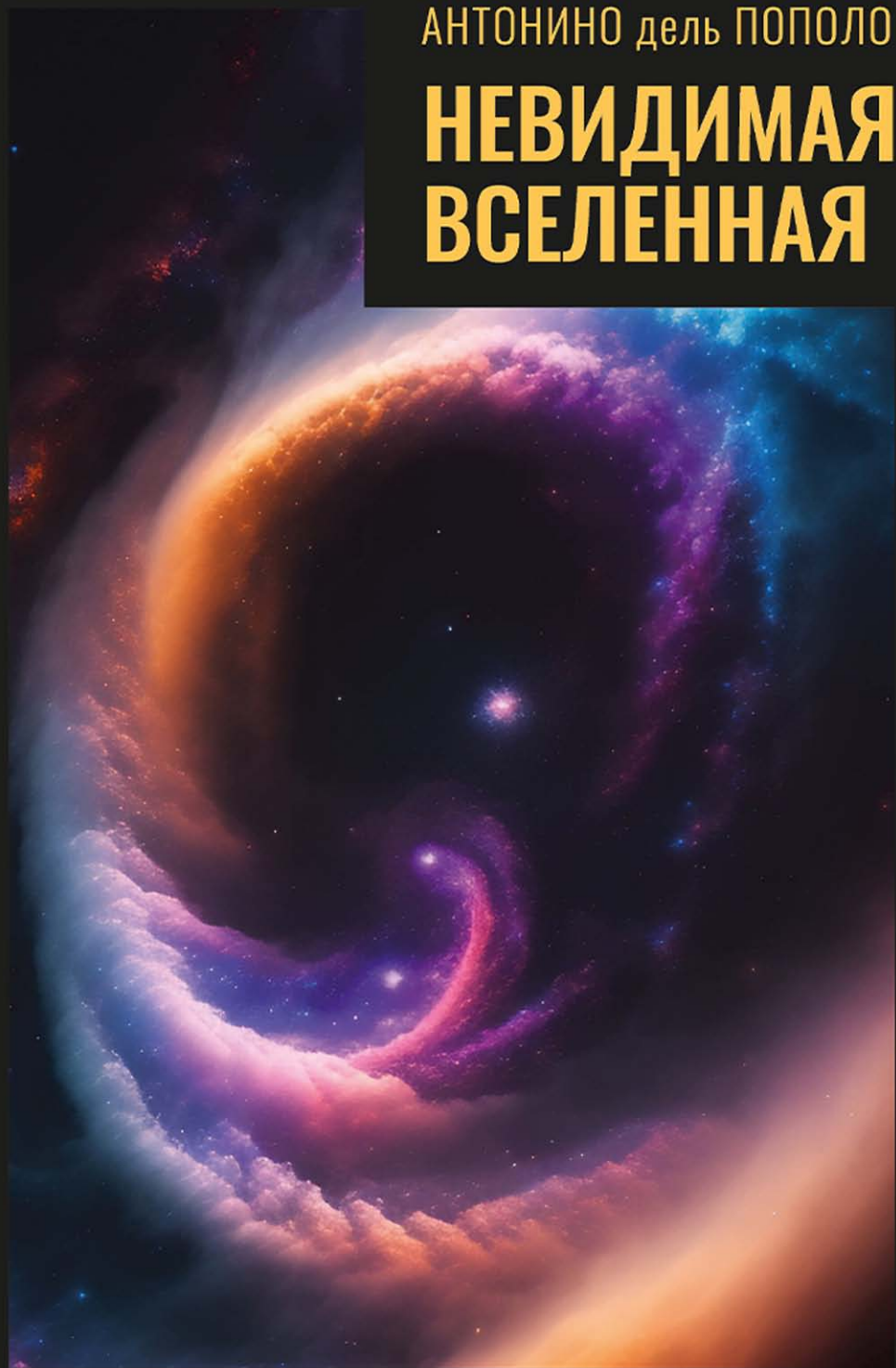


АНТОНИНО дель ПОПОЛО

НЕВИДИМАЯ ВСЕЛЕННАЯ



АНТОНИНО дель ПОПОЛО

НЕВИДИМАЯ ВСЕЛЕННАЯ

Темная материя и темная энергия.
Происхождение и исчезновение Вселенной

Перевод с английского
Н.Ф. Орловой

под научной редакцией
д-ра физ.-мат. наук
О.С. Сажиной

ТЕХНОСФЕРА
Москва
2023

УДК 524.8
ББК 22.6
П58

П58 Пополо Антонино дель

Невидимая Вселенная

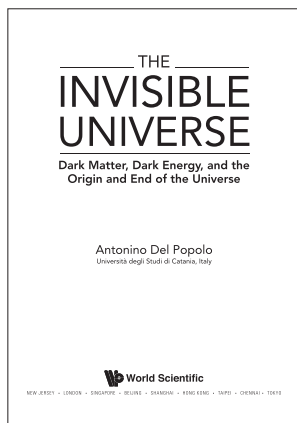
Темная материя и темная энергия.

Происхождение и исчезновение Вселенной

Москва: ТЕХНОСФЕРА, 2023 – 260 с. ISBN 978-5-94836-670-8

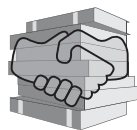
Звезды и небесные тела еще в древности волновали умы наших предков. Сегодня Вселенная намного сложнее для нас по сравнению с представлениями о ней сотни лет назад: черные дыры, нейтронные звезды, белые карлики, сверхновые, различные виды туманностей, галактик, скопления и сверхскопления галактик и многое другое. Самое удивительное состоит в том, что сегодня мы знаем: все бесчисленные объекты, которые мы наблюдаем во Вселенной – это всего лишь 5 процентов составляющей ее материи, лишь «видимая» ее часть.

В книге автор пытается ответить на самые сложные и интригующие вопросы космологии: как возникла и развивалась Вселенная; есть ли альтернатива теории Большого взрыва; безгранична ли Вселенная или у нее есть предел; что заставило Вселенную вырасти в невероятно малые сроки от микроскопических до макроскопических размеров. А в конце путешествия астрофизик Антонино дель Пополо приоткроет завесу над тайной темной энергии – какую роль она играет в эволюции и возможном исчезновении Вселенной?



УДК 524.8
ББК 22.6

*Книга подготовлена в рамках проекта
«Книжная дипломатия»
Международной академии транспорта
и АО «РИЦ «ТЕХНОСФЕРА»*



Copyright © 2021 by World Scientific Publishing Co. Pte. Ltd. Все права защищены. Настоящая книга не может быть воспроизведена целиком или частями никакими средствами, включая электронные, механические или фотокопирование, не может быть включена в базы данных или поисковые системы, как существующие на сегодняшний день, так и появившиеся позже, без письменного согласия Издателя.

Русский перевод выполнен с согласия World Scientific Publishing Co. Pte Ltd., Singapore

© АО «РИЦ «ТЕХНОСФЕРА», перевод на русский язык, оригинал-макет, оформление, 2023

ISBN 978-5-94836-670-8

ISBN 978-981-125-263-1 (англ.)

Содержание

Введение	4
Глава 1. Краткая история теории Большого взрыва	8
Глава 2. Изначальная Вселенная	34
Глава 3. Откуда мы знаем, что темная материя существует?	66
Глава 4. Гармония мира	89
Глава 5. Что такое темная материя?	100
Глава 6. Золотой век физики частиц: Стандартная модель	114
Глава 7. Кандидаты в темную материю	148
Глава 8. Обнаружение темной материи	168
Глава 9. Темная энергия	187
Глава 10. Конец Вселенной.....	213
Приложения	231
Библиография	248
Предметный указатель	250

Введение

*У каждого из нас, как и у Луны, есть своя темная сторона,
которую никому никогда не показывают.*

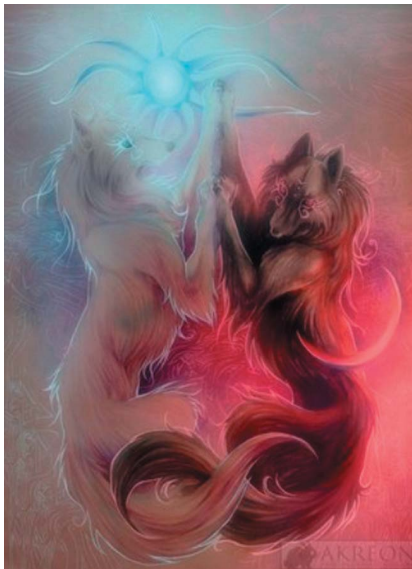
Марк Твен

Люди — это неотъемлемая часть Вселенной, материи, возникшей в результате Большого взрыва, чьи внутренности, мышцы, легкие и сердце связаны с элементами, сформированными в недрах звезд. Поэтому нет ничего удивительного в том, что человека изначально волновало небо, доказательством чему служат наскальные рисунки с изображением богов и героев, а также храмы и древнейшие астрономические обсерватории. Такова особенность нашего вида, названного Карлом Линнеем *Homo sapiens* (человек разумный). Греки называли человека *антропос*, что можно истолковать как «тот, кто смотрит вверх»¹.

Насколько нам известно, из всех видов, живших и живущих на этой планете, только человек обладает сознанием, способен наблюдать за небом, понимать его красоту и задаваться вопросами о смысле жизни и о смерти, о происхождении и исчезновении как человека, так и Вселенной. Более того, слово *homo* (человек) имеет тот же корень, что и слово *humus* (земля, грязь). Таким образом, *Homo anthropos* это своего рода мостик между землей и небом, наделенный с рождения любопытством, которое толкает его на исследование и постижение тайн природы. Небо объединяет огромное число людей, живших и живущих на Земле по сей день. Меняются и исчезают языки и цивилизации, как и религии, объясняющие то, что есть жизнь и каковы ее цели. Современная организация общества, конечно же, существенно отличается от той, что была десятки тысяч лет назад. Эволюция во всех сферах жизни изменила и уничтожила то, что некогда было незыблемым в самом образе мысли. Объединяет все эти изменения только небо, само оставаясь практически неизменным. У Луны все те же фазы, и Солнце следует своему годовому циклу, определяющему смену времен года. Положение созвездий, видимых в разные периоды года, практически не изменилось. В конечном итоге, люди, которые жили 30 тысяч лет назад под нашим небом, видели те же созвездия и все те же звезды в подобном положении.

¹ На самом деле слово *anthropos* можно разделить на *anò* (вверх), *anthreo* (смотрю) и *ops* (глаз). Это толкование находит свое подтверждение в «Метаморфозах» Овидия, где мы увидим: «Os homini sublime dedit, coelumque tueri iussit [deus]» (Человеку даровано лицо, повернутое вверх, а его взгляд устремлен в небо и поднимается к звездам). Книга 1, с. 85–86.

Однако очевидно и то, что хотя небо все то же, воспринимается оно по-другому: изменилось понимание небесных тел и явлений, из которых оно состоит, а также их смысл. Аборигены Австралии верили, что Солнце — это женщина, которая просыпается утром у себя дома на востоке и разжигает костер. Перед тем как отправиться в путь, она украшает себя красной охрой, которая, растворяясь в воздухе, окрашивает облако в красный цвет. Это был рассвет. Как только женщина достигала запада, она меняла свой макияж, окрашивая небо желтым и красным, и это был закат. Наконец Женщина-Солнце возвращалась под землей в свой дом. Для индоевропейских народов Солнце и Луна передвигались по небу на запряженных лошадьми колесницах, которыми управлял возничий. Викинги винили в солнечных затмениях волка Сколля, который гнался за богом Солнца, Солем, и, догнав его, разрывал на части. Тогда люди поднимали страшный шум — стучали горшками и сковородками, чтобы испугать волка и вернуть Солнце на место. То же самое случалось и во время лунного затмения: волк Хати пожирал Луну (Мани). Персы верили, что затмения — это кара господня, а римляне и представить себе не могли, что затмения вызваны природными явлениями. Понимание этого явления и предсказание затмений приписывают грекам (Фалес Милетский, 585 г до Р.Х.), хотя, по-видимому, еще древние халдеи 2500 лет назад уже знали о 18-летнем цикле, т.н. цикле Сароса, в конце которого повторяются затмения.



Сколь и Хати (2009). Предоставлено Акгеон

Незнание природных явлений привело к созданию мифов и богов, управлявших всеми сферами жизни. И хотя некоторые греческие философы, а также представители Великой Греции (современная Сицилия), например Пифагор, Архимед, Анаксимандр, Эмпедокл и Аристарх, уже обладали более научным представлением о мире, его часто не воспринимали по культурным или политическим причинам. Например, Эпикур не принял атомистическую теорию. Даже Иоганн Кеплер многие столетия спустя считал, что планеты — это разумные существа. Декарт и Ньютон, хотя и верили, что природные законы созданы Богом и Вселенная сама управляет собой, следуя этим законам, считали, что Бог может в любой момент изменить эти законы. Ньютон полагал, что Бог постоянно вмешивается, чтобы планеты следовали правильным орбитам. С развитием исследований и научной мысли объяснительная роль богов и мифов существенно сократилась. Роли религии и науки явно разграничились.

Как мы сказали, небо объединяет нас с нашими предками. Всего лишь сто лет назад считалось, что Вселенная представляет собой звезды, планеты и кометы.

Сегодня Вселенная намного сложнее для нас по сравнению с представлениями о ней наших предков: черные дыры, нейтронные звезды, белые карлики, сверхновые, различные виды туманностей, галактик, скопления и сверхскопления галактик и многое другое. Самое удивительное состоит в том, что сегодня мы знаем: все бесчисленные объекты, которые мы наблюдаем во Вселенной, всего лишь 5 процентов составляющей ее материи, лишь «видимая» ее часть. Однако наше преимущество в знании по сравнению с нашими предками значительно сократится, если мы будем полагать, что обладаем ограниченным знанием даже малой части Вселенной, которую видим. Мы даже не понимаем, из чего она на самом деле состоит. Мы можем лишь количественно определить степень нашего невежества относительно Вселенной в процентах — 95%, и у этого невежества есть имя: темная материя и темная энергия. О первой мы имеем некоторое представление: вероятно, это неуловимые частицы, слабо взаимодействующие с обычным веществом. Относительно второй, которая начала проявляться всего несколько миллиардов лет назад, мы знаем и того меньше: возможно, это энергия вакуума, который действует как отталкивающая гравитация, но в сущности мы лишь нащупываем путь в темноте.

Космология изучает Вселенную во всей ее целостности, пытаясь понять ее происхождение, структуру и эволюцию.

В этой книге я изложу космологию так называемого Большого взрыва и альтернативную теорию, которая объясняет, как возникла и развивалась

Вселенная, переходя из состояния, где в горячей среде доминировала энергия, к кристаллизации энергии в галактиках и структурах, которые мы наблюдаем. Мы увидим, как возникла Вселенная в результате фазы ускоренного расширения, известной как инфляция (см. раздел 2.2 и Приложение А), что заставило Вселенную вырасти в невероятно малые сроки от микроскопических до макроскопических размеров, сглаживая свою геометрию и преобразуя энергию вакуума в материю и энергию.

Мы узнаем, как изучение галактик, скоплений галактик, отклонение света, производимого массами, и *микроволновое фоновое излучение*, или реликтовое излучение, пронизывающее всю Вселенную, помогли нам понять, что большая часть материи, составляющей Вселенную, невидима, а также обсудим несколько предположений относительно природы этой материи.

Темная материя состоит из частиц, которые отличаются от частиц обычной материи, новых частиц, предсказанных теориями, выходящими за рамки *Стандартной модели физики элементарных частиц*, полученных, выявленных и изученных в огромнейших ускорительных машинах, таких как БАК (Большой адронный коллайдер) в ЦЕРН (Европейском центре ядерных исследований) в Женеве. Мы обсудим эту модель, историю ее создания, основополагающие идеи ее построения, а также поймем, как мир, который мы видим таким прочным, на самом деле состоит из полей и волн, и как из полей и «симметрий» рождаются элементарные силы природы. Мы увидим, что этот мир разительно отличается от того, как мы его воспринимаем. Потом мы отправимся в «зоопарк» кандидатов в частицы темной материи и обсудим их свойства. Поговорим о частицах, чье существование продиктовано особой симметрией, *суперсимметрией*, и рискнем отправиться в малоизученные области дополнительных измерений в поисках частиц темной материи, и опишем методы, с помощью которых продвигаются поиски этого современного Грааля.

И тогда приоткроется завеса над тайной темной энергии и гипотезами относительно ее природы, что поможет нам сделать вывод о том, какую роль она играет в эволюции и конце Вселенной. Судя по ее известным на данный момент свойствам, темная энергия может привести Вселенную к тепловой смерти — и она превратится в некую вселенную, где в огромных и холодных пространствах перемещаются одни фотоны. Если же в будущем темная энергия обнаружит другие свойства, то возникнут новые сценарии развития Вселенной, где она вновь сожмется в результате *Большого хлопка* или будет иметь цикличную природу, благодаря которой после рождения, эволюции и смерти вновь, словно птица Феникс, возродится из пепла.

ГЛАВА I

КРАТКАЯ ИСТОРИЯ ТЕОРИИ БОЛЬШОГО ВЗРЫВА

История астрономии — это история уходящих горизонтов.
Эдвин Хаббл

1.1. Статическая Вселенная

С древних времен и до Средних веков концепция космоса основывалась на физике Аристотеля и астрономических моделях Птолемея. Вселенная была статической, ничто не менялось: планеты и звезды двигались в соответствии с неизменными и вечными циклами. Идеи Николая Коперника и Джордано Бруно, а также издание в 1687 году книги Исаака Ньютона *Principia Mathematica* («Математические начала натуральной философии») значительно изменили представление о космосе, но не представление о его статичной природе.

Неизменяемая Вселенная обладает удивительным обаянием. Одной из характерных черт западной мысли было предпочтение такого мирового устройства, где на Вселенную не влияет то, что происходит на Земле. В качестве примера подобного видения вещей можно привести древний *миф о вечном возвращении*, который в современные времена поддерживал даже Фридрих Ницше, или вселенную с часовым механизмом, типичную для ньютоновской механики. Взгляд Ньютона был редуccionистским, или упрощенным: объяснение функционирования космоса сводится к использованию физических законов. Обобщенное толкование редуccionизма приводит к статической природе Вселенной. В сущности, даже если планеты двигаются, то делают они это в соответствии с определенными и вечными законами, которые, повторяясь, способствуют появлению вселенной, которая всегда равна самой себе. Однако тут есть одна проблема: статичность вступает в конфликт с ньютоновской механикой. Поскольку гравитация притягивает, как указал Ричард Бентли в конце XVII века, судьба всех статических и конечных систем — это сжатие. Ньютону не составило труда разрешить этот парадокс. Достаточно было предположить, что Вселенная бесконечна и

массы распределены равномерно, что благодаря симметрии приводит к разрушению гравитационных сил. Таким образом, Вселенная Ньютона была бесконечна, равномерна, статична и находилась в состоянии неустойчивого равновесия. Однако вскоре замаячил еще один парадокс, подрывающий точку зрения Ньютона — т.н. парадокс Ольберса, согласно которому тот факт, что ночное небо не такое ясное, как днем, несовместим со вселенной, которая бесконечна и равномерно заселена звездами.

Представление о статической вселенной так долго владело умами, что изменения произошли лишь с приходом XX века. До открытия Хабблом расширяющейся Вселенной статическую вселенную признавали многие ученые XX века, в том числе Альберт Эйнштейн. Через два года после публикации трактата по общей теории относительности в 1917 году Эйнштейн приложил свою теорию ко Вселенной и обнаружил результаты, противоречащие его представлениям, равно как и представлениям других ученых того времени, о статичной природе Вселенной. Он обнаружил, что его уравнения предсказывали расширяющуюся или сжимающуюся вселенную. Не слишком доверяя в данном случае своим уравнениям и следуя общему предубеждению, что Вселенная по своей природе статична, Эйнштейн ввел в свои уравнения постоянную, космологическую константу Λ , которая, производя отталкивание, противодействует гравитационному притяжению и вынуждает Вселенную оставаться статической.

Проблема, с которой столкнулся Эйнштейн, используя свои уравнения, была сродни той, что обозначил Бентли несколько веков ранее в контексте ньютоновской механики, а именно: любая конечная и статическая система рано или поздно сожмется. Эйнштейн не мог решить проблему так, как Ньютон, из-за сложной структуры своей модели. Вселенная Эйнштейна имела особую геометрическую структуру, конечную и без границ. С точки зрения геометрии это была *3-сфера*, то есть трехмерная сфера, встроенная в четырехмерное пространство. Чтобы лучше в этом разобраться, поясню на примере: поверхность шара — это двумерная сфера, называемая *2-сферой*, в трехмерном пространстве. Данте Алигьери уже представил себе такую структуру: его *Рай* имеет структуру 3-сферы, как подметил в 1979 году математик Марк Петерсон¹. Его Вселенная была конечной, но беспредельной, безграничной, как сфера, и поскольку гравитация притягивает, — увы! — такая Вселенная не могла быть статической.

¹ В 2006 году это интуитивное наблюдение развил румынский физик и публицист Хориа-Роман Патапиевич в своей книге «Глаза Беатриче: Каков был на самом деле мир Данте?»

Таким образом, если Ньютон сумел решить проблему и сделать вселенную статичной, предположив, что она бесконечна, равномерна и симметрична, в геометрии Эйнштейна этого не могло случиться. Поэтому, чтобы разрешить это противоречие, он ввел космологическую постоянную, которая должна была блокировать тенденцию к расширению или сжатию его вселенной.

Результатом стала статическая и закрытая Вселенная. Более того, космологическая константа Λ своим робким присутствием обнаруживала свое воздействие лишь на очень больших масштабах – космологических масштабах. Казалось, это хорошее решение проблемы. Эйнштейн считал, что в случае ненулевой космологической константы и нулевой плотности материи его уравнения не имеют решения. Однако он заблуждался, и в том же году Виллем де Ситтер показал, что Вселенная с космологической константой и лишенная материи экспоненциально расширяется. В течение двух лет Эйнштейн пытался найти ошибку в решении де Ситтера, но ему это так и не удалось.

1.2. Вселенная Фридмана

Однако природу не так просто обуздать, и рано или поздно все тайное становится явным. И вот в 1922 году Александр Фридман, русский метеоролог, по образованию физик и математик, многогранный человек по натуре, работавший в обсерватории Петрограда (ныне Санкт-Петербург), опубликовал статью под названием «О кривизне пространства» в немецком научном журнале, а то время физика, образно говоря, была синонимом Германии. Полученные им решения не отличались от тех, к которым ранее пришел Эйнштейн: они определяли однородную, изотропную и нестатическую вселенную. В отличие от Эйнштейна, Фридмана эти результаты не испугали. Решения уравнений Фридмана, то есть возможные вселенные, которые описываются этими уравнениями, бывают трех типов, как видно на рис. 1.1.

Три типа вселенных, т.е. решения уравнений Эйнштейна, зависят от плотности массы-энергии Вселенной (помните, что масса и энергия – это две стороны одной и той же монеты, как показал Эйнштейн в своей знаменитой формуле $E = mc^2$). Несложно определить конкретную величину плотности, называемой критической плотностью, ρ_c , равную $8,6 \times 10^{-30}$ г/см³, т.е. 0,000000000000000000000000000086 г/см³ (см. врезку 1), или, проще говоря, 5 атомов водорода на кубический метр. Эта плотность называется критической, поскольку различает три разных типа геометрии во Вселенной. На рис. 1.1 показаны три возможных типа Вселенной.

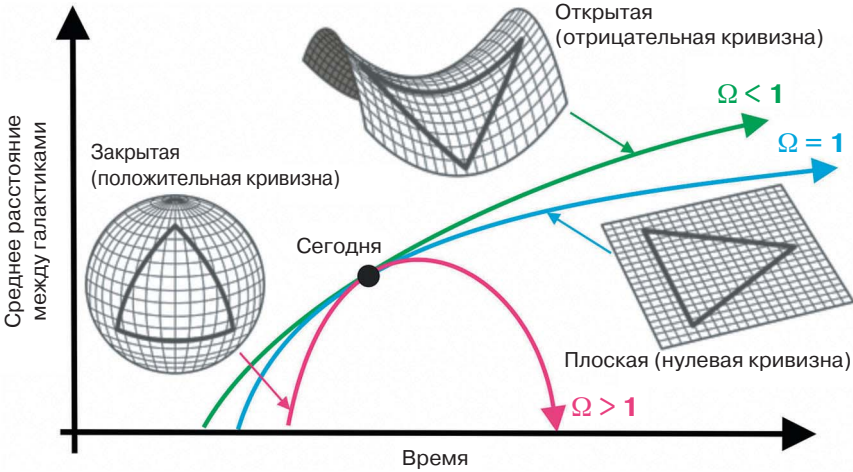


Рис. 1.1. Три вселенных Фридмана

Каждая кривая показывает рост расстояния между галактиками со временем. По вертикальной оси на рис. 1.1 отложен т.н. параметр расширения, который представляет относительное расширение Вселенной, и его можно рассматривать как среднее расстояние между галактиками. По горизонтальной оси отложено время.

Если средняя плотность Вселенной (ρ) больше критической плотности ρ_c , то Вселенная расширяется до максимального радиуса, а потом снова сжимается, как видно по красной кривой на рис. 1.1.

Врезка 1

Степени десяти

Чтобы записывать большие и малые числа более простым и компактным образом, ученые используют обозначение степеней 10. Степень 10 – это число, за которым следует число нулей, равное показателю степени. Например, если мы хотим написать 1000, т.е. 1 с тремя нулями, то пишем 10^3 . Масса Солнца составляет 2×10^{30} кг, т.е. 2 с 30 нулями: 2 000 000 000 000 000 000 000 000 000.

В случае малых чисел, например одной тысячной, $1/1000 = 0,001$, а именно: 1, а перед ним три нуля, пишем 10^{-3} .

Итак, 10^n обозначает 1, за которой следуют n нулей, а 10^{-n} обозначает 1, которой предшествует n нулей.

Единицы массы, используемые в астрофизике

Как правило, масса небесных тел велика. Масса Солнца в килограммах составляет 2×10^{30} , она часто используется как единица измерения массы и записывается как $1 M_{\odot}$.

Итак: $1 M_{\odot} = 2 \times 10^{30}$ кг.

Звезда массой в 8 раз большей, чем масса Солнца, обозначается как $8 M_{\odot}$.

Единицы расстояния в астрофизике

Как и масса, расстояния в астрофизике выражаются другими единицами:

Астрономическая единица, или а.е., это расстояние от Земли до Солнца, $\sim 149\,597\,870\,700$ км.

Световой год, или св. год, это расстояние, которое проходит свет за один год: $9\,460\,730\,472\,581$ км.

Парсек, или пк — это расстояние, равное 3,26 световых года, т.е. $3,26 \times 10^{16}$ м. Кратные парсека это килопарсек (кпк, 1000 пк), мегапарсек (Мпк, 10^6 пк) и гигапарсек (Гпк, 10^9 пк).

Единицы температуры и энергии

В этой книге температура измеряется в градусах Кельвина и обозначается К. Чтобы перевести температуру в градусы Цельсия, надо вычесть 273,16 из величины температуры в градусах Кельвина.

В качестве меры энергии мы будем использовать электрон-вольт, эВ, и его кратные: килоэлектрон-вольт (кэВ, 1000 эВ), гигаэлектрон-вольт (ГэВ, 10^9 эВ) и тераэлектрон-вольт (ТэВ, 10^{12} эВ).

Электрон-вольт можно также выразить в градусах Кельвина: $1 \text{ эВ} \sim 11\,600 \text{ К}$.

Массу предмета можно выразить в электрон-вольтах и его кратных. Например, масса протона $m_p = 1,67 \times 10^{-27}$ кг $\sim 938 \text{ МэВ}/c^2$.

Фридман назвал это решение «периодическим миром». Пространство подобно трехмерной сфере (*3-сфера*, о которой мы говорили ранее), и по этой причине пространственная геометрия вселенной называется *сферической*. Эта Вселенная называется *закрытой вселенной*¹, и она имеет положительную кривизну.

¹ Кривизна указывает, как далеко кривая или объект отклоняется от плоского состояния. Здесь и далее «Вселенная» с прописной буквы означает описание нашей вселенной.

В отличие от евклидовой геометрии, в этой вселенной сумма внутренних углов треугольника больше 180 градусов, пространство конечно, и две параллельные прямые сходятся. Если плотность меньше критической, как видно по зеленой кривой на рис. 1.1, Вселенная расширяется бесконечно, и поэтому мы говорим об *открытой вселенной* с отрицательной кривизной. Ее пространственная геометрия называется *гиперболической*, поскольку напоминает седло лошади, а пространство бесконечно. В гиперболической геометрии сумма внутренних углов треугольника меньше 180 градусов, и две параллельные прямые сходятся в одном направлении, а расходятся в другом. Если плотность равна критической, что соответствует синей линии на рис. 1.1, Вселенная будет расширяться бесконечно, геометрия *евклидова*, где сумма внутренних углов треугольника равна 180 градусов, и две параллельные линии не пересекаются. Кривизна такой вселенной равна нулю. Этот тип Вселенной также называется *плоской Вселенной*, поскольку ее геометрия подобна плоскости.

В космологии в практических целях вместо критической плотности ρ_c используют отношение между плотностью ρ и критической плотностью ρ_c . Это отношение называют *параметром плотности* и обозначают $\Omega = \rho/\rho_c$. Параметр плотности также выражает количество массы определенного вида с точки зрения критической плотности. Например, как мы увидим, *барионная материя* (та, из которой мы состоим) составляет всего 5 % материи во Вселенной, и поэтому с точки зрения ρ_c мы напишем $\Omega_b = 0,05$. Три типа геометрии, которые мы видели ранее и которые представлены на рис. 1.1, можно выразить через параметр плотности Ω следующим образом: у плоской вселенной с плотностью равной критической ($\rho = \rho_c$) он равен 1 ($\Omega = 1$); у гиперболической вселенной Ω меньше 1 ($\Omega < 1$), а у закрытой вселенной Ω больше 1 ($\Omega > 1$).

Три варианта решений Фридмана можно объяснить интуитивно с помощью ньютоновской механики. Если мы бросим мяч вверх со скоростью меньше 11,2 км/с (называемой *скоростью убегания*¹), минимальной скоростью, с которой объект покидает Землю, преодолевая гравитационное притяжение), мяч упадет вниз. Так происходит в закрытой вселенной Фридмана ($\Omega > 1$). Если мяч движется быстрее скорости убегания, он больше не вернется на Землю. Это соответствует гиперболической вселенной ($\Omega < 1$). Если же скорость равна скорости убегания, мяч тоже никогда не вернется на Землю, и у нас $\Omega = 1$.

Фридман не только показал, что Вселенная Эйнштейна неустойчива (расширяется или сжимается), но и первый сказал, что Вселенная имеет начало, а также оценил ее возраст: 10–20 миллиардов лет. Вселенная могла родиться из того, что математики называют *гравитационной*

¹ Вторая космическая. — Прим. перев.

сингулярностью, т.е. точки, в которой кривизна стремится к бесконечной величине. Как примеры гравитационной сингулярности, помимо той, что связана с рождением Вселенной, можно назвать *черные дыры*, о которых все мы слышали, — они поглощают всё, что проходит мимо в определенном радиусе, даже свет! Однако Фридмана сингулярность интересовала не с точки зрения физики, а с точки зрения математики.

Как мы узнаем далее, всего лишь через несколько лет, в 1927 году, Жорж Леметр объяснил физический смысл гравитационной сингулярности: взрыв т.н. *первоначального атома*, в наше время известного как Большой взрыв. Этот термин с известной долей иронии ввел Фред Хойл: он был сторонником модели вселенной, альтернативной модели Большого взрыва, т.н. *теории устойчивого состояния*¹. Объясняя свою теорию во время радиозфира Би-би-си, он сказал: «Эти теории основаны на гипотезе, что вся материя во Вселенной была создана во время одного Большого взрыва в конкретный момент в далеком прошлом».

В ответ на статью Фридмана Эйнштейн кратко высказал свое мнение в прессе, заявив, что вычисления русского ученого ошибочны. Фридман написал Эйнштейну письмо, где постарался объяснить свою точку зрения. Лишь год спустя по настоянию Юрия Круткова, коллеги Фридмана, Эйнштейн прочел письмо и понял, что был не прав. Он опубликовал статью, где признал, что решения Фридмана были верными, но с его точки зрения «лишены смысла с точки зрения физики». Однако прямо перед публикацией последнюю фразу сняли.

Прошло еще десять лет, прежде чем Эйнштейн в полной мере оценил правоту Фридмана, а в 1931 году он удалил космологическую константу из своих уравнений и, со слов Георгия Гамова в 1956 году, пришел к выводу, что введение Λ в уравнения было «самой большой ошибкой в моей жизни».

В 1923 году, помимо вышеизложенных результатов, Фридман обсуждал проблему определения геометрии вселенной, используя триангуляцию²

¹ Теория стационарной Вселенной/устойчивого состояния — это космологическая модель, предложенная Фредом Хойлом, Германом Бонди и Томасом Голдом, в основе которой лежит *совершенный космологический принцип*, т.е. представление о том, что Вселенная однородна и изотропна в пространстве и во времени. Вселенная расширяется и обладает одними и теми же свойствами в любой момент времени и в любой точке пространства. Уменьшение плотности благодаря расширению компенсируется непрерывным созданием материи.

² Триангуляция — это метод, позволяющий вычислить неизвестное расстояние, используя геометрические свойства треугольников.

удаленных небесных тел, например Андромеды. Эта идея, подобно идее Гаусса, нашла применение всего несколько десятилетий назад, благодаря некоторым космическим полетам и с использованием намного больших масштабов, чем те, что предлагал Гаусс.

Фридман прожил недолгую (1888–1925), но очень яркую и насыщенную жизнь. Он проявил себя еще в школе, вместе со своим близким другом, математиком Яковом Тамаркиным. По окончании школы поступил в Университет Петрограда, ныне Санкт-Петербурга, где преподавал физик Пауль Эренфест. Он стал профессором Пермского университета, а потом получил место в Геофизической обсерватории Петрограда, а вскоре ее возглавил. Во время Первой мировой войны на борту бомбардировщика Фридман лично убедился в правоте своих баллистических теорий и получил Георгиевский крест за боевые заслуги. А в 1925 году даже побил рекорд по полетам на воздушном шаре, достигнув высоты 7400 метров для проведения своих экспериментов. В том же году он умер от тифа.

Несмотря на значительные результаты, научные труды Фридмана не оказали существенного влияния на астрономическое сообщество его времени, может быть, потому, что он умер вскоре после публикации своих работ.

1.3. Леметр и расширение Вселенной

По иронии судьбы результаты Фридмана и его обоснование теории Большого взрыва получили развитие благодаря бельгийскому священнику-иезуиту Жоржу Леметру.

Леметр родился в 1894 году в Шарлеруа. Как студент, изучающий инженерное дело, он вступил в бельгийскую армию во время Первой мировой войны. После войны в 1920 году получил ученую степень, а потом поступил в семинарию и в 1923 году получил сан аббата. Параллельно продолжает обучение в Кембридже под руководством Артура Эддингтона, высоко ценившего его способности. Позже Леметр продолжил обучение в Массачусетском технологическом институте, где получил вторую научную степень. В 1925 году он обнаружил решения Фридмана уравнений общей относительности. На знаменитой Сольвевской конференции 1927 года познакомился с Эйнштейном и узнал, что они уже были получены Фридманом.

В том же году Леметр опубликовал на французском языке свою известную статью «Однородная Вселенная постоянной массы и возрастающего радиуса, объясняющая радиальные скорости внегалактических

туманностей»¹ в малоизвестном бельгийском научном журнале *Annales de la Société Scientifique de Bruxelles*. В этой работе он рассматривал динамические решения уравнений общей теории относительности с более физической точки зрения, нежели Фридман, и предположил, что со временем радиус Вселенной может произвольно меняться. В результате он пришел к выводу, что существует взаимосвязь между скоростью удаления, т.е. отрыва, внегалактических туманностей, и расстоянием, на котором они найдены, известная сегодня под названием закон Хаббла. В результате он вывел уравнение $v = kr$, где $k = 0,68 \times 10^{-27} \text{ см}^{-1}$, а именно $0,0000000000000000000000000068 \text{ см}^{-1}$ (см. врезку 1, Степени десяти). Числовые значения в этом отношении были получены с помощью оценок скорости туманностей Слайфера и Стромберга. Леметр не придавал большого значения полученному результату, однако указал, что сдвиг к красному (красное смещение) туманности следует интерпретировать не как эффект Доплера², т.е. как удаление галактик в статической вселенной, но как результат динамики самой системы. Это полностью совпадает с современной точкой зрения. Красное смещение, наблюдаемое в спектрах удаляющихся от нас галактик, является не следствием движения галактик в пространстве, а фактом расширения пространства и увлечения галактик.

Врезка 2

Световой и электромагнитный спектр

В природе есть разные виды волн, например те, что мы видим на пруду, когда бросаем в воду камень. Звук тоже представляет собой волну. Когда некое тело колеблется, его колебания передаются воздуху, который доносит их до нашего уха. Свет — это волна, произведенная колебанием электрического и магнитного поля, и поэтому называется электромагнитной волной. Электрическое поле обозначают **E**, а магнитное — символом **B** (см. врезку 5, где объясняется, что такое поле). Распространяется магнитное поле со скоростью примерно 300 000 км/с (рис. Б2.1).

¹ Un Univers homogène de masse constante et de rayon croissant rendant compte de la vitesse radiale des nebuleuses extra-galactiques.

² Эффект, открытый Кристианом Доплером в 1842 году, согласно которому частота волн, излучаемых движущимся объектом, больше при приближении объекта и наоборот (см. врезку 3, Эффект Доплера).

Электромагнитная волна

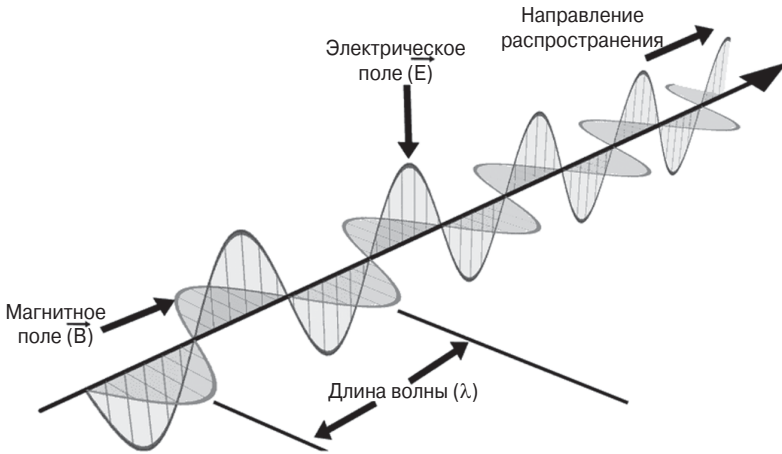


Рис. Б2.1. Электромагнитное поле

Все волны имеют *длину волны*, расстояние между двумя пиками, показанными на рис. Б2.2.

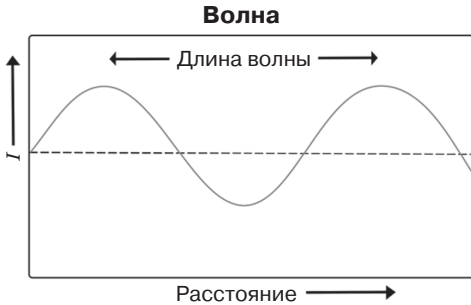


Рис. Б2.2. Волна

Частота ν обозначает число колебаний в секунду и связана с *длиной волны* λ отношением $\lambda\nu = \text{скорость волны}$. Волна с большей скоростью имеет большую энергию. Наши глаза восприимчивы к видимому свету, длина волны которого колеблется между 390 и 700 нм, где нм — это *нанометр*, или миллиардная часть метра. Свет, который мы видим, белого цвета, но с помощью призмы его можно разложить на компоненты от фиолетового до красного, как видно

на рис. Б2.3, который называется непрерывным спектром. Помимо видимого света, есть и другие электромагнитные излучения. Весь набор электромагнитного излучения представляет электромагнитный спектр, который состоит из спектральных участков, как видно на рис. Б2.3. Итак, от меньшей длины волны к большей, есть радиоволны, микроволны, инфракрасные, видимые, рентгеновские и гамма-лучи.

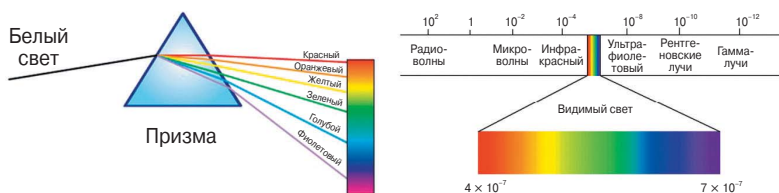


Рис. Б2.3. Световой спектр и спектральные диапазоны

В зависимости от температуры, химического состава и плотности небесные тела излучают в разных участках спектра. Электромагнитное излучение не всегда ведет себя как волна. В одних экспериментах как волна, в других как частица. Бывает также, когда частицы в некоторых экспериментах ведут себя как волны. В физике такую двойственную природу компонентов материи – волновую и корпускулярную – принято называть *корпускулярно-волновым дуализмом*. Таким образом, свет можно рассматривать как состоящий из частиц, которые двигаются со скоростью света, без заряда и массы, называемых фотонами, которые обычно обозначают греческой буквой γ .

То, что спектральные линии (см. врезку 3, Спектр поглощения и излучения) небесных тел и галактик сдвинулись в красную сторону (см. врезку 3, Эффект Доплера), было известно уже во второй половине XIX века. В 1842 году Кристиан Доплер, а в 1845 году и Арман Физо заметили, что спектральные линии, наблюдаемые в свете некоторых звезд, сдвинулись в сторону красного участка спектра, а некоторые в сторону голубого.

Это свойство использовал Уильям Хаггинс для определения скорости звезд, а в 1912 году Весто Слайфер применил этот метод к галактике Андромеды, определив, что она приближается к нам со скоростью 300 км/с. В 1917 году он получил результаты относительно движения 25 систем, из которых только четыре к нам приближаются, и установил, что средняя скорость галактик 570 км/с.

Врезка 3

Спектр поглощения и излучения

В простом, хотя и некорректном представлении атом водорода состоит из протона в центре и вращающегося вокруг него электрона. Есть разные уровни энергии, обозначенные буквой n . Электрон можно найти только на одном энергетическом уровне, т.е. $n = 1, 2, 3...$ У каждого атома имеется уникальное количество электронов в единственной конфигурации, т.е. у каждого элемента есть свой собственный четкий набор энергетических уровней. Это устройство энергетических уровней представляет собой своего рода отпечаток пальца атома. Если фотон ударяет атом, а энергия фотона равна разнице между двумя энергетическими уровнями, тогда электрон на нижнем уровне может поглотить фотон и прыгнуть на верхний уровень, *возбуждая* атом. Если же энергия фотона не равна разнице энергии между двумя уровнями, то он не поглотится. То же самое происходит во время перехода с более высокого на более низкий уровень. В первом случае мы говорим о поглощении фотона (рис. Б3.1).

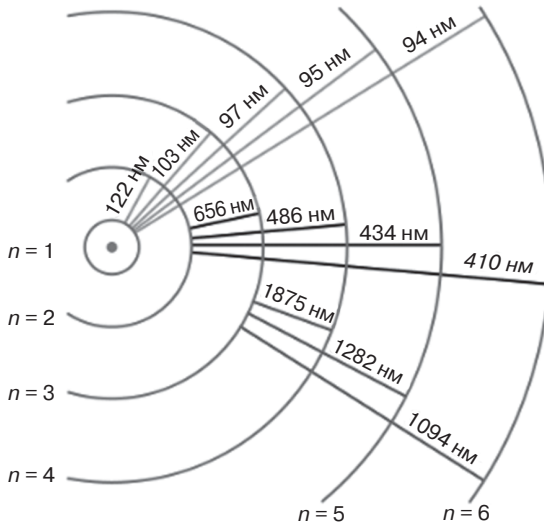


Рис. Б3.1. Энергетические уровни атома водорода

Давайте подсветим газ, свет которого потом пройдет через призму (или дифракционную решетку) (рис. Б3.2).



Рис. Б3.2

Если мы рассмотрим свет после прохождения сквозь газ, мы заметим пропуски, темные пустые промежутки. Темные линии соответствуют энергиям (длинам волн), для которых есть разница в энергетических уровнях водорода. Поглощаемые фотоны появляются как темные линии, потому что фотоны с такими длинами волны поглощаются (рис. Б3.2, правая часть).

Давайте проведем еще один эксперимент: свет горячего газа проходит сквозь призму (или дифракционную решетку) (рис. Б3.3). Мы получим спектр излучения (рис. Б3.3, правая часть).



Рис. Б3.3

Спектр излучения будет абсолютно противоположным спектру поглощения.

Поэтому темные линии в спектре поглощения соответствуют частотам света, поглощенным газом. Эти темные линии точно соответствуют частотам спектра излучения.

В опыте с поглощением мы видим черные линии. Каждая из них соответствует разным элементам.

На рис. Б3.4 представлены некоторые линии в солнечном спектре.

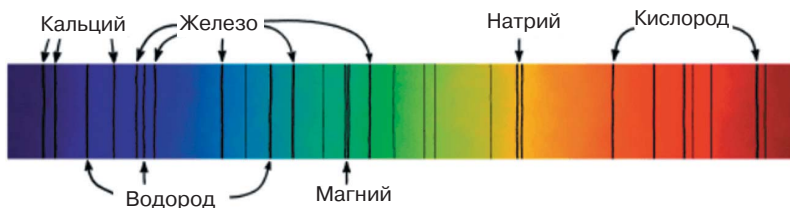


Рис. Б3.4

Из того, что мы увидели, можно сделать следующий вывод: у каждого элемента типичный спектр, как штрих-код, который его безошибочно определяет.

Эффект Доплера

Галактики состоят из мириад звезд, спектры которых объединяются в спектры, подобные звездным. Изучение спектра позволяет помимо всего прочего определить скорость галактик. Линии спектра приближающейся галактики смещаются в голубую сторону (*голубое смещение*), а линии удаляющейся галактики смещаются в красную сторону (*красное смещение*), как видно на рис. Б3.5.

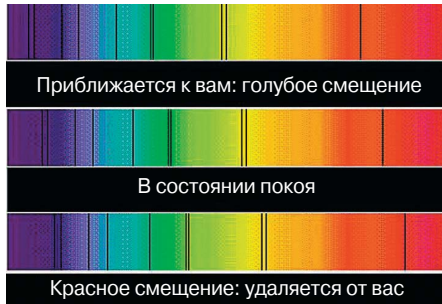


Рис. Б3.5. Красное смещение

Если представить себе, что тело — это лента, то происходит следующее: при удалении она как бы растягивается, а при приближении — сжимается (рис. Б3.6).

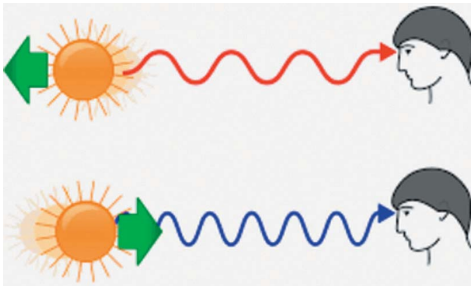


Рис. Б3.6

Это явление называется *эффектом Доплера*, по имени Кристиана Доплера, который открыл его в 1845 году. Эффект Доплера применим к любой волне, в том числе звуковой. Когда приближается машина скорой помощи с воющей сиреной, звук (громкость) выше, поскольку по мере сжатия волны ее длина уменьшается, а частота и вместе с ней и энергия увеличиваются. Когда скорая удаляется, звук сирены ослабевает из-за обратного эффекта.

Чтобы проверить это явление, Доплер нанял группу музыкантов, которые играли в вагоне поезда. Слушая звук при приближении и удалении вагона, он удостоверился, как работает открытое им явление.

Тем не менее идеи из статьи Леметра не были приняты. Эйнштейн, дискутируя с ним, сказал, что с точки зрения математики статья безупречна, а с точки зрения физики ужасна.

В течение трех лет статья Леметра, опубликованная в малоизвестном журнале, оставалась незамеченной и обратили на нее внимание совершенно случайно. На заседании Королевского астрономического общества де Ситтер обсуждал результаты своей последней работы, опубликованные в материалах конференции. На той же конференции Эддингтон выразил мнение, что необходима модель, промежуточная между моделями Эйнштейна и де Ситтера. И тогда Леметр написал Эддингтону о своей работе. Эддингтон рассказал о ней де Ситтеру и другим своим коллегам, перевел на английский язык, чтобы сделать ее еще более востребованной. Статья стала популярной, однако ее фундаментальную часть удалили. В сущности в переводе 1931 года не было раздела с данными и дискуссии по поводу закона Хаббла¹, поскольку Леметр как переводчик и редактор статьи не считал этот пункт важным.

1.4. Первичный атом

За исключением Фридмана к идее о Вселенной, у которой есть начало, астрономы относились с недоверием. Да и для самого Фридмана сингулярность представляла собой лишь «математический объект». Только Эддингтон в 1928 году в своей книге «Природа физического мира» упо-

¹ Закон Хаббла: расстояние между галактиками прямо пропорционально скорости их удаления.

мянул состояние, из которого возникает и расширяется Вселенная, хотя он и не был убежден, когда сказал, что «Вселенная началась со взрыва».

К представлениям Эддингтона всерьез отнесся Жорж Леметр, профессор астрофизики в Католическом университете в Лувене.

В своей статье 1931 года «Расширяющаяся Вселенная» он высказал предположение, что могла существовать статическая протовселенная, в которой «вся энергия была в форме электромагнитного излучения, и она внезапно сконденсировала в материю». Эта идея нашла свое подтверждение в его статье «Принцип мира с точки зрения квантовой теории», опубликованной в 1931 году в журнале *Nature*, где он писал:

«Мы могли бы представить себе начало Вселенной в виде уникального атома, атомный вес которого — это суммарная масса Вселенной. Этот в высшей степени неустойчивый атом будет делиться на все меньшие атомы во время сверхрадиоактивного процесса».

Эта идея получила дальнейшее развитие во время ряда конференций, проведенных Бельгийским астрономическим обществом, Британской ассоциацией продвижения естествознания, а также в публикации «Расширение пространства». В этой статье Леметр писал:

«Таким образом, первоначальное расширение происходило в три этапа: первый период стремительного расширения, в котором атом-вселенная разбивается на атомные звезды; второй период — замедления, а вслед за ним третий период — ускоренного расширения».

Модель Леметра показала, что у Вселенной есть начало, но исключала наличие сингулярности. Он не обсуждал происхождение первичного атома, но допускал его существование до т.н. радиоактивного взрыва. Согласно его теории, бесполезно обсуждать свойства первичного атома до момента взрыва, поскольку пространство и время начались бы только после его распада. Это точно соответствует современной точке зрения: пространство и время возникли в результате Большого взрыва и поэтому не имеет смысла обсуждать, что было до этого.

Как сказал Святой Августин, «мир был создан не во времени, а в свое время», или, как говорил Стивен Хокинг, «думать о том, что происходило до Большого взрыва, все равно что думать, что расположено к северу от Северного полюса».

Если работа Леметра о расширении Вселенной получила признание, то модель первичного атома научное сообщество не восприняло. Приведу всего лишь один пример: в январе 1933 года Эйнштейн посетил семинар

Леметра о космическом излучении, которое Леметр ошибочно считал неким «реликтовым излучением», которое могло дать нам информацию относительно первых моментов Вселенной. После семинара Эйнштейн обсуждал с Леметром вопросы космологии и сказал, что ему не нравится его идея о «первичном атоме», поскольку она «в значительной мере предполагает [теологическую] идею создания». После конференции Леметра в Пасадене на тему космологии первичного атома Эйнштейн пошел еще дальше, сказав: «Это самое красивое и самое всеобъемлющее объяснение создания, которое я когда-либо слышал». Эйнштейн, как и другие ученые, путался в понятиях «создание» и «начало». Для Леметра исходная сингулярность была не «созданием», а «естественным началом» вещей. Он всегда разделял религию и науку — настолько, что при личной встрече с Папой Пием XII сказал, что поддержанная Папой в 1951 году идея о том, что наука подтвердила Книгу бытия, неверна.

1.5. Внегалактическая природа туманностей

С точки зрения наблюдений, до конца 20-х годов прошлого века считалось, что Вселенная совпадает с нашей Галактикой. 26 апреля 1920 года состоялся спор между Харлоу Шепли и Гебером Кёртисом на эту тему: Шепли считал, что Вселенная состоит только из нашей Галактики, а Кёртис полагал, что наша Галактика — лишь одна из многих. Тогда в споре не было ни победителя, ни проигравшего.

Большой спор разрешился лишь несколько лет спустя, после публикации в 1925, 1926 и 1929 гг. трех работ американского астронома Эдвина Хаббла. Он показал внегалактическую природу NGC 6822 (галактики Барнарда), а также галактик M33 и M31, дав обоснование тезису Кёртиса, которую поддержали и другие астрономы, например Эрнст Эпик и Кнут Лундмарк. Для этого Хаббл использовал особые звезды *цефеиды*, которые мы скоро обсудим¹.

Курьезный эпизод из жизни Шепли свидетельствует о том, что и ученым ничто человеческое не чуждо.

Когда Шепли работал в Обсерватории Маунт-Уилсон вместе с Хабблом и Милтоном Хьюмасоном, Хьюмасон показал ему фотографическую пластинку с изображением одной из цефеид в галактике Андромеды. Тогда Хьюмасон пометил пластинку, чтобы потом ее было проще

¹ Хаббл уже приступил к поиску взрывающихся звезд, называемых *новыми*. Он заметил одну из новых среди звезд, но, приглядевшись, понял, что это цефеида, что и позволило ему определить расстояние до Андромеды.

найти. А Шепли, поняв, что с помощью этой цефеиды можно доказать, что Вселенная намного больше его модели, а значит, разрушает ее значимость, стер пометку, пытаясь таким образом скрыть свои заблуждения относительно существования других галактик. Очевидно, Хьюматон знал расположение этой цефеиды и сказал его Хабблу, который и определил расстояние до Андромеды¹.

Эдвин Хаббл родился в 1889 году в Маршфилде. Изучал математику и астрономию в Чикагском университете, а потом получил ученую степень в области права в Королевском колледже в Оксфорде. Вернувшись в США, начал изучать физику, математику, а потом испанский язык, которым занимался и в Оксфорде, и лишь в 1914 году решил связать свою жизнь с астрономией. В 1917 году получил докторскую степень и в 1919 году Джордж Хейл, директор Обсерватории Маунт-Уилсон в Пасадене, предложил ему постоянную работу.

Знания Хаббла в области астрономии и физики были весьма ограничены, однако он сумел достичь значительных успехов в своей карьере.

Полученные Хабблом результаты стали возможными благодаря фундаментальному открытию Генриетты Ливитт, которая в 1908 году опубликовала свою работу «1777 переменных звезд в Магеллановых облаках» в журнале *Annals of Harvard College Observatory* (Анналы обсерватории Гарвардского колледжа), а в 1912 году в информационном бюллетене обсерватории под номером 173 вышла ее статья «Периоды 25 переменных звезд в Малом Магеллановом облаке». В этих работах Ливитт показала существование взаимосвязи между яркостью и периодом переменных звезд под названием цефеиды, по имени Цефеи, второй обнаруженной звезды этого типа. Эти звезды периодически пульсируют, период изменяется от нескольких дней до пары месяцев, благодаря чему меняется их яркость в результате сложных явлений, имеющих отношение к степени их эволюции. Чем больше период колебания, тем больше их внутренняя яркость.

Генриетта Ливитт была одной из знаменитых «женщин-компьютеров» — астрономов, нанятых Эдвардом Пикерингом для составления каталога спектров и яркости звезд на фотографических пластинках обсерватории. Считается, что за четыре года работы они каталогизировали 225 000 звезд и в 1890 году опубликовали первый каталог, который в 1949 году был расширен до 360 000. Открытие Ливитт было столь значительным, что в 1924 году Королевская академия Швеции выдвинула ее на Нобелевскую премию. К сожалению, Ливитт умерла в конце 1921 года.

¹ Андромеду также называют М31 как 31-ю галактику в каталоге Мессье.

Важность цефеид состоит в том, что они служат *стандартными свечами*, эталонными звездами, для которых можно определить *абсолютную величину*, или *внутреннюю яркость*, которая в случае с цефеидами связана с периодом колебания. А по *внутренней яркости/светимости* и по *кажущейся светимости*, т.е. той, что мы наблюдаем, можно определить и расстояние.

Поясню на примере: допустим, у нас есть электрическая лампочка, и мы знаем ее мощность, обычно измеряемую в ваттах и называемую также *яркостью*, т.е. количество энергии, которое она выделяет в одну секунду. Если мы будем отодвигать лампочку на все большее расстояние, то заметим, что она светит все менее ярко. Интенсивность света, который мы наблюдаем, изменяется по мере изменения расстояния. То количество, которое можно назвать *кажущейся яркостью*, или технически *поток*ом, зависит от внутренней или реальной яркости лампочки и от расстояния и уменьшается пропорционально квадрату последнего. Другими словами, если поток лампы на расстоянии одного метра равен 1, то на расстоянии 10 м он будет равен $1/100$, а на расстоянии 100 м — $1/10\,000$. Зная внутреннюю яркость лампочки и измерив ее кажущуюся яркость, поток, можно определить, как далеко от нас лампочка, используя это известное отношение. И так, чтобы определить расстояние, мы должны измерить поток и знать внутреннюю яркость объекта. Покупая лампочку, мы знаем ее яркость от производителя, но в случае с астрономическим объектом все обстоит иначе. Однако есть объекты, для которых мы уже знаем или же можем вычислить внутреннюю яркость, т.е. существуют стандартные свечи. Или вот еще один пример: допустим, рыбаки ночью хотят понять, как далеко они находятся от берега, и они видят свет маяка. Чем дальше они от берега, тем менее ярок свет маяка. Чтобы точно определить расстояние до берега, рыбаки должны были узнать заранее действительную яркость и измерить кажущуюся. Вот и для определения расстояний в космологии нам нужны космические «маяки».

1.6. Хаббл и расширяющаяся Вселенная

Хотя Леметр теоретически обосновал закон расширения Вселенной, благодаря упомянутым ранее осложнениям он так и не был признан научным сообществом. В определенном смысле и сам Леметр был тому виной, поскольку, как уже было сказано, в английском переводе своей статьи 1927 года собственноручно убрал практически все ссылки на закон расширения.

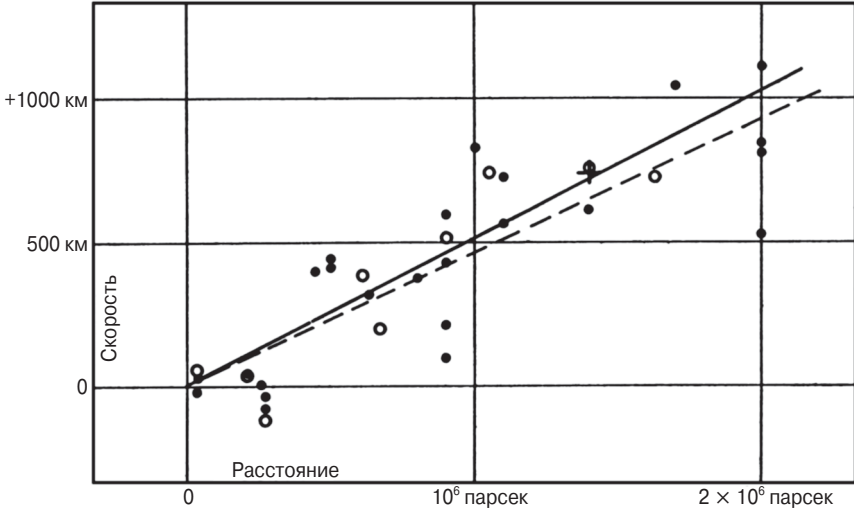


Рис. 1.2. Оригинальные данные закона Хаббла. Скорость увеличивается пропорционально расстоянию между галактиками. Предоставлено Робертом П. Кишнером (<https://www.pnas.org/content/101/1/8>) (Copyright 1929, The Huntington Library, Art Collections and Botanical Gardens)

Наиболее значимый научный результат Хаббла был опубликован в работе 1929 года «Взаимосвязь между расстоянием и радиальной скоростью внегалактических туманностей». Для определения скоростей он использовал эффект Доплера, а для определения расстояния использовал цефеиды, а также расстояния и скорости 24 галактик, полученные Весто Слайфером¹, не упомянутым Хабблом, а также другую частичную информацию о 22 других системах. Хаббл показал, что между скоростью убегания галактик и их расстоянием есть взаимосвязь: $v = Hr$, знаменитый *закон Хаббла*. Величина H известна как *постоянная Хаббла* и представляет собой скорость расширения Вселенной. В то время ее ошибочно считали равной 500 км/с на мегапарсек (см. врезку 1, Единицы расстояния в астрофизике). Оригинальные данные закона Хаббла представлены на рис. 1.2.

Ошибка, обнаруженная Вальтером Бааде в 1950 году, объяснялась главным образом тем, что есть две разные популяции цефеид (Цефеиды

¹ Наблюдая спиральные туманности, Слайфер первым заметил, еще до Хаббла, сдвиг спектральных линий в сторону красного участка спектра, что подразумевает убегание спиральных туманностей. В сущности, он и обнаружил доказательство расширения Вселенной, но не понял этого, поскольку не знал, что туманности — это такие же галактики, как и наша.

и RR Лиры) с разными зависимостями светимость – период, а также тем, что Цефеиды Андромеды в четыре раза ярче. Вот почему оценка Хаббла расстояния Андромеды (около 1 миллиона световых лет) была в два с лишним раза ниже реального расстояния, которое сегодня, как считается, составляет 2,5 миллиона световых лет. Обратная постоянной Хаббла дает примерную оценку возраста Вселенной, которая вместе с величиной, полученной Хабблом, дает всего 2 миллиарда лет – намного меньше, чем, скажем, возраст Земли.

Используя одну из величин, которую сегодня считают верной, 74 км/с на мегапарсек, получаем возраст Вселенной примерно 14 миллиардов лет, в соответствии с другими данными.

На основании данных, использованных Хабблом, линейная зависимость между скоростью и расстоянием не сразу очевидна, и были высказаны сомнения относительно того, каким образом Хаббл получил линейную зависимость на основании столь бедной информации. Представляется маловероятным, что Хаббл понимал возможность подобной зависимости на основании изучения более ранних научных трудов, например, Леметра 1927 года, поскольку неизвестно, знал ли Хаббл об этом исследовании, написанном на французском языке. В английском переводе 1931 года те разделы, где Леметр устанавливает зависимость «скорость – расстояние», а также предыдущие параграфы, где обсуждаются астрономические данные и красное смещение туманностей, используемое для получения этого отношения, отсутствовали. В статье осталась только одна фраза: «начиная с обсуждения имеющихся данных принимаем $R'/R = 0,68 \times 10^{-27} \text{ см}^{-1}$ ».

Леметр никогда не занимался продвижением своих результатов. Лишь один раз, в 1950 году он вернулся к этой теме, дав понять, что не собирается отказываться от своего вывода, к которому пришел в 1927 году. Леметр получил заслуженную славу лишь после смерти. Учитывая его роль в определении закона о расстоянии и скорости, Международный астрономический союз (IAU) в 2018 году принял решение переименовать закон Хаббла в *закон Хаббла – Леметра*. Здесь справедливости ради надо добавить, что в названии закона должно еще быть имя Весто Слайфера, который в действительности первым заметил разбегание галактик.

В целом, закон Хаббла – это первый фундаментальный тест в основе теории Большого взрыва.

Есть еще два краеугольных камня в основании этой теории, которые мы подробно обсудим в следующей главе. Сейчас мы просто укажем, что второй из них – это *космическое микроволновое фоновое излучение* (реликтовое излучение), открытое в 1965 году, которое представляет собой

море, омывающее Вселенную и сквозь небо проникающее на Землю. Это излучение, подобное отпечатку Большого взрыва, предсказали Ральф Альфер, Роберт Херман и Георгий Гамов в 1948 году. Его температура, которую сегодня определяют как 2,725 К, очень близка величине, полученной Альфером и Херманом в 1950 году.

Третий краеугольный камень — это предсказания изобилия легких элементов, образовавшихся в результате первичного нуклеосинтеза, полученные благодаря вычислениям Ральфа Альфера и опубликованные в знаменитой статье « $\alpha\beta\gamma$ » (альфа, бета, гамма), о которой мы и поговорим.

Окончательное принятие теории Большого взрыва произошло благодаря случайному открытию космического фонового излучения. Помимо Леметра, который вернулся к решениям Фридмана и связал расширение Вселенной с красным смещением и теорией первичного атома (которое предполагает первоначальное состояние Вселенной), отцами модели Большого взрыва считают Гомова, Альфера и Хермана. К ним следует добавить и Фридмана, кто, со слов его студента Петроградского университета Гомова, первым заговорил о первоначальном состоянии с чрезвычайно высокими температурами, которое со временем «взорвется»: Большой взрыв.

С 1948 года, когда Гамов, Альфер и Херман обнародовали свои расчеты, чуть ли не 20 лет никто не придавал их результатам никакого значения. Лишь в 1964 году Фред Хойл, Джим Пиблс, Яков Зельдович и Роджер Тайлер вернулись к расчетам нуклеосинтеза, сделанным Гомовым, Альфером и Херманом.

Этот период «молчания», вероятно, объясняется тем, что ни Гамов, ни его студенты в полной мере не осознавали значимости полученных результатов. Кроме того, Альфер и Херман вели дискуссии со специалистами по излучению, которые в итоге ни к чему не привели, поскольку казалось нереальным обнаружить излучение температурой ниже 10 градусов К с помощью доступных на тот момент технологий. Тем не менее оно не только было выявлено, но и стало одной из фундаментальных основ теории Большого взрыва, равно как и бездонным колодезем для черпания информации относительно изначальной Вселенной.

1.7. Каковы размер и возраст Вселенной?

Хотя теория и называется теорией Большого взрыва, речь идет не об обычном взрыве, который начинается в одной точке. Большой взрыв был везде. Приведу простой пример, чтобы пояснить, что такое расширение Вселенной и как работает закон Хаббла. Аналогия такова: точки — это галактики, а шар — это пространство (рис. 1.3). Когда шарик надувается, резина растягивается, и точки удаляются друг от друга. Если представить

себя одной из таких точек, то мы увидим, как все остальные точки от нас удаляются, и сочтем себя центром Вселенной. На самом же деле, мы не стоим на месте, а удаляемся от других точек. Ситуация идентична для любой точки во Вселенной. Как видно на рис. 1.3, с расширением Вселенной увеличивается длина волны, она «растягивается».

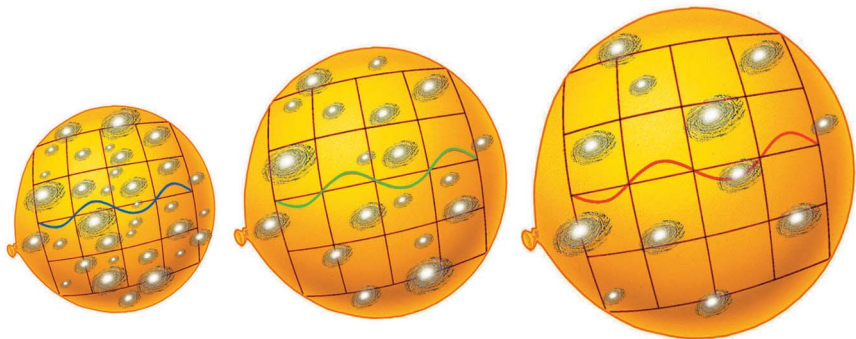


Рис. 1.3. В процессе расширения Вселенной, если представить ее с помощью надувных шаров, галактики удаляются друг от друга. С расширением длина волны излучения удлинится благодаря растяжению пространства

Часто используют еще одну аналогию — с хлебным тестом, которое представляет пространство, с изюмом — то бишь галактиками. Во время закваски тесто поднимается, т.е. увеличивается в объеме, а изюмины, хотя и не двигаются, удаляются друг от друга, поскольку тесто поднимается и тащит их с собой (рис. 1.4).

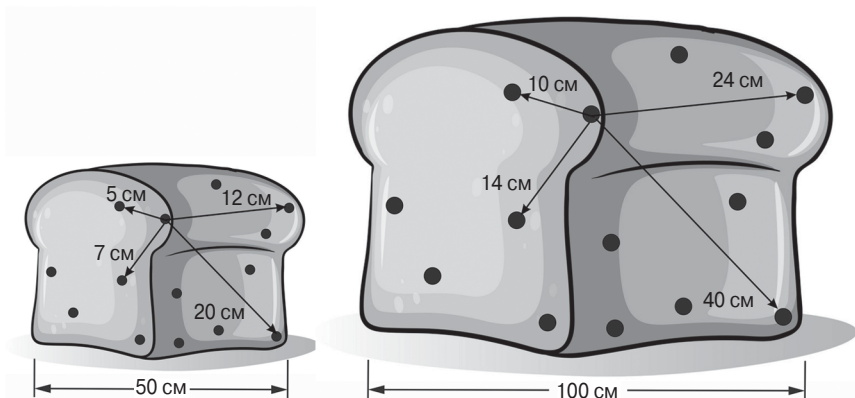


Рис. 1.4. Пример, иллюстрирующий расширение Вселенной

Важно отметить, что расширение Вселенной не касается таких объектов, как планеты, звезды и галактики, поскольку на таком масштабе гравитационная сила доминирует над расширением.

Закон Хаббла также позволяет нам узнать возраст Вселенной и ее размер.

Чтобы оценить возраст Вселенной, предположим, что скорость расширения была одинаковой на протяжении всей жизни Вселенной.

Если расширение Вселенной произошло быстро, то Вселенная молодая, и наоборот. Постоянная Хаббла говорит о том, как быстро расширяется Вселенная, что позволяет определить ее возраст. Если мы изменим направление времени, удаляющиеся в данный момент галактики начнут приближаться, и в идеале сомкнутся в одной точке. Таким образом, если две галактики удалены в данный момент друг от друга на расстояние D , а v — это скорость их отдаления, то время, необходимое для того, чтобы отдалиться на расстояние D , определяется отношением между расстоянием и скоростью. Согласно закону Хаббла, возраст Вселенной противоположен постоянной Хаббла. Если использовать величину $H \sim 74$ км/с на мегапарсек, определенную в 2019 году с помощью космического телескопа Хаббл¹, то получим возраст 13,6 миллиардов лет по сравнению с более точной наблюдательной величиной 13,8.

Что касается размера Вселенной, то мы знаем, что геометрически она плоская и, следовательно, бесконечная в соответствии с инфляционной парадигмой². На практике все обстоит несколько сложнее. Если мы хотим сейчас узнать, каков размер Вселенной, которую мы можем достичь, то должны помнить: чтобы наблюдать объект, мы должны получить его свет. Поскольку возраст Вселенной измерили как 13,8 миллиарда лет, объекты, которые мы можем наблюдать, не должны быть дальше, чем пространство, которое свет может преодолеть за это время.

Следовательно, есть *космологический горизонт*, дальше которого видеть мы не можем. *Наблюдаемая Вселенная* составляет лишь часть нашей Вселенной.

Поэтому, даже если Вселенная бесконечна, мы будем иметь доступ лишь к ее части, а размеры нашей Вселенной — это размеры наблюдаемой сегодня Вселенной, которая завтра станет больше. Ситуация похожа на положение моряка посреди океана. Обзор ограничен оке-

¹ В 2018 году космическая обсерватория Planck получила меньшую величину, ~ 67 км/с на мегапарсек.

² Стремительное расширение, имевшее место при происхождении времен, привело к тому, что Вселенная из субатомных размеров выросла до размера футбольного мяча. См. раздел «Тепловая история» в главе 2, а также Приложение А.

анским горизонтом. Если бы у моряка была возможность подняться над судном, горизонт бы отодвинулся, как отодвигается со временем горизонт Вселенной.

Для адекватной оценки размера Вселенной необходимо использовать общую теорию относительности. Согласно этой оценке размер видимой Вселенной примерно 46 миллиардов световых лет, или примерно в 20 000 раз больше, чем расстояние между нами и ближайшей галактикой, Андромедой.

В конечном итоге на вопрос «Как возникла Вселенная?», который волновал философов и ученых с начала времен, сегодня отвечает теория Большого взрыва: Вселенная была создана в сингулярности, которая создала не только материю, но и пространство, время и законы, которые управляют нашим космосом.

Очевидно, что космологи не сидят сложа руки и предлагают теории, альтернативные Большому взрыву. Как мы узнаем в последней главе, некоторые космологи убеждены в том, что Большой взрыв не соответствует началу, а лишь «переходная дверь» между двумя стадиями. Большой взрыв мог произойти после предшествующего *Большого хлопка*, за которым последовал *Большой отскок*, а за ним и новый взрыв. Сценарий может периодически повторяться, приводя к возникновению циклической вселенной. Еще один вариант, без сингулярности, основан на *теории струн*¹, физика которой не позволяет размерам Вселенной сжиматься до размеров меньших чем планковские размеры. По этой причине, когда сжатие достигает этого размера, Вселенная подвергается Большому хлопку. Даже в *петлевой квантовой теории (гравитации)*, которая пытается создать одну теорию из квантовой механики и общей теории относительности, Большого взрыва не существует.

Есть еще одна несингулярная модель, основанная на *M-теории*, которая объединяет пять разных теорий струн. Согласно *экспериментальной модели* (термин восходит к философии стоицизма, и его можно перевести как «трансформация в огонь» или «из огня») теории струн, нашу Вселенную можно найти на трехмерной *бране*, своего рода мембране, плавающей в многомерном пространстве. Большой взрыв мог произойти в результате столкновения нашей браны с другойбраной, единожды или циклически (см. раздел 10.5). И наконец, некоторые физики пытались и пытаются уничтожить сингулярность, а именно Большой взрыв.

¹ Как мы увидим в главе 7, теория струн предполагает, что частицы, составляющие Вселенную, сгенерированы колебанием крохотных струн.

Например, Стивен Хокинг предложил концепцию *мнимого времени*¹, которое ведет себя как четвертый пространственный размер. Используя его в космологии, можно отказаться от сингулярностей, например Большого взрыва. Если удалить сингулярности, Вселенная станет безграничной. Подробнее на эти темы мы поговорим в последней главе.

В заключение скажу следующее: хотя Большой взрыв и не единственная теория, которая описывает происхождение Вселенной, это единственная теория, подкрепленная большим объемом данных, наиболее признанная и популярная.

¹ Концепция мнимого времени связана с т.н. состоянием Хартла — Хокинга, волновой функции Вселенной, предложенной в качестве состояния перед Большим взрывом.

ГЛАВА 2

ИЗНАЧАЛЬНАЯ ВСЕЛЕННАЯ

Нет темноты, но есть невежество.

Вильям Шекспир

2.1. Перемотаем кинолентку назад

Сегодня мы можем сказать с достаточной долей уверенности: наша Вселенная зародилась 13,8 миллиарда лет тому назад и значительно отличалась от той, что мы сейчас знаем. Сегодня она расширяется со скоростью примерно 74 км/с/Мпк (определение мегапарсека, Мпк, см. врезку 1, Единицы расстояния в астрофизике). Если представить себе Вселенную как киноленту, то, отмотав ее назад, можно увидеть мысленным взором, как галактики меняют свое движение и начинают двигаться к некоей точке. Энергия фотонов пропорциональна длине их волны (см. врезку 2, Световой и электромагнитный спектр), то есть чем меньше длина волны, тем выше энергия. Поскольку длина волны *растягивается* в результате расширения и сжимается на стадии сжатия (см. врезку 3, Эффект Доплера), энергия фотонов, а также их температура увеличивается. А это значит, что в прошлом Вселенная была не только меньше, но и горячее. По мере углубления в прошлое температуры поднимаются все выше до таких значений, при которых материи, в том виде, как мы знаем ее сегодня, не существовало. Атомы обладают связующей энергией порядка нескольких десятков эВ (см. врезку 1, Единицы температуры и энергии), а молекулы – порядка миллионов эВ¹. При более высоких температурах атомы и молекулы не могли существовать как связанные объекты. Даже если мы сумели бы совершить путешествие к истокам Вселенной, то законы известной нам физики позволили бы нам понять Вселенную до масштабов выше планковских, примерно 10^{-35} м. Для меньших масштабов необходима теория, которой пока еще нет, а именно *квантовая гравитация*, которая

¹ В температурных единицах указанная энергия соответствует десяткам миллиардов градусов К (10^{10} К).

представляет собой сочетание теории гравитации и квантовой механики. На практике, даже если мы сумеем сформулировать эту теорию, то сможем понять Вселенную лишь с теоретической точки зрения, но не сможем наблюдать ее посредством электромагнитного излучения, поскольку с момента Большого взрыва до 380 000 лет материя во Вселенной была настолько плотной, что была полностью непрозрачной. Между нами и Большим взрывом стоит своего рода непроходимая стена. А начиная с планковской эпохи современная физика позволяет описать наиболее значительные стадии эволюции Вселенной. Сейчас мы об этом и поговорим.

2.2. Тепловая история

Примерно 14 миллиардов лет назад Вселенная имела бесконечно малые размеры и уже содержала всю материю и энергию, которая составляет ее сегодня. Согласно современной точке зрения, она возникла из ничего. Подобное мнение противоречит религиозным представлениям и здравому смыслу, согласно которому «из ничего не возникает ничего», как утверждал Парменид из Элеи еще в VI веке до Р.Х. На самом же деле, когда мы говорим «ничего», мы имеем в виду *квантовый вакуум* (см. врезку 5 и раздел 6.2).

Согласно современной физике, Вселенная могла возникнуть из ничего, поскольку ее энергия как сумма положительной энергии материи и отрицательной энергии гравитационных полей равна нулю! Это соответствует *инфляционной теории*¹, а также тому, что у Вселенной плоская геометрия. Вселенная возникла из ничего, где, я повторюсь, под «ничего» следует понимать *квантовый вакуум*. Эта сущность соответствует не традиционному понятию о пустоте как отсутствию всего, а минимальной энергии квантовых полей.

Для первых моментов после планковской эпохи (10^{-43} с) были характерны такие высокие давление, температура (10^{33} К [рис. 2.1]) и плотность (10^{96} г/см³), что пространство искажалось, складывалось и представляло собой туман из мини черных дыр и *кратовых нор* (вид гравитационных туннелей) размером порядка 10^{-35} м, температурой 10^{32} К и временем испарения порядка *планковского*. Космологический горизонт Вселенной был порядка 10^{-35} м.

¹ Стадия экспоненциального расширения Вселенной на ее начальном этапе (см. Приложение А).

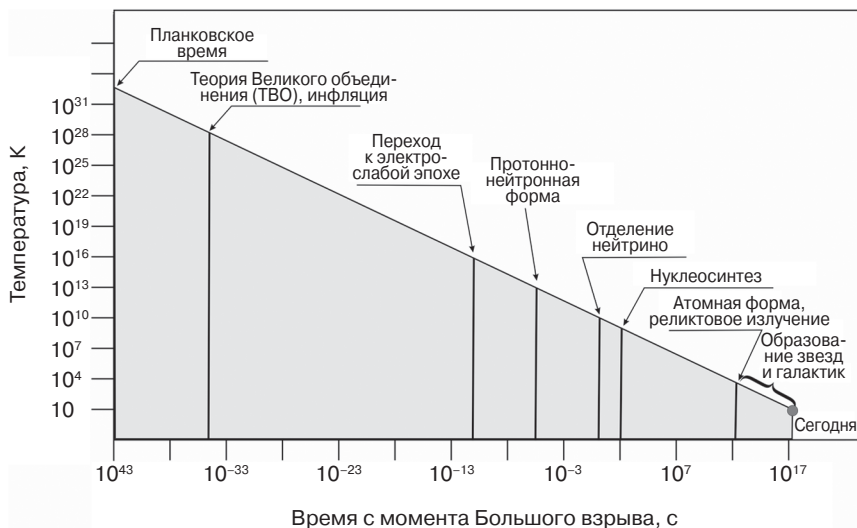


Рис. 2.1. Температура в изначальной Вселенной

Существуют такие экстремальные условия, которые нельзя воссоздать даже с помощью БАК, самого мощного ускорителя частиц в мире. Чтобы создать такие условия, согласно подсчетам Аарона Кошера и Шмуэля Нусинова¹, необходим огромный ускоритель от 30 парсек до 30 килопарсек, т.е. равный по размеру нашей Галактике. В современной Вселенной гравитация намного менее интенсивна по сравнению с другими силами. В космологических масштабах гравитация одерживает верх, и у нас есть для этого теория, общая теория относительности. В масштабе атома преобладают другие силы, и у нас есть другая теория, которая описывает мир, квантовая механика. На планковских масштабах гравитация становится сопоставимой по интенсивности со всеми другими взаимодействиями. Нам нужна теория, которая объединит квантовую механику и общую теорию относительности, *квантовая гравитация*, которая, как мы уже говорили, пока не сформулирована. Четыре силы природы объединились с помощью так называемых *X*- и *Y*-*бозонов* (см. врезку 4). Мы не можем проникнуть в тайны периода между Большим взрывом и *планковской эпохой* по той простой причине, что мы не знаем физику той эпохи.

Таким образом, наши теории дают нам возможность начать историю с начала планковской эпохи. Благодаря конечности скорости света на-

¹ <https://cds.cern.ch/record/290203/files/9510364.pdf>



блюдатель во время планковской эпохи не мог видеть дальше 10^{-35} м, что в 10^{20} меньше размера протона. Вселенной управляет квантовый вакуум (см. врезку 5), из которого создаются пары «частица — античастица», а потом, спустя кратчайшие промежутки времени, возвращаются в вакуум.

Врезка 4

Кратко: элементарные частицы и их взаимодействие

Сейчас мы вспомним некоторые понятия, имеющие отношение к частицам и элементарным силам, описанным в главе 6.

Спин. Спин ввели в 1925 году Сэмюэл Гаудсмит и Джордж Уленбек, чтобы объяснить предыдущие опыты. Они предположили, что электрон имеет *внутренний угловой момент*, то есть вращается вокруг своей собственной оси, как волчок. Даже если это представление не совсем корректно, им часто пользуются в литературе. Как показал Поль Дирак, в релятивистской версии квантовой механики спин появляется автоматически. Квантовое состояние частицы определяет ее квантовое число, равно как другие квантовые числа. Как мы увидим далее, величина спина частицы определяет, к какому семейству принадлежит конкретная частица.

Частицы делятся на две группы: *фермионы* и *бозоны*.

Фермионы — это частицы, которые составляют материю. Они характеризуются полуцелым спином: $1/2\hbar, 3/2\hbar, \dots$, где \hbar — это число, которое называют *приведенной постоянной Планка*.

Например: *кварки* (из которых состоят протоны и нейтроны), *электроны*, *мюоны*, *тау-частицы*, *нейтрино*.

Бозоны — частицы-переносчики взаимодействий. У них спин целый: $0\hbar, 1\hbar, 2\hbar, \dots$

Например: *фотоны*, W^+ , W^- , Z^0 *бозоны*, *глюоны*.

1. *Адроны* — это фермионы. Подвержены сильному ядерному взаимодействию и разделяются на

- *барионы*: подвержены сильному ядерному взаимодействию. Барионы не являются элементарными частицами, а состоят из элементарных частиц, кварков. Примеры барионов — это *протоны* и *нейтроны*. Вне ядра нейтроны нестабильны, в среднем живут примерно 15 минут. Протоны почти бессмертны: их продолжительность жизни 10^{34} лет, что намного больше, чем возраст самой Вселенной;

- *мезоны* — это бозоны, подверженные сильному ядерному взаимодействию. Состоят из кварка и антикварка.
2. *Лептоны* — это фермионы. Они не «ощущают» сильного взаимодействия, это элементарные частицы, и фермионы со спином $1/2$. Примеры этого семейства: заряженные частицы, как *электроны*, *мюоны*, *тау-частицы*, их соответствующие античастицы, а также *нейтрино*. Последние бывают трех видов (т.н. ароматов): *электронное*, *мюонное* и *тау-нейтрино*; могут осциллировать, т.е. преобразовываться друг в друга, в процессе *нейтринных осцилляций*.

В природе есть четыре разновидности *взаимодействия* или силы: *гравитационное*, *электромагнитное*, *сильное ядерное взаимодействие* и *слабое ядерное взаимодействие*. Стандартная модель физики элементарных частиц описывает только последние три.

- *Электромагнитная сила*: может притягивать и отталкивать, а ее интенсивность уменьшается пропорционально квадрату расстояния. Переносчиком электромагнитной силы является фотон.
- *Сильное ядерное взаимодействие*: его интенсивность возрастает по мере сокращения расстояния, и именно благодаря ему существует ядро атома. Радиус его действия порядка размера протона. Его переносчики — это восемь бозонов, т.н. *глюоны*.
- *Слабое ядерное взаимодействие*: отвечает за радиоактивный распад. У него три переносчика, бозоны W^+ , W^- , Z^0 . Слабое ядерное взаимодействие и электромагнитная сила — это проявления одной и той же силы, а именно *электрослабого взаимодействия*.
- *Гравитационная сила*: всегда притягивает. У нее есть теоретический переносчик, еще не обнаруженный: т.н. *гравитон*.
- *Бозон Хиггса* обеспечивает массой элементарные частицы, такие как электроны, кварки и бозоны W^+ , W^- , Z^0 .

Врезка 5

Квантовые флуктуации

В этой книге мы будем часто говорить о *квантовых флуктуациях*. Что же мы имеем в виду под этим термином?

Чтобы разобраться с этим понятием, познакомимся с *принципом неопределенности Гейзенберга* из квантовой механики, согласно которому некоторые физические величины, т.н. *сопряженные переменные*, такие как *энергия* и *время*, или *положение* и *импульс* (т.е. произведение массы на скорость), подвержены некоторой степени неопределенности. Другими словами, в физической системе, в отличие от классической физики, нельзя с бесконечной точностью одновременно определить все значения наблюдаемых физических объектов. Согласно принципу неопределенности Гейзенберга, чем точнее определено положение, тем меньше мы знаем об импульсе, то же самое относится и к паре энергия, E , и время, t . Важно иметь в виду, что принцип этот не зависит от точности экспериментов. Даже в идеальном и безупречном эксперименте остается неопределенность.

Поэтому мы не только не можем точно знать энергию системы в определенный момент времени, но если хотим точно определить энергию системы, нам понадобится бесконечное время. Следовательно, система не имеет определенной энергии во все времена, она меняется, постоянно колеблется, т.е. ее величина увеличивается и уменьшается по сравнению с тем, что мы ожидали, и все это на скорости, которую нельзя непосредственно измерить. Другими словами, сохранение энергии может быть нарушено, но лишь на очень краткие периоды времени: чем меньше энергии во флуктуации, тем дольше она будет продолжаться. Благодаря квантовой неопределенности из ничего возникают маленькие объемы энергии, при условии, что через непродолжительный период времени они исчезнут. Эта энергия может проявиться как пары частиц — античастиц, называемых *виртуальными частицами* с очень краткой продолжительностью жизни, например пара «электрон — позитрон». Таким образом, принцип неопределенности Гейзенберга объясняет то, что у более равномерного окружения обязательно есть квантовые неоднородности.

Что такое поле?

Как мы узнаем подробно в главе 6 (раздел 6.2), поле — это функция, определяющая значение каждой точки в пространстве. Например, значения температур, связанные с пространственными точками помещения, составляют поле, которое называют *скалярным полем*.

Набор векторов, которые описывают движение воздуха в помещении, составляет другое поле, *векторное*. Однако эти поля не являются фундаментальными, это характеристики воздуха.

Примерами фундаментальных полей являются *гравитационное* и *электромагнитное поля*. Названные поля являются классическими. Если мы приложим квантовую теорию к полям, результатом будет квантовое поле, подверженное законам квантовой механики. Например, *фотоны* связывают с *электромагнитным полем*. Точнее, *частицы — это ничто, а флуктуации в поле и сами поля — это настоящий строительный материал, кирпичики, из которых состоит Вселенная*. Более того, величины, определяющие квантовое поле, подвержены *флуктуациям* благодаря *принципу неопределенности*. Энергия в каждой точке постоянно колеблется, и в поле появляются и исчезают *виртуальные частицы*.

Квантовый вакуум

В физике каждая система имеет тенденцию к достижению состояния минимальной энергии. *Вакуум — это состояние минимальной энергии квантовой системы*. Вследствие вышеизложенного и принципа неопределенности вакуум — это своего рода море, полное виртуальных частиц, которые рождаются и уничтожаются в очень короткое время. Таким образом, самый пустой участок постоянно меняется. Более полное объяснение концепции поля приводится в разделе 6.2.

Затем следует *Век великого объединения*, он происходил в промежутке между 10^{-43} и 10^{-36} с. Согласно *теории Великого объединения* в начале этой эпохи гравитационная сила с помощью гипотетических бозонов *X* и *Y* отделилась от других сил. С расширением температура Вселенной уменьшалась, и на той стадии эволюции Вселенной уменьшение это было очень стремительным. Между *планковской эпохой* и концом эпохи Великого объединения температура упала до температур ниже 10^{30} К. В конце этой эпохи, когда температура достигла 10^{28} К, Вселенная претерпела *фазовый переход Великого объединения*, что привело к отсоединению сильного взаимодействия от электрослабой силы, в результате чего образовалось две отдельные силы. Некоторые разновидности фазовых переходов есть и в повседневной жизни. При температуре $100\text{ }^{\circ}\text{C}$ охлажденный водяной пар превращается в воду, а при температуре ниже $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ вода превращается

в лед. Во время этих трансформаций высвобождается т.н. *скрытое тепло*. Кроме того, мы переходим от систем с более высокой симметрией к системам с более низкой симметрией. Например, вода остается одной и той же, с какой бы стороны мы ее ни рассматривали, тогда как лед — это кристаллическая структура и в отличие от воды не является симметричным. В *инфляционной теории* Алана Гута переход к стадии Большого объединения привел к космологической инфляции, периоду экспоненциального расширения, о котором мы сейчас поговорим, а более подробно с ним можно ознакомиться в Приложении А. Благодаря фазовому переходу во Вселенной высвободилось огромное количество энергии, подобно тому, как это происходит при фазовом переходе воды в лед с высвобождением скрытого тепла, о чем мы упоминали выше. Благодаря инфляции, развившейся за период между 10^{-36} и 10^{-32} с, Вселенная субатомных размеров претерпела метаморфозу. Из размеров порядка 10^{-28} м она выросла в 10^{25} – 10^{30} раз (см. Приложение А), а может, и того больше. За бесконечно малый период времени Вселенная достигла размера футбольного мяча. Это огромное расширение вызвало падение температуры. Вселенная охладилась от 10^{27} до 10^{22} К, а потом снова нагрелась во время *стадии вторичного разогрева*. Высвобождение энергии вакуума преобразовало виртуальные частицы, которые появились и исчезли в планковское время, в частицы реальные. В последующих версиях инфляции, например инфляции Андрея Линде, расширение происходит в результате распада потенциальной энергии поля, т.н. *инфлатона* (см. врезку 5 и Приложение А). Вселенная наполнилась излучением и элементарными частицами: кварками, лептонами и их соответствующими античастицами. Эти события происходили между эпохой Большого объединения и «экстремально» продолжительной эпохой, называемой *электрослабой эпохой*, которая продолжалась в период между 10^{-36} с и 10^{-12} с.

Во время этой эпохи Вселенная изобиловала частицами и античастицами, которые начали сталкиваться и потом уничтожаться, оставляя излишек частиц материи, приведших впоследствии к образованию нашего мира. На самом деле можно было ожидать, что разрушатся все частицы и античастицы, но этого не случилось благодаря очень маленькой асимметрии между количеством частиц и античастиц (о чем мы скоро поговорим). В эту эпоху могли образоваться гипотетические компоненты холодной темной материи (например, *аксионы*). Некоторые физики-теоретики предположили, что произвело инфляцию *поле Хиггса*, скалярное поле (поле с нулевым спином), которое, взаимодействуя с такими элементарными частицами, как кварки, W^- , Z -частицы и лептоны, обеспечило ей массу (см. раздел 6.9 и Приложение В).

Инфляция — это особенно важная стадия в эволюции Вселенной. Несмотря на то что стадия эта еще мало изучена, о чем можно судить хотя бы по тому, что единой инфляционной теории нет, а есть несколько разных, она позволяет объяснить многие необъяснимые иным способом факты. Инфляция решает ряд задач в космологии Большого взрыва. Она объясняет однородность пространства, обеспечивает плоскостность Вселенной в соответствии с наблюдениями *космического микроволнового фонового излучения* (СМВ)¹ (о чем мы поговорим подробнее ниже) и способствует генерации мелких неоднородностей, из которых сформировались галактики². Наконец, она производит реликтовый гравитационно-волновой фон³, т.е. волны, производимые движением массивных тел (даже если у них нет заряда).

Мысль, что гравитационные волны могут возникать в результате квантовых флуктуаций (см. врезку 5) в расширяющейся Вселенной, высказал в 1975 году советский физик Леонид Гришук, в 1982 году к нему присоединились Валерий Рубаков, Михаил Сажин и Александр Веряскин, в 1983-м — Фаббри и Поллок, а в 1984 году — Лэрри Эббот и М. Уайз.

Наконец, в новых версиях инфляционной теории, например Линде, инфляция не только создает нашу Вселенную, но и бесконечное число других вселенных, т.н. *Мультимир* (см. главу 10 и Приложение А).

Хотя есть большая группа ученых-физиков, изучающих инфляцию, многие видные физики подвергают ее критике, в том числе Пол Стейнхардт, один из ее основателей. Как мы узнаем в заключительной главе, он предложил альтернативную модель Вселенной, *экспиротическую вселенную*, и назвал ее эволюцию *вселенная-феникс*.

Возвращаясь к нашей истории, в то время энергии были так высоки, что два фотона при столкновении образовывали частицы материи,

¹ Космическое фоновое излучение, как уже было сказано, это своего рода остаточное микроволновое море, которое заполняет Вселенную и сквозь небосвод достигает Земли.

² Технически речь идет о *начальном спектре возмущений*, создаваемых квантовыми флуктуациями (см. врезку 5).

³ Подобно заряженному телу, которое излучает электромагнитные волны, массивное тело излучает гравитационные волны. Эйнштейн предсказал их в 1916 году, а искали их десятилетиями и обнаружили лишь в 2015 году благодаря сотрудничеству международного научного сообщества LIGO (Лазерно-интерферометрическая гравитационно-волновая обсерватория) / Virgo (франко-итальянский детектор). Впервые были обнаружены две черные дыры, удаленные от нас на расстояние 1 миллиард и 300 миллионов световых лет, которые в танце, сначала медленном, а потом все более и более стремительном, пока он не достиг скорости, близкой к скорости света, слились, создав единую черную дыру (см. раздел 5.5).



которая уничтожала встречные частицы антиматерии. Короче говоря, был непрерывный поток создания и разрушения. В конце электрослабой эпохи бозоны W и Z (см. врезку 4) больше не создавались и быстро разрушались. Электрослабая ядерная сила стала силой малого диапазона, разделившись на электромагнитную и слабую. Вселенная претерпела второй фазовый переход. Этот переход обозначают термином *нарушение электрослабой симметрии*.

В первые доли секунды (10^{-12} с) Вселенная состояла из *плазмы кварков*, лептонов и глюонов, а ее размеры были примерно равны расстоянию от Земли до Солнца. Этот кварковый суп, т.н. *кварко-глюоновую плазму*, впервые наблюдали в 2002 году в Брукхейвенской национальной лаборатории. Со временем энергия кварков снизилась и примерно при 10^{-6} с, когда температура упала ниже 1000 миллиардов градусов, Вселенная была больше не в состоянии держать на расстоянии кварки, которые образовали *адроны*, большое семейство, содержащее *барионы* (например, протоны, нейтроны), содержащие нечетное число кварков, и *мезоны*, состоящие из двух кварков (см. раздел 6.9).

Протоны — это почти вечные частицы, а нейтроны разрушаются за 15 минут. Тем временем температура продолжала неумолимо падать. Эта эпоха называется *кварковой*. Продолжается она от одной тысячной одной миллиардной доли секунды до одной миллионной секунды (10^{-12} – 10^{-6} с).

Частицы и античастицы преобразовывались в фотоны, но фотоны уже не обладали достаточной энергией для образования пар античастиц. Во Вселенной доминировали фотоны, электроны, нейтрино и незначительная доля (один на 100 миллионов) протонов и нейтронов.

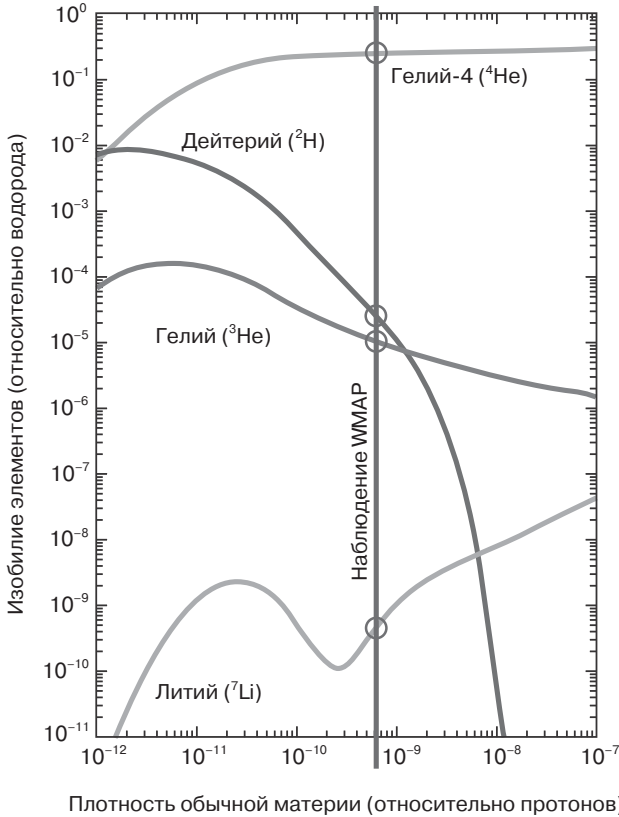
Когда температура опустилась ниже 10^{12} К, эта эпоха, т.н. *адронная* (10^{-6} – 1 с) (когда кварки были ограничены до образования адронов), завершилась. На смену ей пришла *лептонная эпоха* (1 с – 3 мин), где преобладали лептоны и антилептоны. Электроны и позитроны сталкивались и уничтожали зарождающиеся протоны, которые в свою очередь сталкивались, образуя другие пары электрон – позитрон. В результате понижения температуры и плотности понизились и скорости реакции с последующим отсоединением нейтрино, когда возраст Вселенной был равен одной секунде. После фотонов они были самой крупной популяцией во Вселенной. Они образовали фон, *космический нейтринный фон*, который так и не обнаружили, учитывая слабое взаимодействие нейтрино с материей. Электроны и позитроны разрушились, оставив лишь частицы материи.

Большой взрыв создал равный объем материи и антиматерии. Частицы материи и антиматерии возникли парами и имели одинаковую

массу, но противоположный заряд. Если они встретятся, то разрушатся, оставив после себя только энергию. Однако современная Вселенная, по-видимому, по большей части состоит из материи. Куда же девалась антиматерия?

Происхождение материи является одной из величайших тайн физики. Чтобы решить эту задачу, предполагается, что в количестве частиц материи и антиматерии есть незначительная асимметрия: один дополнительный барион на каждый миллиард антибарионов. Андрей Сахаров объяснил эту асимметрию, предложив три необходимых условия, которым должно удовлетворять каждое взаимодействие, в результате которого возникают барионы. В физике существуют разные величины, которые сохраняются, как и энергия, и среди них число барионов. Первое из допущений состоит в том, что это число не сохраняется. Второе заключается в том, что взаимодействия не происходят в условиях теплового равновесия, и в конечном итоге производство материи преобладает над производством антиматерии, т.е. нарушает симметрию заряда и четности, т.н. *CP-симметрию*, или *комбинированную четность*, которая состоит из двух законов симметрии: *симметрии C* (*C* – от англ. *charge*, *зарядовое сопряжение*) и *симметрии P* (*P* – от англ. *parity*, *четность*). *C-симметрия* имеет отношение к замене частицы античастицей, например, позитрон заменяется электроном. *P-симметрия* – это инверсия пространственных координат: (x, y, z) меняются на $(-x, -y, -z)$.

Возвращаясь к нашей истории, уничтожение большинства электронов имело большое воздействие на нейтроны. На самом деле, в адронную эпоху нейтроны не исчезли, поскольку образовались в результате слияния протонов и электронов, что и привело к появлению нейтрино. После уничтожения нейтронов протоны не могли производить нейтроны, и их число сократилось. Когда Вселенная была чуть старше 1 секунды, на каждые 10 протонов было всего 2 нейтрона. Нейтроны были чуть тяжелее протонов и распадались примерно за 15 минут. Когда температура была около 10^{10} К, нейтронов больше не создавалось, и соотношение «нейтрон – протон» остановилось на уровне 1 нейтрон на каждые 10 протонов. Благодаря распаду нейтронов, их число на отметке 300 секунд, когда температура упала до 10^9 К, уменьшилось до двух на каждые 14 протонов. Количество нейтронов и протонов было достаточно для образования одного ядра гелия-4, и оставалось 12 протонов на каждое ядро гелия-4. Поскольку ядро гелия в четыре раза тяжелее ядра водорода, фракция гелия-4 получалась в результате деления 4 на $12 + 4$ (16), и, таким образом, во Вселенной было примерно 25% гелия и 75% водорода.



NASA/WMAP Science Team
WMAP-101087

Element Abundance graphs: Steigman, Encyclopedia of Astronomy
and Astrophysics (Institute of Physics) December, 2000

Рис. 2.2. Относительное изобилие легких элементов в первичном нуклеосинтезе. С разрешения: NASA/WMAP Science Team

Подробнее, когда температура упала ниже нескольких миллиардов градусов, протоны и нейтроны создали устойчивые ядра, такие как дейтерий, который не обладает большой продолжительностью жизни. Все изменилось, когда Вселенной было примерно 3 минуты. Дейтерий больше не распадался, и образовались гелий-4, гелий-3 и литий-7. Итак, мы в эпохе нуклеосинтеза, в промежутке от 3 секунд до 20 минут. Как видно на рис. 2.2, изобилие водорода (75%) и гелия (25%) появилось в процессе нуклеосинтеза в зависимости от плотности протонов, нейтронов, а также излучения.

Эти величины подтвердились измерением изобилия образованных в то время элементов, которые остаются неизменными и по сей день, не-

смотря на трансформацию водорода в гелий в звездах. После 20 минут температура упала до точки, в которой термоядерная реакция прекращается.

Первые вычисления нуклеосинтеза относятся к 1948 году, когда Ральф Альфер и Георгий Гамов¹ опубликовали свою знаменитую статью « $\alpha\beta\gamma$ », по инициалам Альфера, Ганса Бете и Гамова. Ранее вычисления уже были опубликованы в диссертации Альфера, но Гамов счел необходимым дать им еще большую известность и опубликовал статью в журнале *Physical Review*. Со свойственным ему чувством юмора он добавил в авторов статьи Ганса Бете и вот по какой причине:

«Казалось несправедливым по отношению к греческому алфавиту подписать статью только Альферу и Гамову, поэтому при подготовке рукописи в печать добавили имя д-ра Ганса А. Бете (заочно). Д-р Бете, который получил один экземпляр рукописи, не имел ничего против и, кстати сказать, оказал помощь во время последующих обсуждений».

Бете был полностью согласен со статьей и внес свой вклад в статью, которая вышла в свет 1 апреля 1948 года.

Первичный нуклеосинтез производит лишь легкие элементы, до бериллия. Поскольку устойчивого ядра с 8 нуклеонами не существует, нуклеосинтез прекращается. Совместно с Альфером и Херманом, Гамов сделал важное предположение, что Вселенная погружена в микроволновое фоновое излучение с температурой 5 К. Хотя эта история малоизвестна, в 1950 году Альфер и Херман сумели уточнить это значение, получив величину 2,8 К, что на удивление близко к известному на данный момент результату (2,725 К). До 60-х годов прошлого века, пока Арно Пензиас и Роберт Вильсон случайно не обнаружили реликтовое излучение, об этом никто не вспоминал.

После эпохи нуклеосинтеза (от 3 минут до 240 000 лет) наступает *эпоха излучения* (или *радиационная эпоха*). Вселенная содержит плазму, своего

¹ Известный физик Георгий Гамов родился в Одессе. Будучи человеком всесторонним и наделенным большим чувством юмора, он занимался не только космологией и ядерной физикой, но и молекулярной биологией: Гамов внес свой вклад в расшифровку ДНК. В возрасте 18 лет поступил учиться в Новороссийский университет (ныне — Одесский национальный университет им. И.И. Мечникова), а потом в Ленинград (ныне Санкт-Петербург), где, совмещая учебу с работой, познакомился с Александром Фридманом. В 1928—1931 гг. учился в Копенгагене в Институте теоретической физики Нильса Бора, потом в Кавендишской лаборатории. После стажировки в Гёттингене, где он внес значительный вклад в ядерную физику, Гамов вернулся в Ленинград преподавать в университете, но в 1933 году эмигрировал в Америку. Гамов был также большим популяризатором науки.



рода раскаленный, непрозрачный суп из протонов и электронов. После уничтожения лептонов и антилептонов в энергии Вселенной преобладали фотоны, которые взаимодействовали с протонами и электронами. Из-за этих непрерывных реакций свет постоянно претерпевал отклонения и отражения и по этой причине застревал в плазме. Вселенная была непрозрачной и темной. Образно эту ситуацию можно представить себе так: представьте себе, что мы оказались в облаке или очень плотном тумане. Туман — это облако, состоящее из водяных и ледяных капель, которое образуется при контакте с землей. Если мы в автомобиле, свет фар не может свободно двигаться, поскольку фотоны в движении будут сталкиваться с каплями воды и отражаться по направлению другой капли и так далее, оставаясь в ловушке. Если количество капель уменьшится, фотоны будут двигаться свободнее, пока туман не рассеется, и они будут полностью свободны в движении. Так и происходило в следующий период, между 240 000 и 380 000 лет, который называют *эпохой рекомбинации/разделения*. По мере понижения температуры во Вселенной происходило примерно то же самое, что и при снижении плотности капелек тумана.

В 1967 году Яков Зельдович, Владимир Курт и Рашид Сюняев, а в 1968 году и Джим Пиблс исследовали физику рекомбинации. Первым элементом, который захватил электроны, был гелий. Первый электрон был схвачен, когда Вселенной было 18 000 лет, а второй в возрасте примерно 130 000 лет. Поскольку гелий содержит два протона, он стал нейтральным. Потом наступил черед водорода, который содержит всего один протон. За период между 260 000 и 380 000 лет (при температуре 3000 К) протоны захватили электроны и образовали нейтральные атомы. Это явление известно под названием *рекомбинация* (электронов и ядер), связанная с *разделением* излучения и материи. По мере уменьшения числа свободных электронов захваченные взаимодействием фотоны вместе с электронами стали свободно двигаться, достигли нас, и «туман», окутывавший Вселенную, рассеялся, и она стала прозрачной, и высвободился космический фон видимого света. Это реликтовое излучение благодаря расширению Вселенной теперь можно наблюдать в микроволнах и как фоновое микроволновое реликтовое излучение.

Высвобожденные во время рекомбинации фотоны были очень энергичными по сравнению с теми, которые мы наблюдаем сейчас, а их количество намного больше, чем число барионов. Сегодня число плотности фотонов примерно 413 на кубический сантиметр, а барионов в кубическом метре только $2,5 \times 10^{-7}$. Фотоны преобладают над барионами в числе, их соотношение порядка 6×10^{10} (несколько миллионов фотонов на каждый протон), и пропорция эта сохраняется до сих пор.

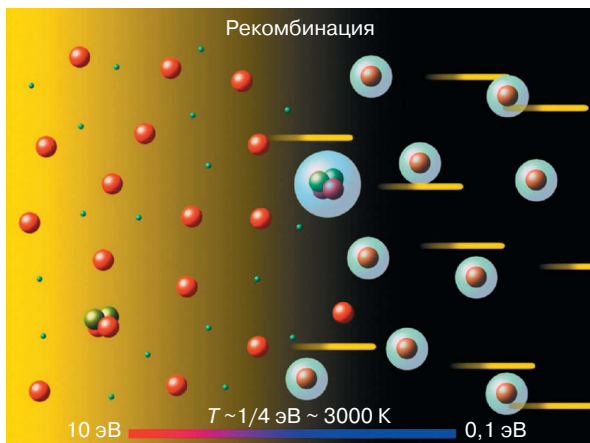


Рис. 2.3. Рекомбинация. Слева, когда температура была 10 эВ, протоны не были связаны с электронами, а при температуре 1/4 эВ образовывали атомы. С разрешения: W.H. Kinney, «Cosmology, Inflation and the Physics of Nothing»

Благодаря присутствию большого количества протонов, позже произошла рекомбинация, связанная с водородом. В сущности, электрон может соединиться с протоном, если его энергия меньше 13,6 эВ, что соответствует температуре 158 000 К. Это температура, при которой должна была происходить связанная с водородом рекомбинация. Вместо этого, благодаря большому числу присутствующих фотонов, рекомбинация произошла намного раньше, при температуре 3000 К. Во время рекомбинации не все электроны соединились с протонами. Примерно один из тысячи остался свободным. Фотоны и свободные электроны продолжали взаимодействовать примерно 9 миллионов лет, и до того времени их температуры оставались связанными. Это в значительной мере повлияло на формирование структур.

После образования атомов сотни тысяч лет практически ничего не происходило, кроме того, что Вселенная продолжала расширяться и, соответственно, охлаждаться.

2.3. Космическое фоновое излучение (реликтовое излучение)

По мере расширения Вселенной она охлаждалась, расширение «растягивало» длины волн, увеличивая их длину и уменьшая энергию.

Температура снижается обратно пропорционально размеру Вселенной, а длина волны фотонов увеличивается с размером Вселенной. По-

скольку энергия обратно пропорциональна длине волны, при удвоении размера Вселенной энергия фотонов уменьшится вдвое.

Расширение Вселенной со времени рекомбинации до сегодняшнего дня увеличило ее размер примерно в тысячу раз, подобным образом выросли и длины волн. Поэтому фотоны реликтового излучения сегодня в тысячу раз менее энергичны, чем во время рекомбинации. Подобным образом, температура от 3000 К опустилась на порядок 1000, достигнув значения 2,725 К, что соответствует длине волны 7,35 см и, следовательно, сегодня наблюдается в спектральном диапазоне микроволн. Излучение, температура которого одинакова по всем направлениям небосвода, называют *космическим фоновым излучением*, или реликтовым излучением (англ. CMB), и считают реликтовым остатком излучения, характерного для времени рекомбинации и самого Большого взрыва. Можно доказать, что значение температуры зависит от расстояния. Если рассматривать галактики ближе к рекомбинации, то температура реликтового излучения их окружения должна быть выше той, что мы измеряем. Эту температуру можно измерить с помощью цианогена (CN), который действует как микроволновый чувствительный термометр. На самом деле, его использовали, чтобы убедиться, что температура реликтового излучения на таких расстояниях выше, чем та, что у нас по соседству.

В 1965 году это излучение случайно обнаружили два инженера, Арно Пензиас и Роберт Вильсон, которые использовали телефонную антенну Белла, чтобы получить сигнал со спутника «Телстар».

Они обнаружили микроволновое излучение, которое не менялось в течение дня и не зависело от направления. Не имея преимущественного направления, оно не могло приходить ни из соседнего Нью-Йорка, ни от Солнца. Сначала исследователи подумали, что его производит некая интерференция или, как выразился Пензиас, «белый диэлектрический материал», то есть помет пары голубков, облюбовавших их антенну.

Они проконсультировались с Бернардом Берком, астрономом из Мичиганского технологического института, который знал про исследования Роберта Дикке и Джима Пиблса из Принстонского университета. Эти ученые планировали эксперимент по измерению фонового излучения, но их опередили два инженера. Пензиас и Вильсон опубликовали в журнале *Astrophysical Journal* небольшую статью с результатами своих наблюдений и в 1978 году получили Нобелевскую премию в области физики. В том же номере журнала, чуть ближе к началу, Дикке, Пиблс и их коллеги объяснили происхождение сигнала.

В то время ни Дикке, ни Пиблс не получили Нобелевской премии, а в 2019 году за вклад в космологию часть премии Нобеля получил Пиблс. Возвращаясь к нашей теме, это открытие, наряду с расширением Все-

ленной и избытком легких элементов в космосе, стало еще одним подтверждением и дополнением теории Большого взрыва. Это излучение было свидетельством тому, что Вселенная ранее была в горячей стадии, что подтверждало идеи де Ситтера, Леметра, Гамова и других ученых.

В 1969 году было обнаружено, что это фоновое излучение не является абсолютно изотропным. Есть одно направление, из которого протоны приходят с меньшей энергией и сдвинуты в красную сторону спектра, а в противоположную сторону приходят более энергичные протоны, сдвинутые в голубую часть спектра. Явление это, известное как *дипольная анизотропия*, говорит о том, что наша Галактика движется со скоростью несколько сотен километров в секунду относительно реликтового излучения, по направлению к созвездию Девы (рис. 2.4), также двигающемуся к сверхскоплению Гидра – Кентавр.

Это движение возбуждено большими скоплениями масс в окружающей среде в радиусе 6 миллиардов световых лет, где есть такие структуры, как *аттрактор Шепли*, *Великий аттрактор*, недавно обнаруженные структуры как *Сверхскопление Ланиакея* (от гавайского «неизмеримый рай»), состоящий из 100000 галактик и идентифицированный в 2014 году группой Брента Талли из Гавайского университета, и недавно обнаруженный *Дипольный отталкиватель*. Вычитая эффекты движения, можно восстановить однородность фонового излучения, за исключением «не-совершенств», произведенных излучением галактической плоскости.

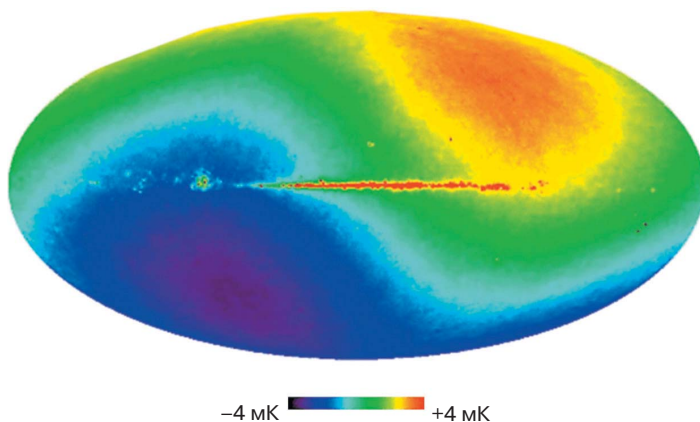


Рис. 2.4. Диполь реликтового излучения на карте небосвода в проекции Мольвейде, полученная космической обсерваторией WMAP. Цвета (фиолетовый, голубой, зеленый, желтый, оранжевый, красный) представляют аномальное отклонение от нижней до верхней температур. С разрешения: NASA/WMAP Science Team

Однако полностью однородное и изотропное излучение подразумевало бы невозможность образования космических структур, а следовательно, и самой жизни. По этой причине космологи начали подозревать, что должны быть и неоднородности. Их обнаружили в 1992 году¹ с помощью спутника — исследователя космического фона COBE во время эксперимента, проведенного Джорджем Смутом и Джоном Мазером, получившим за это открытие Нобелевскую премию в 2006 году. Наблюдения показали, что фоновое излучение изотропно до 1 доли на 100 000.

В 1990 году Мазер с помощью COBE также обнаружил, что это излучение было подобно излучению *черного тела*, т.е. идеального объекта, поглощающего все случайное излучение, не отражая его, при температуре 2,725 К (рис. 2.5). Это наблюдение подтвердило предсказание Ричарда Толмена, высказанное в 1934 году: излучение черного тела в расширяющейся Вселенной охлаждается, но остается той же формы (продолжает соответствовать распределению черного тела при различных температурах).

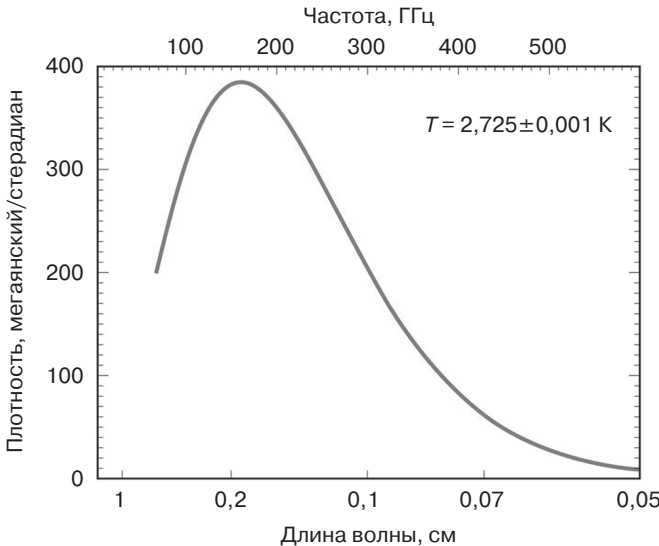


Рис. 2.5. Чернотельный спектр реликтового излучения. Кривая представляет теоретические прогнозы излучения черного тела. Экспериментальные данные полностью согласуются с этой кривой и не нанесены. С разрешения: NASA/WMAP Science Team

¹ Анизотропия космического микроволнового излучения была обнаружена в 1992 году советским космическим экспериментом «Реликт» на аппарате серии «Прогноз». — *Прим. науч. ред.*

Таким образом, форма спектра реликтового излучения, относящаяся к двум месяцам после Большого взрыва, остается неизменной по сегодняшней день.

Учитывая важность реликтового излучения, эксперименты проводились с целью измерения его характеристик с возрастающей степенью точности. Эксперименты проводились на воздушных шарах, например «BOOMERanG» (Balloon Observations Of Millimetric Extragalactic Radiation and Geomagnetism), или с помощью космических обсерваторий, например WMAP и Planck, что позволило еще более глубоко изучать анизотропию, т.н. *флуктуации плотности*, фонового излучения благодаря разнице температур. Начиная с 1997 года было проведено три суборбитальных полета на воздушном шаре, эксперимент «BOOMERanG». В 1997 году воздушный шар запустили в небо над Северной Америкой, а в 1998 и 2003 году – в небо Антарктики. С помощью полярного вихря шар отправился с антарктической базы Мак-Мердо, поднялся на высоту 42 км, чтобы уменьшить поглощение микроволн атмосферой Земли, и по замкнутой орбите, подобно бумерангу, вернулся в отправную точку. В результате эксперимента под руководством Паоло де Бернардиса и Эндрю Ланге получено фото высокого разрешения анизотропии реликтового излучения на части неба. Учитывая успех эксперимента, NASA в 2001 году осуществила космический полет космической обсерватории WMAP (Wilkinson Microwave Anisotropy Probe), а в 2009 году – космической обсерватории Planck совместно с ESA (Европейское космическое агентство).

С помощью этих обсерваторий составили карту фонового излучения, состоящую из оранжевых зон (теплее среднего) и голубых (холоднее среднего), изучив распределение температуры плазмы, из которой Вселенная состояла 380 000 лет после Большого взрыва (рис. 2.6). Карта отражает малые температурные изменения, исходящие от поверхности, где фотоны в последний раз взаимодействовали с электроном, т.н. *поверхность последнего рассеяния* (рис. 2.7), область изначальной Вселенной, в центре которой находимся мы, или, скорее, поверхность облака, из которой в последний раз рассеялся свет. Поскольку рекомбинация не была процессом мгновенным, необходимо представлять себе эту поверхность как сферическую оболочку толщиной примерно 30 000 световых лет.

Флуктуации изотропны до 1 доли в 100 000, и на карте (рис. 2.6) они видны, поскольку сильно увеличены. Самые горячие области на карте соответствуют самым плотным участкам, так что карта отражает еще и *флуктуации плотности* в ранней Вселенной, и ее можно считать фотографией Вселенной времени рекомбинации.

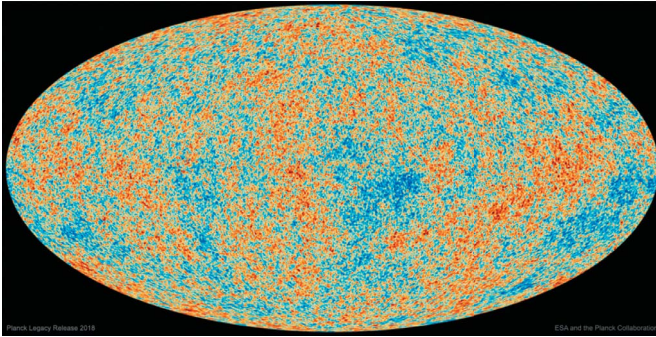
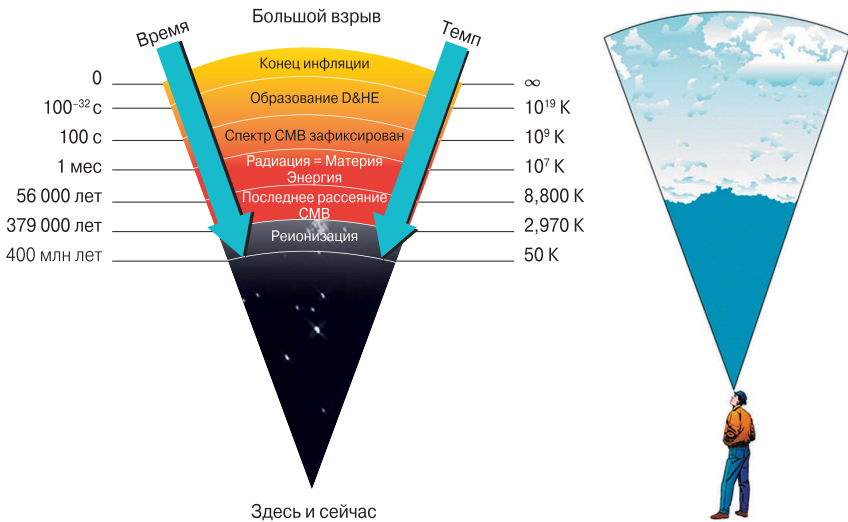


Рис. 2.6. Карта анизотропии реликтового излучения, полученная космической обсерваторией Planck. С разрешения: ESA и Planck Collaboration



«Поверхность последнего рассеяния» реликтового излучения аналогична свету, достигающему наших глаз сквозь облака в облачный день

Мы можем видеть лишь поверхность облака, где в последний раз рассеялся свет

Рис. 2.7. Аналогия между наблюдением в облачный день и пределами наблюдения в изначальной Вселенной. В облачный день мы не видим то, что спрятано за облаками. Подобным образом во Вселенной мы не можем видеть за поверхностью последнего рассеяния. С разрешения: NASA/WMAP Science Team

Масштаб и размеры этих флуктуаций определяют то, что представляет собой наша современная Вселенная. Флуктуации насыщены информацией относительно изначальной Вселенной, о чем мы поговорим в главе 4.

2.4. Темные века Вселенной

После рекомбинации Вселенная состояла из водорода, гелия, небольшого количества дейтерия и молекул водорода (H_2), образованных во время эпохи *нуклеосинтеза*. Благодаря расширению Вселенной фотоны реликтового излучения потеряли энергию, и длины волн сдвинулись к красному участку спектра, в результате чего Вселенная лишилась видимого света. Поскольку источников света, например звезд, еще не было, Вселенная была прозрачной, но темной. Этот период называется *темной эпохой*, и продолжался он в промежутке между 380 000 лет и образованием первых звезд, т.е. несколько сот миллионов лет после Большого взрыва.

Единственным источником фотонов были атомы водорода, излучавшие радиоволны с длиной волны 21 см, т.н. *линия водорода*, впервые обнаруженная в 1951 году Гарольдом Юэном и Эдвардом Перселлом. Эта линия имеет фундаментальное значение для отслеживания нейтрального водорода в космическом пространстве. Атомы водорода устойчивы, а изолированный нейтральный водород, как правило, не испускает излучение. Когда спины протона и электрона одинаково ориентированы, атом водорода находится в состоянии повышенной энергии, по сравнению с состоянием неодинаково ориентированных спинов.

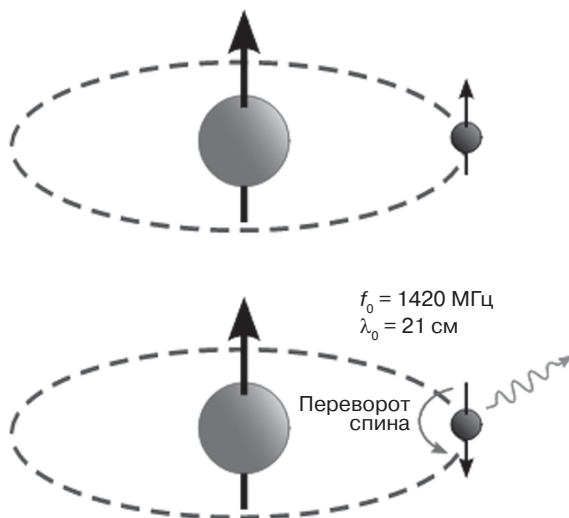


Рис. 2.8. Генерация линии нейтрального водорода с длиной волны 21 см. Линия возникает при переходе электрона между двумя уровнями состояния водорода на земле. С разрешения: Wikipedia

При переходе между этими состояниями нейтральный водород излучает фотон с длиной волны 21 см, что указывает, где расположен атом (рис. 2.8).

Теоретически эти фотоны можно увидеть с помощью радиотелескопов, но пока этого не случилось. Будь они обнаружены, это бы прояснило, как распределялась материя в темный век, как образовались изначальные звезды, а также роль рекомбинации в формировании галактик.

Точная продолжительность этой эпохи неизвестна, поскольку нет точного знания, когда образовались первые звезды. Как же можно примерно подсчитать время начала формирования звезд?

Чтобы решить этот вопрос, нужно воспользоваться *эффектом Ганна — Петерсона*. С его помощью можно определить время, когда Вселенную реионизировали звезды.

В 1965 году Джеймс Ганн и Брюс Петерсон предложили использовать квазары (очень древние, далекие и очень яркие галактики) с целью определения времени последних стадий реионизации. Согласно мнению этих двух ученых, нейтральный водород должен был произвести значительное подавление красного сдвига спектра квазара, на длинах волн меньше 121,6 нанометра¹.

То есть если квазар настолько далеко, что его излучение происходило в *темную эпоху*, нейтральный водород, который там присутствовал, поглотит его ультрафиолетовое излучение (УФ), чего не случится, если квазар находится ближе (рис. 2.9). На рис. 2.9 два квазара с разным красным смещением, т.е. на разных расстояниях и в разные эпохи. Как видно на нижней панели рисунка, у квазара на расстоянии² $z = 6,28$ (888 миллионов лет после Большого взрыва) есть поглощение, а у квазара на верхней панели, где $z = 5,99$ (944 миллиона лет после Большого взрыва), который к нам ближе, поглощения нет.

В 2001 году группа ученых под руководством Роберта Беккера подтвердила эффект Ганна — Петерсона, используя проект широкомасштабного астрономического исследования (Sloan Digital Sky Survey — Слоановский цифровой небесный обзор). Обнаруженное поглощение расположено в инфракрасной части спектра, из-за огромного удаления квазара. Другой метод, использованный для определения возраста рекомбинации, основан на анизотропии реликтового излучения. В 2001—2006 гг. благодаря исследованиям с помощью спутника WMAP выяснили, что реионизация началась

¹ Нанометр равен одной миллиардной доле метра.

² Здесь единицей расстояния выступает так называемое красное смещение z .

примерно 400 миллионов лет после Большого взрыва и продолжалась 400–500 миллионов лет, согласно исследованиям квазаров, т.е. 900 миллионов лет после Большого взрыва.

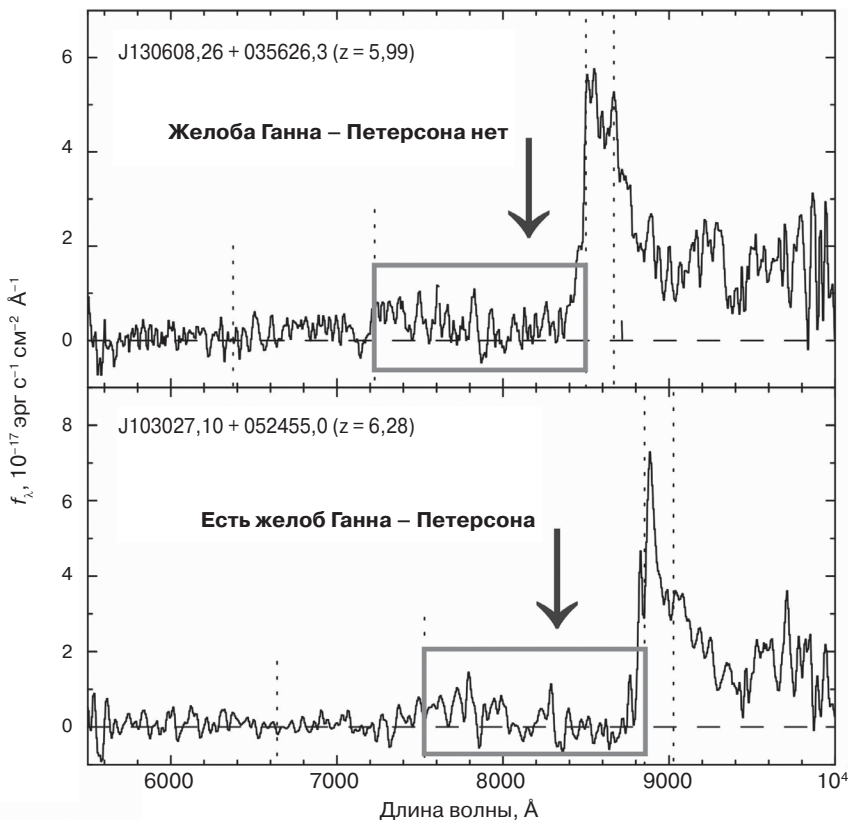


Рис. 2.9. Эффект Ганна – Петерсона. Квазар на верхней панели к нам ближе и поглощения нет, а на том, что внизу и от нас дальше, поглощение есть. С разрешения: Modification of work by Xiaohui Fan *et al.* (*The Astrophysical Journal*, 2006, 132, 117)

Таким образом, темная эпоха началась после рекомбинации, 380 000 лет, а закончилась через 300 миллионов лет после Большого взрыва, когда образовались первые звезды и галактики, в результате чего Вселенная реионизировалась, погружившись в темноту, примерно миллиард лет после Большого взрыва. Согласно результатам исследований на спут-

нике Планк, первые звезды образовались 300–400 миллионов лет после Большого взрыва, но большинство звезд родились 700 миллионов лет после Большого взрыва, несколько позже, чем думали ранее.

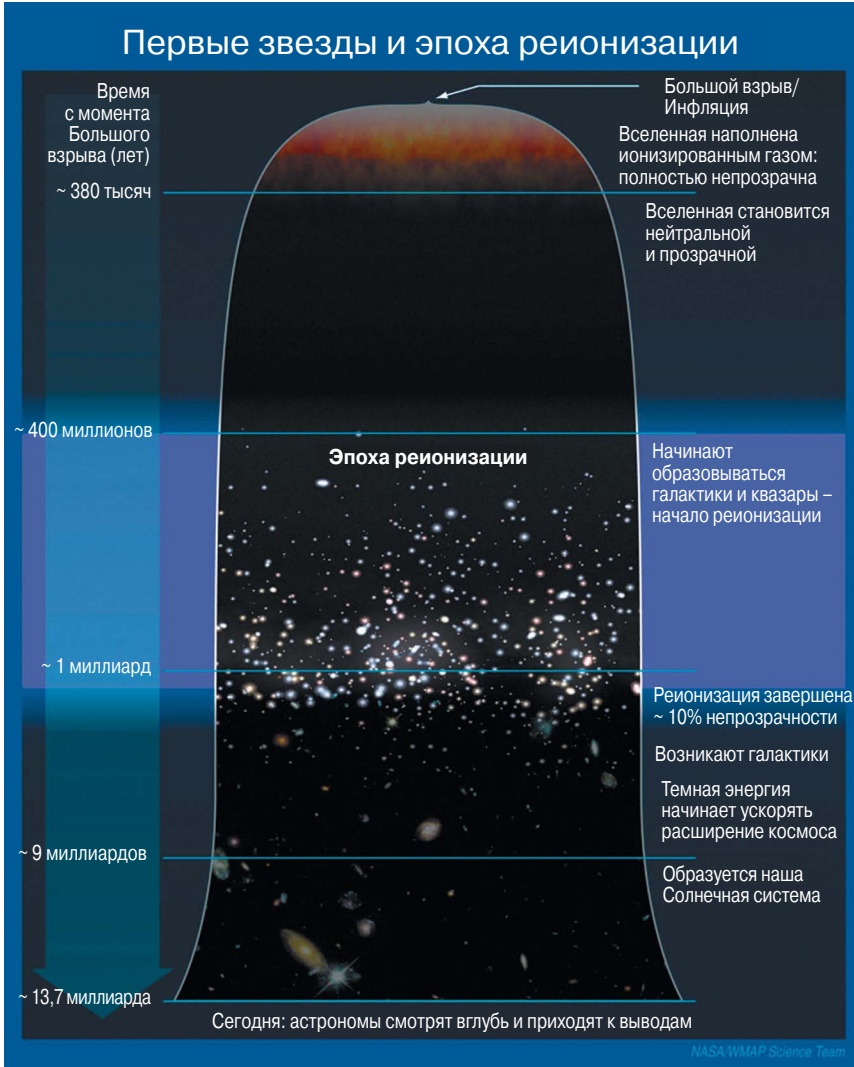


Рис. 2.10. Вселенная от рекомбинации до сегодняшних дней. С разрешения: NASA/WMAP Science Team

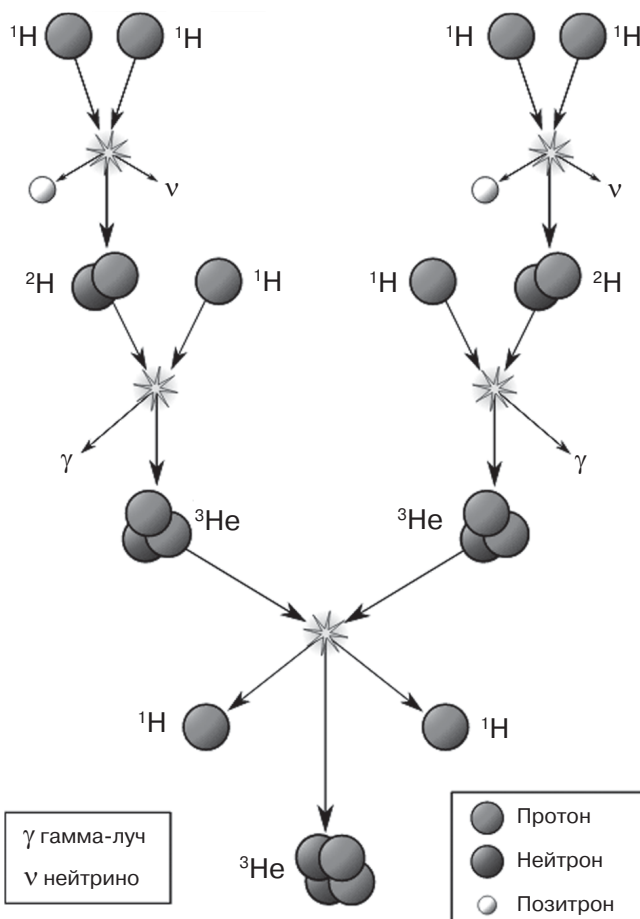


Рис. 2.11. Цепочка «протон – протон»: 4 протона образуют ядро гелия, ${}^4\text{He}$.
С разрешения: Wikipedia

2.5. Первые звезды

В темную эпоху Вселенная, пока ее не осветили первые звезды, была темной. Эти звезды, пока не обнаруженные, отличались от современных звезд. Во-первых, они были намного больше, чем сегодняшние звезды: в несколько сот раз больше, чем Солнце. Механизм, который производил энергию, был такой же, как и сейчас, термоядерная реакция, и в частности преобладающий механизм на Солнце: *цепочка «протон – протон»*, в которой четыре ядра водорода трансформировались в одно ядро гелия. Как видно на рис. 2.11, в результате соединения двух протонов получается

дейтерий, изотоп водорода¹. К ним добавляется один протон и образуется тритий, и высвобождается энергия. И наконец, соединяются два изотопа трития и из двух протонов и двух нейтронов образуется гелий. Масса ядра гелия меньше, чем сумма масс взаимодействующих ядер, четыре протона. Эта разница в массе, равная 0,7% оригинальной массы, согласно эквивалентности массы и энергии, открытой Эйнштейном, высвобождается в форме энергии, равной 26,73 МэВ. Эта энергия равнозначна энергии, получаемой при сгорании примерно 11 тонн угля.

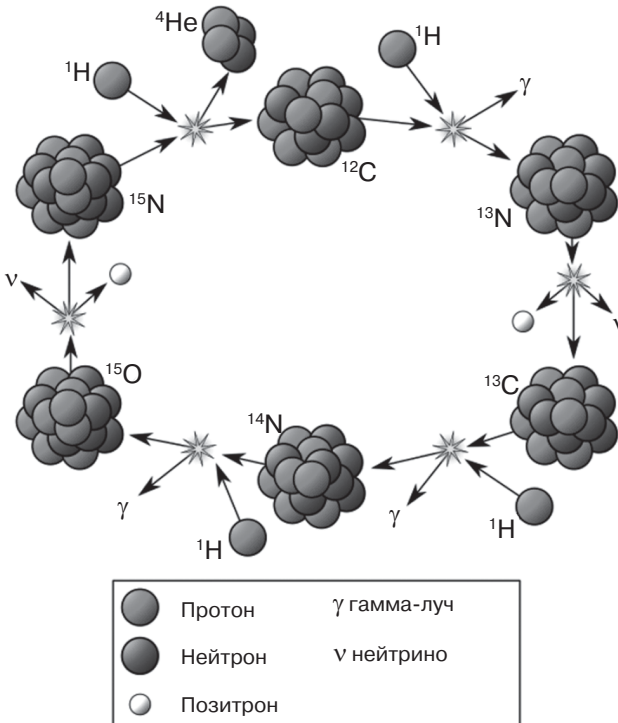


Рис. 2.12. Углеродный цикл. Образование гелия, ^4He , с «помощью» углерода, азота и кислорода. С разрешения: Wikipedia

В звездах массивнее Солнца происходит другой процесс, в котором четыре протона образуют атом гелия с помощью углерода, азота и кислорода (рис. 2.12), называемый *углеродный цикл*. Из-за отсутствия тяжелых

¹ Изотопы – это атомы, у которых равное число протонов, но разное число нейтронов. Например, в ядре водорода только один протон, в его изотопе дейтерии один протон и один нейтрон, а у трития два нейтрона и один протон.

элементов, таких как углерод, в изначальных звездах углеродного цикла быть не могло. Более того, если бы в первых звездах такой механизм работал, то ядерные процессы были бы очень быстрыми, а их продолжительность жизни очень короткой. С цепочкой «протон – протон» их жизнь чуть длиннее, примерно 10 миллионов лет, в любом случае очень короткий срок по сравнению с продолжительностью жизни такой звезды, как Солнце, которая живет 10 миллиардов лет.

Более того, эти звезды, образовавшиеся из газа, который наполнял Вселенную, а именно водород и гелий, состояли только из этих элементов. Во время их жизненного цикла они производили элементы тяжелее водорода, а когда взрывались как *сверхновые с парной нестабильностью*¹, разбрасывали их в космосе. Дочери этих звезд образовывались из остатков изначальных звезд и содержали, кроме водорода и гелия, следы более тяжелых элементов. Изначальные звезды, т.н. *звезды III популяции*, за сто миллионов лет высвободили значительное количество ультрафиолетового (УФ) излучения, которое ионизировало газ. Вселенная снова стала непрозрачной. Расширение Вселенной разбавило плотность плазмы, пока фотоны снова не стали свободно двигаться во Вселенной. Таким образом, Вселенная не единожды была в ситуации «да будет свет!»: во время Большого взрыва, после рекомбинации, и наконец – в конце реионизации.

2.6. Первые галактики и структура Вселенной

После образования звезд сформировались такие структуры, как галактики. Подробнее с некоторыми аспектами этой темы можно ознакомиться в Приложении Б. А сейчас мы просто дадим вам представление о формировании галактик и структур в целом, что схематически показано на рис. 2.13.

В темные века, которые мы сейчас рассматриваем, как и в остальной истории космоса, расширяющаяся Вселенная содержала газ, состоящий из легких элементов и темной материи, которой было несоизмеримо больше, чем газа. Что же случилось с газом и темной материей, которые были во Вселенной? В изначальной Вселенной можно найти более плотные области. Эти области своего рода зародыши, из которых образовались структуры во Вселенной. Большое содержание массы в указанных областях создавало большую гравитацию по отношению к соседним областям, таким образом преодолевая расширение Вселенной.

¹ Они являются сверхновыми благодаря производству пар «электрон – позитрон».

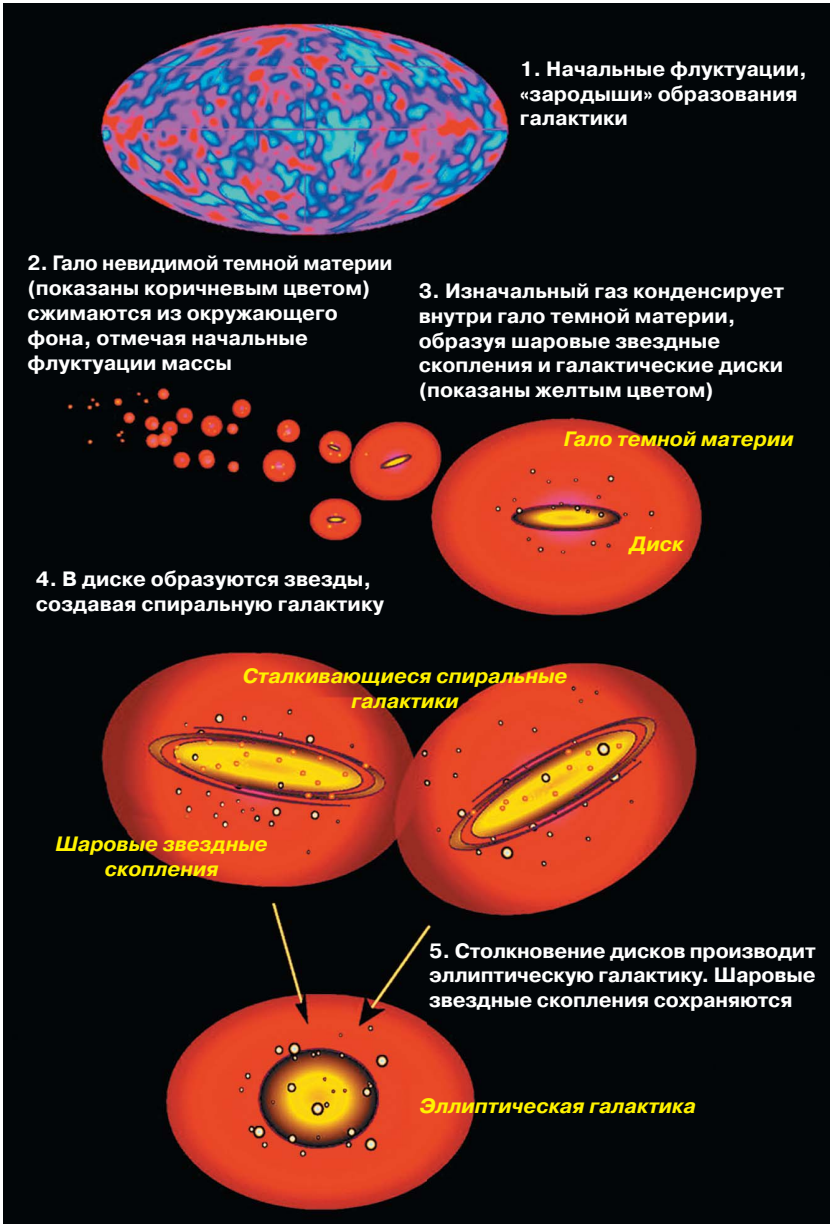


Рис. 2.13. Схема образования спиральных и эллиптических галактик, начиная с флуктуаций в изначальной плотности. С разрешения: Modification of work by Roberto G. Abraham and Sidney van den Bergh (*Science*, 2001, 293, 1273–1278)

В конечном итоге эти скопления массы, состоящие в основном из темной материи, могли сжаться и образовать т.н. *гало темной материи*. Согласно подсчетам, первые из образовавшихся гало могли иметь массу намного меньше Солнца, и последние наблюдения с помощью телескопа «Хаббл» выявили сгустки размером 10^{-5} темного гало нашей Вселенной. Гравитация помогла им расти, вбирая материю из окружающей среды, и сегодня самые крупные гало имеют массу, равную 1 миллиону миллиардов Солнц ($10^{15} M_{\odot}$).

Потом темная материя сформировала темные структуры, гало, которые с точки зрения гравитации вели себя как своего рода колодцы, в которые позже попал газ, в результате чего появились видимые объекты — галактики. Темная материя сформировала свои невидимые объекты раньше барионов, поскольку она не подвержена воздействию фотонов. В случае с обычной материей, до рекомбинации фотоны не позволяли атомам формироваться. После рекомбинации обычная материя в форме газа начала притягиваться к этим «колодцам», образованным темной материей, и освещала их. Так появились галактики. У первых образовавшихся галактик была неправильная форма. Путем агрегирования они образовали спиральные галактики. В результате столкновения спиральных галактик появились эллиптические галактики.

Образование и эволюция галактик отлично иллюстрирует изображение с глубокого снимка неба, сделанного телескопом «Хаббл» (HDF — Hubble Deep Field), содержащее 10 000 галактик и полученное с помощью 800 экспозиций. Оно позволяет нам взглянуть на Вселенную от сегодняшнего дня до 13 миллиардов лет назад. В 2012 году опубликовали еще одно изображение HDF, соединив 10 лет фотографий участка, полученных с помощью космического телескопа «Хаббл». Новая версия, XDF (eXtreme Deep Field — сверхглубокое поле), представленное на рис. 2.14, дает самое глубокое изображение неба, что позволяет нам заглянуть вглубь времен на 13,2 миллиарда лет. Это изображение показывает, как в результате столкновений и слияний галактик возникают стремительно растущие галактики. Видны размытые «пушистые» красные галактики, остатки драматических столкновений между галактиками. Видны рассеянные крошечные и слабые галактики, более удаленные от нас, чем красные, составляющие зародыши, из которых родились сегодняшние галактики. Самые молодые галактики в этом XDF образовались всего 450 миллионов лет после Большого взрыва. Изображение на рис. 2.14 подтверждает *иерархическую модель* формирования структур во Вселенной. Образование структуры начинается с меньших объектов и, путем агрегирования, образует большие объекты путем их слияния.

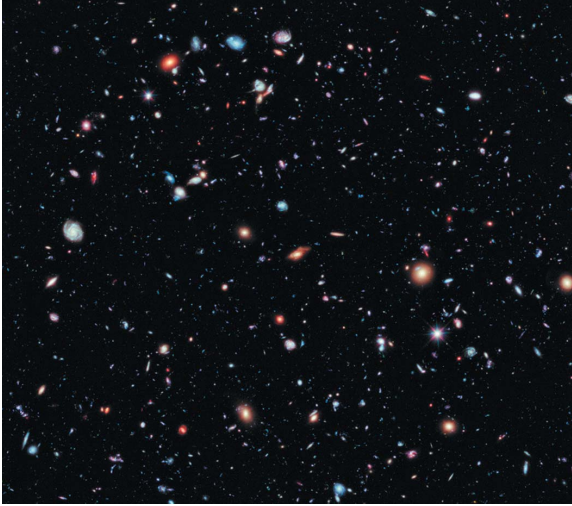


Рис. 2.14. Изображение XDF. С разрешения: NASA, ESA, G. Illingworth, D. Magee, and P. Oesch (University of California, Santa Cruz), R. Bouwens (Leiden University), and the HUDF09 Team

Спиральные галактики состоят из молодых звезд (миллионы лет) и газа, структурированного в диск со спиральными рукавами, сферическую центральную часть, т.н. *балдж*, содержащую более старые звезды (миллиарды лет). Размер звездного распределения, в средней спирали, порядка десятков килопарсеков. Средние эллиптические галактики содержат мало газа и имеют сферическую форму, со звездной массой порядка 10^{12} солнечной массы, в десятки раз больше, чем спиральные. Существуют *карликовые сфероидальные* и *неправильные галактики*, формы которых не так четко определены. Галактики имеют тенденцию скапливаться. Наша Галактика расположена в местной группе размером 1–2 Мпк, состоящей из трех основных галактик – нашей, Андромеды и Треугольника, и примерно 70 карликовых галактик. Большие группы галактик называются *кластерами*, или скоплениями; они содержат тысячи галактик размерами примерно 10 мегапарсек и солнечной массой порядка 10^{14} – 10^{15} .

Существуют и еще более крупные скопления – т.н. *суперкластеры*, или сверхскопления размером в сотню парсеков. Есть также сферические области с маленьким числом галактик, т.н. *пустоты*, или войды, размером 10–100 Мпк. Крупномасштабная структура Вселенной состоит из *филаментов*, или *нитей*, и *стен*. Кластеры образуются на пересечении нитей. В целом все это напоминает своеобразную *космическую паутину*, как видно на компьютерной модели на рис. 2.15.

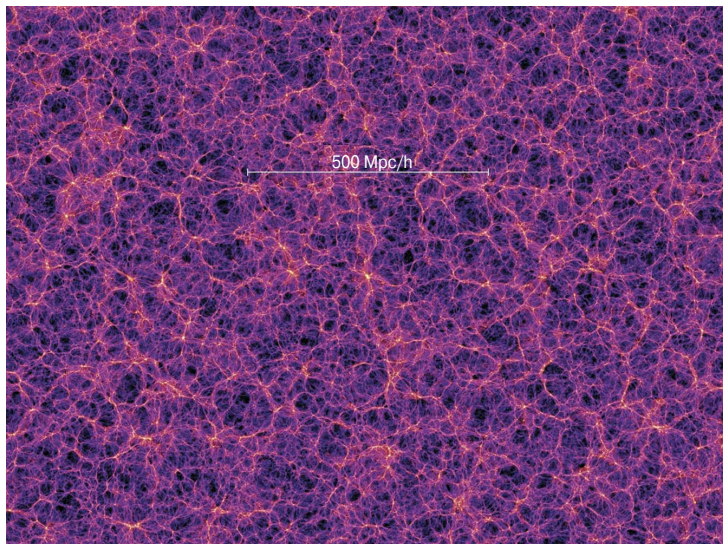


Рис. 2.15. Наверху: модель крупномасштабной структуры Вселенной. С разрешения: Millennium Simulation Project. Внизу: распределение сверхскоплений и пустот во Вселенной. С разрешения: R. Powell (<http://www.atlasoftheuniverse.com/nearsc.html>)

На нижней панели рис. 2.15 показана Вселенная на сотни миллионов световых лет. Все группы белых точек с названиями голубым цветом это сверхскопления, темные области с красными названиями – это *пустоты*. Мы находимся в *скоплении Девы* в центре карты. Строением *крупномасштабная структура* нашей Вселенной напоминает губку.

ГЛАВА 3

ОТКУДА МЫ ЗНАЕМ, ЧТО ТЕМНАЯ МАТЕРИЯ СУЩЕСТВУЕТ?

Самое важное не видно глазу.
Антуан де Сент-Экзюпери

3.1. Астрономия невидимого

Самая яркая звезда на небосводе — это Сириус. Она движется не по прямой линии, а петляет по спирали. Согласно законам Ньютона это говорит о том, что у нее есть спутник, увидеть который не так просто, во всяком случае, с помощью техники времен Фридриха Вильгельма Бесселя — великого немецкого математика и астронома. Подобно Сириусу, Бессель пришел в астрономию не прямым путем. Поскольку у него были трудности с латынью (со временем он изучил ее так досконально, что стал преподавателем), он пошел работать в торговый дом помощником бухгалтера, а по ночам изучал географию. Позже Бессель стал помощником капитана по обслуживанию грузов и заинтересовался определением местоположения судна в открытом море, что в конечном итоге привело его к астрономии. Ему удалось определить расстояние до звезды β 1 в созвездии Лебеда, вычислить орбиту кометы Галлея, а в 1844 году, изучив движение Проциона и Сириуса, он понял, что у этих звезд есть невидимые спутники. Он назвал это исследование *астрономией невидимого*, очень современное определение: по сути исследование астрофизиками темной материи есть не что иное, как астрономия невидимого. Через несколько лет были обнаружены спутники Сириуса и Проциона: первый в 1862 году наблюдал Элван Грэхэм Кларк и его отец, Элван Кларк, а второй — в 1896 году Джон Шеберле. Однако успех не всегда имеет отношение к мастерству, надежным моделям и, как в случае с Бесселем, к интерпретациям, но также и к удаче. В качестве примера можно привести открытие Плутона. Казалось, что движению Урана и Нептуна мешает некий внешний объект, который потом Персиваль Лоуэлл назовет планетой X. В 1830 году Клайд Томбо открыл планету X, названную Плутоном, практически в том самом

месте, которое прогнозировали по расчетам. Но это было всего лишь совпадение, поскольку, как мы знаем теперь, Плутон никоим образом не возмущает движение Урана и Нептуна, учитывая его небольшой размер, который определили в 1989 году в результате полета *Voyager-2*. История ошибок, связанных с астрономией невидимого, продолжилась с Меркурием. Урбен Лаверье обратил внимание на аномалии орбиты – прецессию перигелия Меркурия в 574 угловые секунды на сто лет¹ (рис. 3.1). Если вычтешь 531 угловую секунду в результате возмущений, создаваемых другими планетами, останется 43 угловые секунды. Лаверье считал, что это говорит о том, что некая планета движется между Солнцем и Меркурием, и этой планете дали название *Вулкан*. Связанная с этой гипотетической планетой абсурдная ситуация заключается в том, что в 1878 году Джеймс Уотсон и Льюис Свифт заявили, что во время солнечного затмения наблюдали Вулкан, однако, поскольку его на самом деле не существует, другие наблюдения это не подтвердили.

Вопрос этот решился лишь в 1915 году, когда Эйнштейн применил общую теорию относительности к расчету орбиты Меркурия.

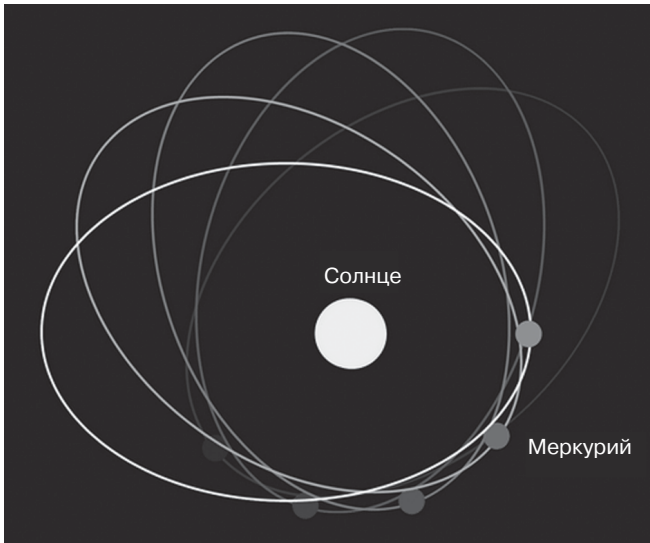


Рис. 3.1. Прецессия перигелия Меркурия. С разрешения: Wikipedia, Rainer Zenz

¹ Перигелий Меркурия (максимальное расстояние от Солнца) не зафиксирован в пространстве, для него характерна прецессия, т.е. он меняет свое положение.

В результате получаются точно 43 угловые секунды, недостающие в предсказании теории Ньютона. Другие планеты Солнечной системы также имеют небольшие прецессии, объясняемые общей теорией относительности¹.

Это расхождение между теорией и наблюдениями проливает свет на один важный момент: аномальное движение объекта, например планеты или целой галактики, можно объяснить двумя причинами:

- наличием невидимых масс, т.е. наличием *темной материи*,
- изменением теории гравитации.

Все это актуально и сегодня. Часть научного сообщества считает, что темная материя существует; другая придерживается мнения, что ее не существует, а теория гравитации, которой мы пользуемся, не верна. В результате возник целый ряд *теорий модифицированной гравитации*.

В астрономии невидимого есть и другие объекты, которые возможно сосчитать, а именно *черные дыры*. Первым над существованием столь массивных объектов, от которых не может убежать даже свет, задумался Джон Митчелл, а сам термин *черные дыры* ввел Джон Арчибальд Уилер.

Существует и другое представление о природе темной материи: она возникла из темных туманностей. Одним из первых, кто затронул эту тему во второй половине XIX века, был преподобный Анджело Секки. Наблюдение темных пространств в полях, плотно заселенных звездами, истолковывали двумя способами: как поля с небольшим числом звезд или как массы, поглощающие свет.

Проблему *недостающей материи* можно считать проблемой не обнаруженных звезд и планет. Наблюдая астрофизические системы, например галактики или скопления галактик, мы наблюдаем аномалии в скоростях звезд в галактиках или галактик в скоплениях, которые слишком высоки по сравнению с той, что позволяет масса объекта. Эти аномалии объясняются большим содержанием невидимого материала во Вселенной или допущением, что наше знание законов тяготения неверно.

¹ Среди многих странностей, подготовленных судьбой относительно общей теории относительности, есть одна совершенно особенная. В первой неудачной попытке проверить эту теорию во время солнечного затмения 1914 года в Крыму, экспедиция во главе с астрономом Эрвином Фройндлихом (другом Эйнштейна) познакомилась с аргентинскими астрономами, приехавшими в Крым наблюдать то же солнечное затмение для того, чтобы обнаружить Вулкан.

3.2. Первые слабые свидетельства

Звезды нашей Галактики, расположенные на ее диске, движутся примерно по круговым орбитам. На самом деле наблюдаемое движение состоит из трех колебательных движений в направлении, перпендикулярном плоскости, а также в ортогональных к ней направлениях. Если же смотреть на Галактику с ребра, то звезды движутся то вверх, то вниз, как лошадка-качалка.

Очевидно, что большее количество локальной массы произведет на звезды более сильную силу притяжения, и, следовательно, амплитуда звездных колебаний будет ниже. Таким образом, исследование звездной динамики позволяет установить содержание локальной массы. Одним из первых астрономов, кто занимался проблемой локальной плотности, был лорд (Уильям Томсон) Кельвин, считавший, что звезды ведут себя как частицы в газе. Анри Пуанкаре на основании результатов Кельвина пришел к выводу, что количество темной материи (этот термин ввел именно он: *matière obscure* на французском) должно быть меньше или того же порядка, что и обычной. Якобус Корнелиус Каптейн использовал свою модель Млечного Пути, сейчас известную как Вселенная Каптейна, вместе с вертикальным движением звезд в галактике, и пришел к выводу, что количество темной материи должно быть низким. К таким же выводам пришел и Эрнст Эпик, а повторный анализ результатов Каптейна, проведенный Джеймсом Джинсом, привел к следующим выводам: звездное движение требует массы большей, чем наблюдаемая. Эти выводы подтвердил ученик Каптейна — Ян Оорт. Он наблюдал вертикальные движения звезд и заметил, что они быстрее, чем можно было предположить, допустив, что распределение массы равно распределению видимой массы. Он определил величину суммарной массы рядом с Солнцем, а также предел темной материи в галактическом диске, т.н. предел Оорта. Изучение количества темной материи в галактическом диске по-прежнему представляет собой актуальный вопрос, поскольку эта величина необходима для проведения экспериментов по обнаружению темной материи.

3.3. Сколько весит скопление галактик?

Важный шаг на пути изучения темной материи сделал в 30-е годы прошлого века Фриц Цвикки. Родился он в Варне, отец его был родом из Швейцарии, а прославился он не столько своими научными открытиями, как бы важны они ни были, сколько своим неуживчивым характером. Совместно с Вальтером Бааде он ввел термин *сверхновая*, а также предпо-

ложил, что нейтронные звезды образуются во время коллапса этих звезд. Цвикки также принадлежит гипотеза о том, что *космические лучи* могут быть результатом взрыва сверхновой, и он же предложил использовать объекты тяжелее звезд для того, чтобы подтвердить предсказанный общей теорией относительности *эффект гравитационной линзы* (мы поговорим о нем чуть позже).

Что касается темной материи, то в работах 1933 и 1937 гг. Цвикки исследовал собственную скорость галактик в скоплении *Волосы Вероники* и использовал ее для определения массы, из которой состоит скопление.

Структура скопления определяется балансом между энергией, связанной с движением галактик, т.е. кинетической энергией, и гравитационной силой. Если кинетическая энергия больше гравитационной, то галактики разбегаются из скопления, а если гравитационная энергия больше кинетической, галактики падают к центру скопления. Устойчивое скопление требует равновесия кинетической и гравитационной энергии, что технически называют *теоремой о вириале*.

Изучая движение галактик в скоплении, Цвикки определил их массу и выяснил с помощью теоремы о вириале, что величины значительно выше предполагаемых. Он пришел к следующему выводу: чтобы галактики не разбежались из скопления, количество массы должно быть в сотни раз больше, чем наблюдаемые. Цвикки назвал невидимую материю *dunkle materie*, что на немецком означает *темная материя*. На протяжении 40 лет этот результат игнорировали, и не только этот. В статье 1937 года Цвикки воспользовался оценкой Хаббла и Хьюмасаона для определения параметра Хаббла, который получился равным 558 км/с/Мпк (намного выше используемой сегодня величины ~ 67 км/с/Мпк, которую определили с помощью космической обсерватории Planck, и ~ 74 км/с/Мпк, определенную с помощью космического телескопа «Хаббл»). В результате была проведена переоценка темной материи в скоплении, однако это не повлияло на результат Цвикки.

Этот метод использовали для большого числа скоплений, что подтвердило предыдущие результаты. Как уже упоминалось, из-за неуживчивости Цвикки его теории не нашли поддержки у коллег, которых он называл «сферическими негодьями», т.е. негодьями с любой точки наблюдения.

Через несколько лет Синклер Смит, изучая скопление Девы, подтвердил результат Цвикки и предположил, что недостающая масса состоит из «межгалактической материи». Следующие годы прошли в затяжных спорах между сторонниками и противниками существования темной материи. Считалось, что есть другое, менее экзотичное объяснение тому, что умозаключил Цвикки. Более того, в случае со скоплением Волосы Вероники

не было достоверно известно, достаточно ли старое это скопление, чтобы быть в равновесии, и приложима ли к нему теорема о вириале.

3.4. Андромеда и темная материя

Аргумент в пользу существования темной материи, отличный от предыдущих, высказали Франц Даниэль Кан и Лодевик Вольтер. Используя наблюдения линии с длиной волны 21 см, было обнаружено, что Андромеда и наша Галактика, в отличие от других галактик, сближаются со скоростью 125 км/с. Поскольку эти две галактики являются частью гравитационно связанной системы, с помощью кеплеровой динамики эти двое определили массу системы¹, которая оказалась в 20 раз больше суммы масс звезд двух галактик: $M > 2 \times 10^{12} M_{\odot}$. Согласно современному знанию, этот аргумент четко показывает, что галактики погружены в гало темной материи. Кан и Вольтер считали, что излишек массы состоял из ионизированного межгалактического газа.

Хотя аргумент и был корректным, прямым и несложным, статья Кана и Вольтера не возымела большого влияния, подобно статьям Цвикки 1933 и 1937 годов, вероятно, благодаря отсутствию системы для интерпретации наблюдений суммарной массы столь большой для системы Андромеда – Млечный Путь.

3.5. Вращение галактик

Локальное распределение массы спиральной галактики можно определить, используя вертикальные движения звезд, а также круговые движения звезд на галактическом диске. Как вертикальное, так и круговое движение звезд характеризует скорость, которая зависит от массы внутри звездной орбиты. Скорость звезды в зависимости от расстояния до центра галактики называется *кривой вращения*. Исследование кругового движения звезд в галактиках начал в 1939 году Хорес Уэлкам Бэбкок, заметивший, что звезды во внешней части Андромеды двигаются с неожиданно большой скоростью. Рост кривой вращения на больших расстояниях от центра привел к мысли, что во внешних частях галактики существует большое количество материи, однако интерпретация Бэбкока исключала возможность связи с темной материей.

¹ Эту массу можно определить, если известны расстояние и скорость сближения, предположив, что орбитальный период меньше, чем возраст Вселенной и радиальная траектория.

Ранее Кнут Эмиль Лундмарк получил для некоторых галактик высокие значения отношения массы и яркости, что свидетельствует о наличии избытка массы. Эрик Хольмберг истолковывал эти результаты как следствие поглощения света темной материей. Он сделал ошибочный вывод, что с учетом полученных Лундмарком значений, результаты снизятся до типовых.

Хотя обсуждаемые исследования (Цвикки, Кана и Вольгера) явно свидетельствуют о том, что скопления и галактики содержат массу бóльшую, чем видимая, ситуация прояснилась лишь в 70-е годы прошлого столетия. Пионерами в этом стали Вера Рубин¹ и ее коллега Кент Форд. Они приступили к исследованию Андромеды в 1970 году. Благодаря вращательному движению звезд в диске, их свет при приближении к наблюдателю сдвигается в голубую часть спектра, а свет удаляющихся звезд претерпевает красный сдвиг, благодаря известному эффекту Доплера (см. врезку 3). Изменение длины световой волны пропорционально скорости источника. Таким образом, стало возможным определить скорости вращения в разных местах диска. Как и в случае с траекториями планет, Рубин и Форд ожидали увеличения скорости вращения до максимума и, следовательно, при удалении от центра снижение скорости, т.н. *кеплеровское падение*.

То, что они наблюдали, стало полной неожиданностью: скорость вращения звезд на больших расстояниях от центра не уменьшалась, а была подобна скоростям звезд, ближайших к центру (рис. 3.2). Кривая вращения имела плоскую структуру.

Это казалось чрезвычайно странным, поскольку при движении от центра звездная масса уменьшалась, а вместе с ней должна была снижаться и скорость вращения.

Плоская структура кривых вращения галактик является сильным доказательством в пользу существования темной материи. Если скорость вращения постоянна, подразумевается, что масса должна расти вместе с радиусом, как видно по сплошной линии в левой панели рис. 3.3, за

¹ Вера Рубин увлеклась астрономией с раннего возраста. Из окна своей комнаты, выходящей на север (Вашингтон, федеральный округ Колумбия), она часто смотрела на звездное небо. Окончив колледж, она не смогла продолжить учебу в Гарварде: в то время и вплоть до 1975 года женщин туда не принимали. Она продолжила обучение в Корнелльском университете, где училась с такими известными физиками, как Ричард Фейнман и Ганс Бете. Вера Рубин стала докторантом в Университете Джорджтауна, где ее научным руководителем был еще один известный физик — Георгий Гамов. Она стала заниматься наукой в Институте Карнеги в Вашингтоне и там вместе с Кентом Фордом начала свои наблюдения.

точкой, где свет звезд больше не наблюдается. Более того, это подразумевает, что галактика должна быть внутри огромной области невидимой материи (рис. 3.3, правая панель) – огромное количество массы, которую мы не наблюдаем.

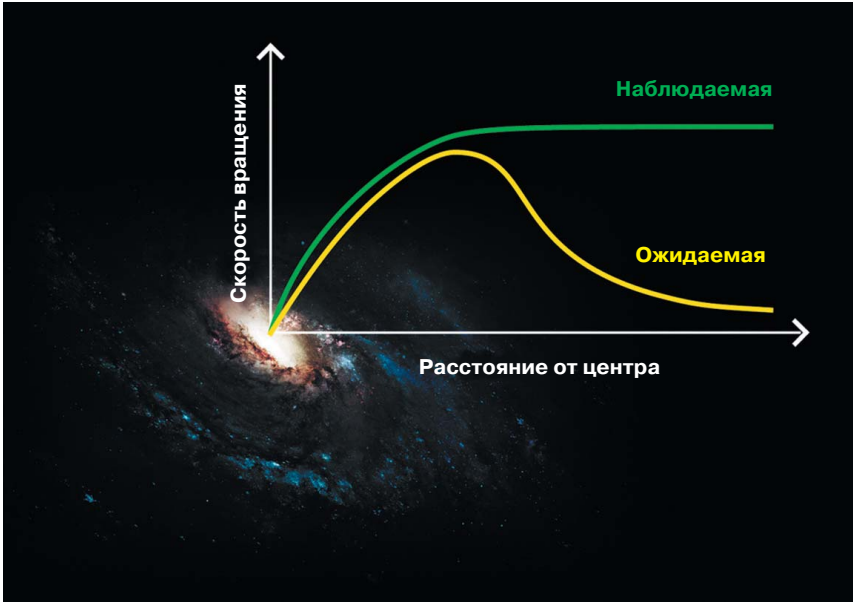


Рис. 3.2. Типичная кривая вращения галактики

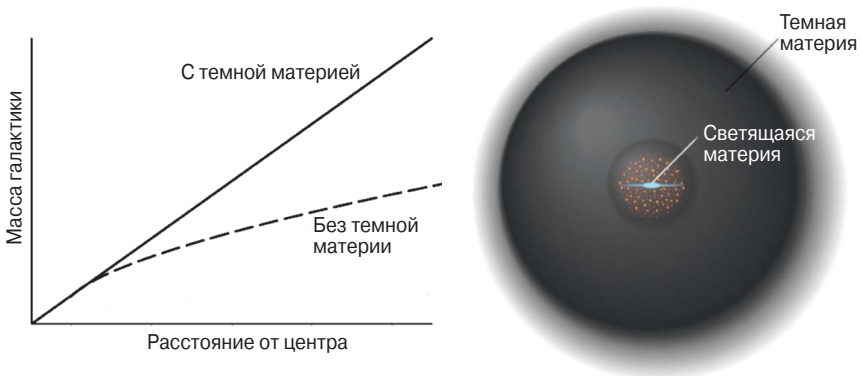


Рис. 3.3. Слева: масса, прогнозируемая кривой вращения (сплошная линия). Ожидаемая масса в системе, состоящей только из звезд и газа (пунктирная линия). Справа: галактика в центре темного гало материи. С разрешения: Modification of work by Infn/Internosei

Наблюдения косвенным образом говорят о том, что должно существовать большое количество невидимой материи. Как же она распределяется? Приблизительное представление можно составить, если вспомнить, что говорит ньютоновская механика: постоянная скорость вращения подразумевает линейный рост массы вместе с расстоянием от центра галактики. Другими словами, масса должна быть пропорциональна радиусу (см. рис. 3.3, левая панель). Поскольку плотность обратно пропорциональна кубу расстояния и пропорциональна массе, а масса пропорциональна расстоянию, можно сделать вывод: плотность обратно пропорциональна квадрату расстояния. Это значит, что галактика погружена в сферическое распределение темной материи, которое называют гало темной материи (рис. 3.3, правая сторона). Более точные модели показывают, что гало имеет форму эллипса.

Некоторые авторы пришли к более простым выводам (например, Кен Фриман, Мортон Робертс). В 1974 году две группы во главе с Яном Эйнасто и Джереми Острайкером заявили в двух важных публикациях, что массу галактик занижали на десять порядков. По их мнению, в излишке материи должен быть газ из внешней части галактик. Результат относительно избытка массы подтвердили и другие исследования. В частности, в 1978 году исследование Альберта Босма показало, что с помощью наблюдений за радиоволнами можно получить плоские кривые вращения на значительно больших расстояниях по сравнению с теми, что исследованы в оптическом диапазоне. Более того, было видно, что масса продолжает расти далеко за пределом области, занятой звездами и газом. Рубин, Форд и Тоннард не увидели ожидаемого спада в кривых вращения, даже изучая галактики вплоть до максимально наблюдаемого оптического расстояния. Это было так странно и неожиданно, что в последующие годы даже в шутку говорили о *заговоре диска-гало*. Как будто это диск и гало договорились сгенерировать плоскую кривую вращения.

Кривые вращения являются важным косвенным свидетельством существования темной материи, а также показывают, как она распределяется в галактиках. Обычная материя преобладает во внутренней части галактики, до нескольких килопарсеков, а удаляясь от центра, примерно при 10 килопарсеках, начинает преобладать темная материя. Эту тенденцию проще обнаружить в спиральных галактиках с помощью нейтрального водорода в качестве трассировщика скорости, т.е. 21-сантиметровой линии, что аналогично тому, что происходит и в скоплениях галактик. В целом, есть увеличение количества темной материи, которая переходит от галактик в скопления, где содержание материи на 95% состоит из темной материи.

Для полной картины вспомним еще одно доказательство в пользу существования темной материи, приведенное в исследовании 1973 года Пиблса и Острайкера, которые с помощью новаторского моделирования показали, что для стабилизации структуры дисков спиральных галактик необходимо наличие массивных гало вокруг галактик.

3.6. Радиография галактик

Еще одно доказательство в пользу существования темной материи было получено при обнаружении излучения в рентгеновском диапазоне от раскаленного газа (от 10 до 10 миллионов градусов), который есть в эллиптических галактиках и скоплениях. Скопление Девы, расположенное примерно в 60 миллионах световых лет от нас, содержит около тысячи галактик, в том числе M87, гигантскую эллиптическую галактику в центре скопления. Рентгеновское излучение из этой галактики было обнаружено в 1966 году, а через несколько лет подобное излучение было замечено и в скоплениях Волосы Вероники (рис. 3.4) и Персея. Обнаруженный газ находится в состоянии гидростатического равновесия, т.е. частицы, составляющие скопление, движутся в гравитационном поле скопления со скоростями, соответствующими притяжению его массы.



Рис. 3.4. Рентгеновское излучение в скоплении Волосы Вероники.
Источник: изображение получено с помощью телескопа «Чандра». С разрешения: X-ray: NASA/CXC/University of Chicago, I. Zhuravleva *et al.* Optical: SDSS

Зная температуру и плотность газа, можно определить распределение массы в этих скоплениях. Эти величины можно определить с помощью телескопов, которые наблюдают рентгеновское излучение из этого скопления, что и было сделано с помощью зонд-спутника «Эйнштейн» (а позже и других спутников). В скоплениях газ попадает в гравитационную ловушку. Однако в одиночку сгенерированная звездами гравитация не в состоянии захватить газ. Чтобы не дать газу улечься, необходимо огромное количество невидимой массы — темной материи. Полученные результаты подтвердили предыдущие расчеты, произведенные Цвикки и другими астрономами на основании теоремы о вириале. Результаты наблюдения раскаленного газа привели к следующему заключению: примерно 5% массы состоит из галактик, 15% из газа, и 80% из невидимой материи. Эта материя не является межзвездным материалом, который, хотя он и невидим в оптическом диапазоне, можно наблюдать с помощью инфракрасных телескопов, но является особенной материей, которую ни в какой телескоп нельзя непосредственно наблюдать.

3.7. Игра света

Свет — это волна, производимая колебаниями электромагнитного поля. В безвоздушном пространстве и при отсутствии масс свет движется прямыми путями, называемыми лучами. Как все мы знаем из ежедневного опыта, если смотреть на чайную ложку в стакане воды, то кажется, что она разделена на две части: над водой и под водой. *Рефракция* — это отклонение лучей при прохождении от воздуха к воде или вообще от одной среды к другой. В соответствии с *принципом Ферма*, сформулированным известным математиком XVII века, во время движения между двумя точками свет следует путем наименьшего времени. Используя этот принцип, Пьер де Ферма сумел определить закон преломления, известный как *закон Снеллиуса — Декарта*. Поскольку в воздухе свет движется быстрее, чем в воде, согласно теореме Ферма траектория его не является прямой, и при выходе из воды луч наклонен иначе, чем в воде. Разница в угле наклона двух лучей зависит от коэффициента преломления, т.е. отношения скорости света в безвоздушном пространстве и скорости в какой-либо среде. Поведение света подобно поведению спасателя на пляже, который пытается спасти тонущего. Зная, что на суше он перемещается быстрее, чем в воде, он выберет более длинную траекторию по берегу, чтобы выиграть время, следуя *кривой скорейшего спуска (брахистохроме)*, т.е. минимальному по времени пути (красная кривая на рис. 3.5).

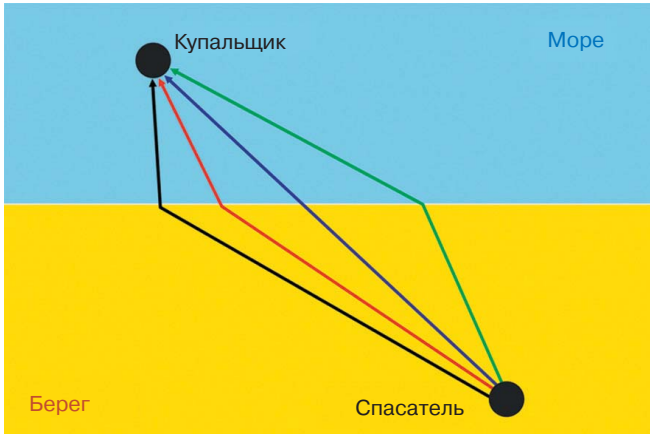


Рис. 3.5. Красная кривая – это траектория спасателя, который пытается спасти купальщика

Подобным образом, если свет движется между двумя точками с разной температурой, а значит, и с разной плотностью, он движется по кривой. Как показал Эйнштейн, при наличии масс то, что происходит в среде, например в воде или воздухе, может произойти и в безвоздушном пространстве.

3.8. Космические миражи

В механике Ньютона время и пространство есть две абсолютных величины, жесткие и неизменные. Начиная с 1907 года, в течение неполных восьми лет, Эйнштейн методом проб и ошибок вывел уравнения гравитационного поля и в ноябре 1915 года представил их Прусской академии наук. Отправным пунктом пути, который привел Эйнштейна к его теории, был *принцип эквивалентности*, который сам Эйнштейн считает своим самым счастливым открытием. Принцип этот заключается в том, что вокруг любой точки всегда можно найти систему отсчета, в которой благодаря гравитационному полю эффект ускорения равен нулю. Вот что писал по этому поводу Эйнштейн:

«Во время работы над заключительной частью общей теории относительности (в 1907 году)... мне пришла в голову самая счастливая в моей жизни мысль... Для наблюдателя при свободном падении с крыши во время падения, во всяком случае в непосредственной близости от него, гравитационного поля не существует».

Историю, рассказанную Эйнштейном, переделали в анекдот: С крыши падал маляр, и именно он и поведал Эйнштейну, что ощутил в этот момент, будто бы плывет в воздухе.

Отсутствие гравитации, характерное для безвоздушного пространства, можно создать в самолете. На рис. 3.6 показана траектория самолета А300 Европейского космического агентства. Двигаясь по параболическим траекториям, на некоторых участках самолет преодолевает силу тяготения.

Эйнштейн использовал этот принцип как проводник в своих поисках уравнений поля.

Как сказал Макс Борн, одно из революционных следствий теории Эйнштейна — это «удивительнейшее сочетание философской глубины, физической интуиции и математического таланта»; Лев Ландау назвал ее «одной из красивейших научных теорий», где пространство и время не являются отдельными и неизменными, как полагал Ньютон, а объединены в одно целое. Они образуют четырехмерное пространство — время, состоящее из трех пространственных координат и одной координаты времени, которое ведет себя как пластичная система. Все это зависит от массы (и скорости). Чем больше гравитационный потенциал, тем медленнее течет время.

Для того, кто живет на уровне моря, время течет медленнее, чем для того, кто живет на горе Эверест, поскольку гравитационное поле сильнее по мере приближения к центру Земли. Разница во времени, учитывая человеческую жизнь целиком, несколько миллиардных секунды. Разница становится заметной, если мы наблюдаем космонавта, который приближается к *горизонту событий* черной дыры, т.е. точке невозврата. Когда космонавт соприкасается с горизонтом событий, с нашей точки зрения время замирает. Пространство демонстрирует ту же эластичность. В одной известной аналогии, пространство — время описывают как растянутый резиновый лист. Помещенный на лист объект деформирует его, образуя углубление (рис. 3.7).

Теоретически световые лучи, как материальные тела, двигаются по траекториям, называемым *геодезическими линиями*, совпадающими с прямыми линиями только в пустом пространстве.

В общей теории относительности движение Луны вокруг Земли вызывает не моментальная сила притяжения (действие на расстоянии между двумя объектами), как представлял себе Ньютон, а деформация пространства — времени, которую вызывает Земля (рис. 3.8).

Приведенная аналогия с резиновым листом не совершенна. Во-первых, у листа всего два измерения, тогда как у пространства — времени их четыре, а у пространства — три. Деформируется все пространство вокруг Земли.

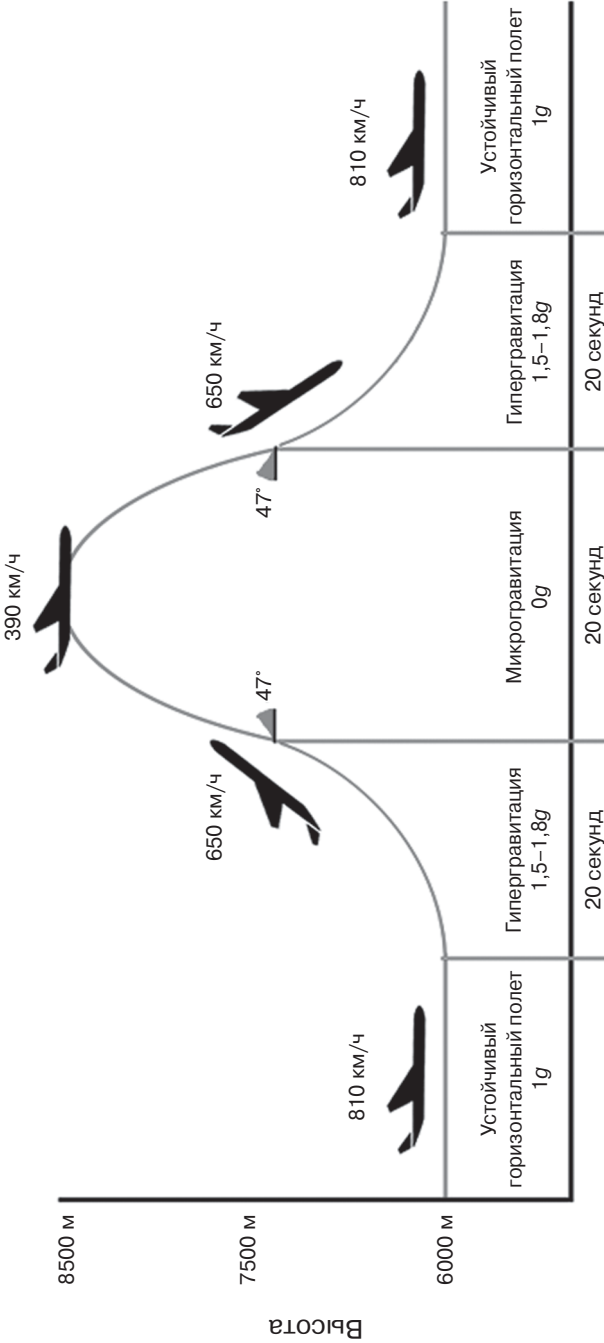


Рис. 3.6. Траектория авиалайнера ESA A300 может сымитировать нулевую гравитацию. В первой части траектории, слева, самолет движется горизонтально и на него действует обычная сила тяжести. Потом он ускоряется и поднимается вверх, и на него действует ускорение в 1,5–1,8 раза больше, чем на земле. В средней части траектории в течение 20 секунд самолет достигает состояния невесомости. С разрешения: Luigi Pizzimenti (<https://www.altrimondi.org/il-volo-a-zero-g-dellesa/>)

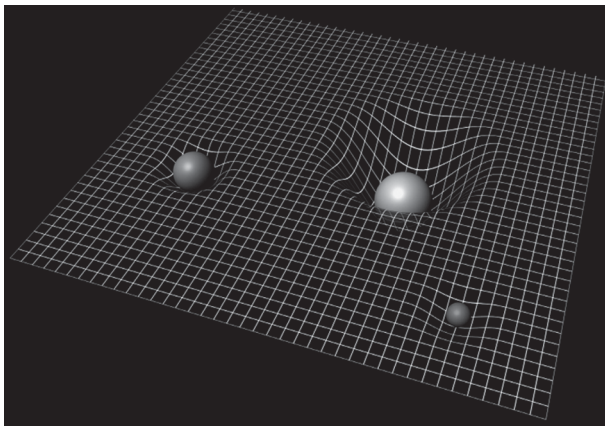


Рис. 3.7. Массы, деформирующие пространство – время. *Источник:* ESA – С. Carreau

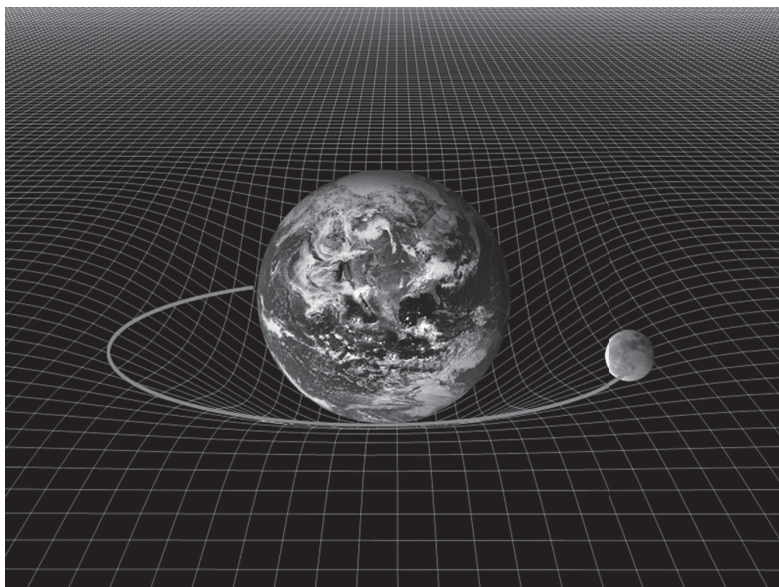


Рис. 3.8. Движение Луны вокруг Земли в результате деформации пространства – времени. С разрешения: Stanford University

На рис. 3.8 показана лишь часть деформации, а именно под Землей. Если отказаться от этой аналогии, то лучше всего отражает происходящее и обобщает теорию определение Джона Уилера: *материя диктует пространству, как изгибаться, пространство диктует, как двигаться.*



Во-вторых, не представлено время. И наконец, рис. 3.8 создает впечатление, что углубление под Землей, т.е. выглядит так, что кривая пространства есть результат воздействия силы тяжести и по этой причине ее тянет вниз. На самом же деле, кривая на рис. 3.8 это и есть сама гравитация, а не результат ее воздействия. Учитывая геометрическую природу гравитации, логично предположить, что гравитация, т.е. деформация пространства — времени также влияет на распространение света. Если у нас есть светящийся объект, который испускает световой луч, направленный к наблюдателю, а между наблюдателем и испускающим свет объектом есть масса, свет изменит свою траекторию в результате деформации пространства — времени. Чтобы удостовериться в правоте этой догадки, Эйнштейн предложил проверить отклонение световых лучей от группы удаленных звезд, вызванное массой Солнца. Первую попытку удостовериться в этом предпринял Эрвин Фройндлих, который организовал экспедицию в Крым с целью наблюдения солнечного затмения 21 августа 1914 года. Экспедиция не увенчалась успехом: шла война, и ее участников задержали и отправили обратно. Однако событие это было на руку Эйнштейну. На самом деле, в то время согласно его теории отклонение считалось равным 0,87 угловой секунды¹, как его определил Иоганн фон Зольднер (в работе 1801 года, опубликованной в 1804 году) на основании корпускулярной теории света и классической теории тяготения Ньютона.

Эйнштейн сделал еще один расчет и озвучил его на знаменитой конференции 25 ноября 1915 года. Полученный результат отклонения луча, 1,75 угловой секунды, был примерно вдвое больше предыдущего. Очевидно, что неудача, которую потерпел Эрвин Фройндлих, оказалась весьма выгодной Эйнштейну: ведь если бы экспедиция состоялась, ее результаты противоречили бы его теории. Тем не менее Эйнштейн, который «святим» не был, в последующие годы разным образом проявлял неблагодарность по отношению к Эрвину Фройндлиху.

Вторую попытку подтвердить «красивейшую из теорий» предпринял директор Кембриджской обсерватории Артур Эддингтон, организовавший сразу две экспедиции: на португальский остров Принсипи в Западной Африке и в город Собрал на севере Бразилии. Помимо желания подтвердить эту теорию, у экспедиции была и еще одна, более практическая цель: Артур Эддингтон хотел избежать мобилизации. Как убежденный пацифист он наверняка бы отказался участвовать в военных действиях, что создало бы неприятный момент для Тринити-Колледж,

¹ Точнее, 0,83 угловых секунды, поскольку в вычислениях была ошибка.

обсерватории и, как следствие, для английской науки в целом. Королевский астроном Фрэнк Дайсон сообщил коллегам, что 29 мая 1919 года будет полное солнечное затмение, которое захватит Атлантику. Событие представляло особый интерес: оно позволяло впервые экспериментально подтвердить общую теорию относительности Эйнштейна, поскольку Солнце и Луна были в созвездии Тельца, в центре которого расположено скопление Гиады. Это была уникальная возможность убить двух зайцев одним ударом: подтвердить теорию Эйнштейна и решить проблему Эддингтона. Все было организовано при содействии Дайсона, и две астрономические экспедиции отправились из Ливерпуля на борту корабля Ее Величества «Ансельм».

Несмотря на неблагоприятные погодные условия обе экспедиции сделали удачные фотографии, с помощью которых Эддингтон определил значение отклонения луча, отбросив данные, противоречащие его ожиданиям. Угловое отклонение, предсказанное общей теорией относительности, было ничтожным, как угол, под которым виден палец на расстоянии 1 км. Был объявлен результат в соответствии с прогнозами теории Эйнштейна. Часто явления отклонения светового луча называют *эффектом гравитационного линзирования*, хотя точнее это гравитационное *отклонение света*. Хотя отклонение и эффект линзы основаны на одном и том же принципе, с исторической точки зрения их следует считать двумя отдельными явлениями. *Линзированием* обычно обозначают искажение удаленных галактик, образование многократного изображения или кольца благодаря наличию объекта между наблюдателем и источником. Первым *эффект линзирования* исследовал Орест Хвольсон в 1924 году, потом Эйнштейн в 1936 году. В сущности этот эффект уже вывел Эйнштейн еще в 1912 году, за три года до публикации общей теории относительности, как следствие отклонения света от гравитационных полей, однако результат не был опубликован.

Эйнштейн привез результаты вычислений в Берлин, где познакомился с астрономом Фройндлихом. Они обсудили некоторые возможности проверки своих предположений. В 1936 году к Эйнштейну в Принстон приехал чешский инженер Руди Мандль, чтобы совместно обсудить эффект гравитационного линзирования. Мандль считал, что свет звезд, сфокусированный гравитационной линзой, мог повлиять на эволюцию человека и стать причиной важных генетических мутаций.

По настоятельной просьбе Мандля Эйнштейн опубликовал статью о линзовом эффекте в журнале *Science*, хотя поначалу отказывался, поскольку считал, что эффект этот пренебрежимо мал. Любопытно, что

в своей статье он дал понять, что опубликовал ее по просьбе Мандля. Цвикки был первым, кто заметил, что скопления галактик могут вести себя как гравитационные линзы. Он писал об этом в статье 1937 года, где использовал теорему о вириале применительно к скоплению Волосы Вероники. Прошло больше 40 лет, прежде чем в 1979 году его интуиция и прогнозы общей теории относительности подтвердились: было получено изображение объекта, удвоенное линзированием — двойной квазар SBS 0957 + 561. Дальнейшее подтверждение эффекта гравитационного линзирования — это искажения изображений галактик за скоплением, полученных Роджером Линдсом и Вахе Петросяном.

Если источник, линза и наблюдатель находятся на одной прямой, то можно обнаружить следующее:

- учетверенное¹ изображение источника, известное как крест Эйнштейна / перекрестный эффект. Например, галактика ZW2237 + 030 и расположенный непосредственно за ней квазар G2237 + 0305 (рис. 3.9)
- или кольцо, *кольцо Эйнштейна*, впервые обнаруженное в 1998 году: V1938 + 666 (рис. 3.10).

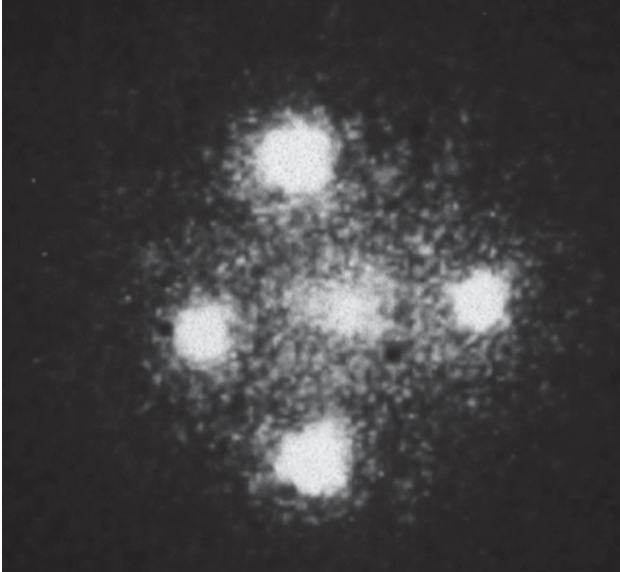


Рис. 3.9. Крест Эйнштейна: галактика ZW2237 + 030 и расположенный за ней квазар G2237 + 0305. С разрешения: ESA/Hubble and NASA

¹ В реальных наблюдениях число изображений всегда нечетно. — *Прим. ред.*

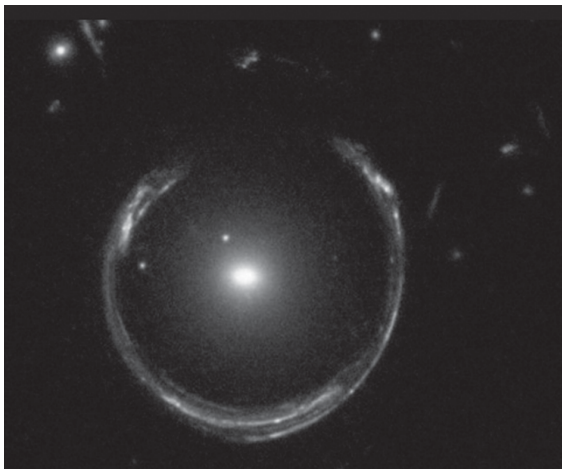


Рис. 3.10. Кольцо Эйнштейна. Источник: ESA/Hubble NASA

Наблюдение колец и других структур зависит от проекции удаленного предмета, линзы и наблюдателя (рис. 3.11).

Дуги и кольца, произведенные эффектом линзирования, — это просто космические миражи, оптические иллюзии. Они подобны миражам в пустыне, возникающим в результате разниц температур между почвой и воздухом, что искривляет свет.

Эффект линзирования бывает трех видов: *сильный*, *слабый* и *микрولينзирование*. Как видно из названия, отличаются они силой эффекта. В случае сильного линзирования можно наблюдать дуги, кольца и тому подобное, а при слабом линзировании эффект менее очевиден. Эффект линзирования важен потому, что по искажению удаленных галактик можно определить суммарную массу линзы, т.е. сумму звездной массы, газа и темной материи. Измерив звездную массу и массу газа, можно в конечном итоге определить массу темной материи.

Слабое линзирование наблюдали в 1990 году Нил Тайсон и его коллеги, которые идентифицировали соосность эллиптичностей голубых галактик за скоплениями Abell 1969 и CL 1409 + 1654. Несмотря на слабый эффект, используя конкретные математические приемы и моделирование, можно восстановить распределение массы линзы. На рис. 3.12 слева многократные изображения голубой галактики за скоплением CL 1409 + 1654, а справа реконструкция распределения массы скопления CL 1409 + 1654 в ложных цветах. Пики представляют вклад галактик в массу. По изображению видно, что большая часть массы расположена между галактиками, и примерно в 40 раз больше видимой массы системы.

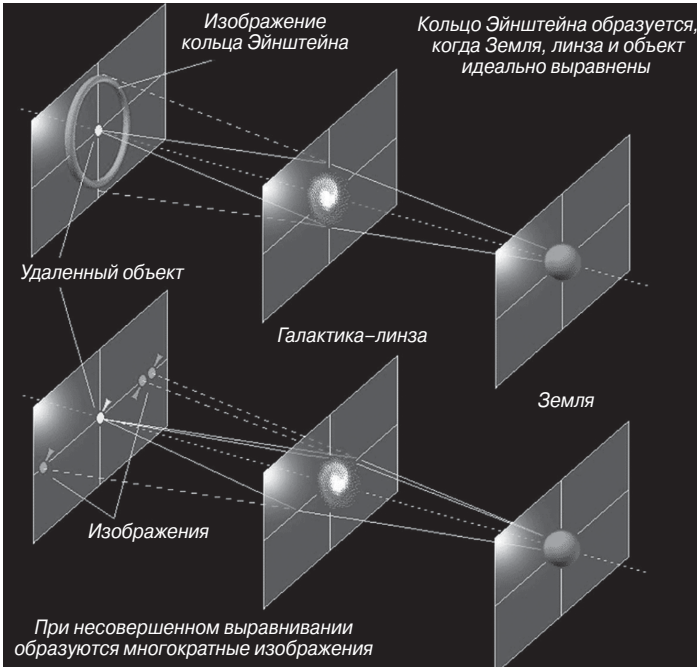


Рис. 3.11. Сильное линзирование: образование кольца и многократных изображений. Кольцо Эйнштейна образуется, когда соосность между Землей, галактикой, которая создает линзирование, и удаленной галактикой идеальная. С разрешения: University of Manchester / Alastair Gunn

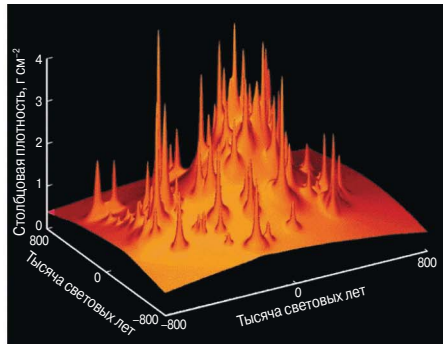
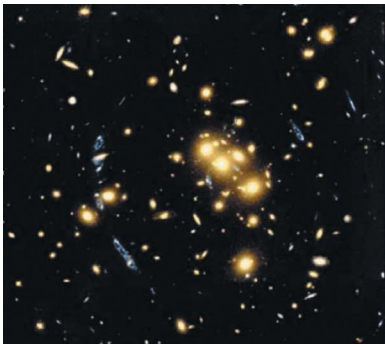


Рис. 3.12. Слева: гравитационные дуги, полученные с помощью изображения галактики за скоплением CL 1409 + 1654. Справа: реконструкция массы CL 1409 + 1654 в искусственных цветах. На графике показана темная материя на единицу площади. Вершины – это галактики. С разрешения: Greg Kochanski, Ian Dell'Antonio, and Tony Tyson (Bell Labs)

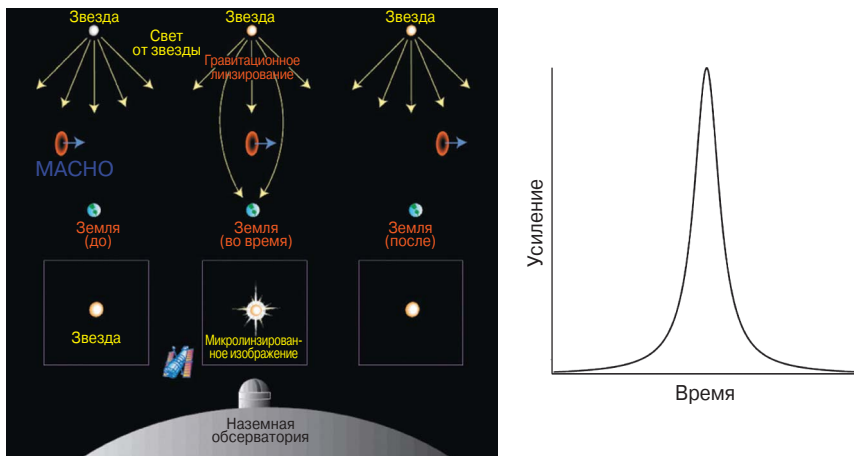


Рис. 3.13. Микролинзирование. Левая панель: Маcно (по первым англ. буквам — массивный астрофизический компактный гало-объект) движется до тех пор, пока не врежется в линию между наблюдателем и звездой. Свет звезды усиливается. Правая панель: кривая света, усиление света от звезды. С разрешения: Modified work by NASA, ESA, and A. Felid (STScI)

Сегодня линзирование обычно используют для воссоздания распределения темной массы, и его можно считать методом, с помощью которого можно «увидеть» темную материю.

И последний тип линзирования — это *микролинзирование*, или гравитационное фокусирование, которое производят звездные или планетарные объекты. Его предложили в 1986 году Мария Петру и в том же 1986 году Богдан Пачинский с целью исследования темной материи в форме компактных объектов (см. главу 5). На рис. 3.13 показано, как меняется свет звезды, когда по линии его видимости проходит планетарный объект.

Важно отметить, что принцип Ферма, который использовали для определения закона Снеллиуса — Декарта, можно приложить и к гравитационному полю (кривизна пространства — времени) для получения отклонения света или в общем смысле, т.н. *уравнения гравитационной линзы*.

3.9. Скопление галактик Пуля

Скопления галактик представляют собой самые крупные гравитационно связанные структуры во Вселенной. Скопления и сейчас формируются и продолжают расти в основном благодаря взаимодействию и слиянию с другими скоплениями галактик. Они состоят из сотен или тысяч га-

лактик, соединенных диффузным горячим газом, который испускает рентгеновское излучение, позволяющее проследить структуру этих огромных космических мегаполисов. Скопления сталкиваются друг с другом и, изучая результат столкновения, можно получить ключи к свойствам галактик и к природе массы, составляющей сталкивающиеся галактики. *Галактика Пуля*, 1E 0657-56, расположена в созвездии Киля и представляет собой результат столкновения двух скоплений галактик, большего с массой $2 \times 10^{15} M_{\odot}$ и меньшего с массой примерно в тридцать раз меньше, на огромной скорости (5000 км/с), которое произошло 100 миллионов лет назад. Распределение масс, составляющих это скопление галактик, можно определить, исследуя рентгеновское излучение и эффект гравитационной линзы. Как только распределение массы воссоздано, перед нами предстает уникальное зрелище: излучение барионной массы в рентгеновском диапазоне электромагнитного спектра расположено в центральной части скопления и отделено двумя областями, содержащими большую часть массы. При столкновении газ, в основном водород, из первого скопления сталкивается с газом второго скопления, образуя ударные фронты в центре скопления, которые отпечатываются на рентгеновском излучении скопления. С помощью линзирования можно воссоздать распределение преобладающей массы в скоплении (голубая область на рис. 3.13), состоящей из двух концентраций массы, расположенных симметрично относительно центра. Распределение этой массы кардинально отличается от распределения обычной материи (красная зона на рис. 3.14).

Эти наблюдения можно объяснить, если вспомнить, что у темной материи слабое взаимодействие с обычной материей. При столкновении темная материя каждого из скоплений спокойно продолжает следовать своим курсом, образуя две концентрации далеко от центра, а газ из двух скоплений, замедленный электромагнитным взаимодействием, в центральной части останавливается. Таким образом, скопление — это косвенное доказательство существования темной материи, даже если само по себе скопление 1E 0657-56 не говорит нам, состоит ли темная материя из частиц или из макроскопических и несветящихся объектов, как, скажем, наша планета Юпитер. И еще один важный момент: если темная материя может объяснить структуру этого скопления, то модифицированные теории гравитации, гравитационные теории, альтернативные общей теории относительности, этого сделать не могут.

Мы увидели, что есть ряд косвенных доказательств существования темной материи, основанных на изучении галактик, скоплений, гравитационных линз. Есть и другие доказательства ее существования, например способ распределения галактик в пространстве.



Рис. 3.14. Составное изображение скопления Пуля (рентгеновское излучение, карта оптическая и линзирования). Скопление Пуля есть результат столкновения двух скоплений галактик, наблюдаемых с помощью телескопа «Хаббл». Голубым отмечены участки темной материи двух скоплений, красным – газ. Левая панель: скопление. Правая панель: отмечены темная материя и газ. С разрешения: X-ray: NASA/CXC/CfA/M. Markevitch/ Optical and lensing map: NASA/STScI, Magellan/U. Arizona/D. Clowe. Lensing map: ESO WFI

В следующей главе мы увидим, как реликтовое излучение и его анизотропия дают новые доказательства существования темной материи, а также примерное представление о том, сколько темной материи должно быть во Вселенной.

ГЛАВА 4

ГАРМОНИЯ МИРА

Музыка — это воплощенная гармония Вселенной.

Альберт Джесс

Еще одним косвенным доказательством существования темной материи является реликтовое излучение Большого взрыва. Многие из нас видели это излучение на экране ненастроенных старых (нецифровых) телевизоров. На экране виден т.н. снег, или эффект белого шума, и реликтовое излучение отвечает за 1% этого явления. Реликтовое излучение — это один из основных тестов теории Большого взрыва и свидетельство того, что в прошлом Вселенная была очень горячей, но потом остыла и расширилась. Если углубиться в подробности этого излучения, то найдутся и другие косвенные доказательства существования темной материи, в чем мы скоро убедимся.

4.1. Музыка Вселенной

На карте реликтового излучения можно видеть области с разной плотностью (флуктуации плотности). В основном флуктуации представляют собой звуковые волны. Звуковые волны не распространяются в безвоздушном пространстве, но каким образом звуковые волны могли существовать во Вселенной во время рекомбинации? Дело в том, что во время рекомбинации космическое пространство не было так пусто, как нынешнее, а было заполнено плотной плазмой. Это и объясняет, каким образом звуковые волны могли создаваться и распространяться. Вот почему нет ничего удивительного в том, что в ранней Вселенной были звуковые волны: если подумать, то звуковые волны, с которыми мы имеем дело в повседневной жизни, есть не что иное, как возмущения, или флуктуации давления и плотности, распространяющиеся в воздухе. Во Вселенной средой распространения была плазма.

В ранней (первичной) Вселенной поле, породившее инфляцию, обладало квантовыми флуктуациями. А инфляция, стремительно расширяя Вселенную, преобразовывала квантовые флуктуации во флуктуации приблизительно равных амплитуд по всей шкале. Потом инфляция запол-

нила Вселенную звуковыми волнами. Кроме того, почти все флуктуации плотности в результате инфляции были созданы одновременно. Точнее, регулярность гармонической структуры подразумевает, что колебания флуктуаций плотности данного размера достигают максимального сжатия и разрежения в одно и то же время. Значит, их колебания начались одновременно. В результате возник *звуковой спектр* (см. рис. 4.5, слева), подобный спектру звучания обычных музыкальных инструментов (рис. 4.5, справа). Чтобы разобраться в этом подробнее, давайте узнаем, как создается звук во флейте, что показано на рис. 4.1.

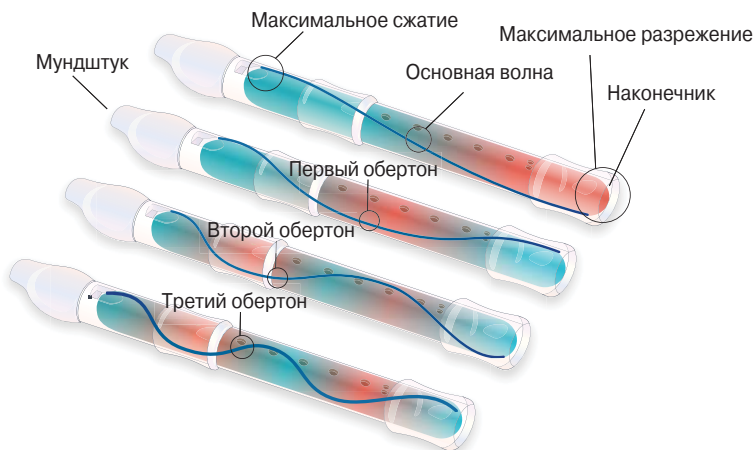


Рис. 4.1. Гармоники флейты. Основная волна максимально сжимается в мундштуке (синяя зона) и максимально разрежается в конечной части инструмента (красная зона). Кроме *основной волны* есть волны половинной длины (первая гармоника), трети длины (вторая гармоника) и четверти длины основной волны (третья гармоника). Т.н. *гармоники*. С разрешения: Modification of work by Scientific American 290N2 44 (2004), and Bryan Christie

Когда мы дуем во флейту, мы заставляем содержащийся в ней воздух двигаться и качаться, в результате чего образуются волны. Т.н. *фундаментальная частота* (рис. 4.1) соответствует волне с максимальными колебаниями воздуха в двух крайних точках (мундштук и наконечник) и минимальными в центральной части. Рядом с мундштуком максимальное сжатие воздуха, а в наконечнике – максимальное разрежение. Длина трубки, которую представляет собой флейта, равна половине длины волны. Значит, расстояние между зоной максимальной плотности и минимальной плотности равно половине длины волны (рис. 4.2).

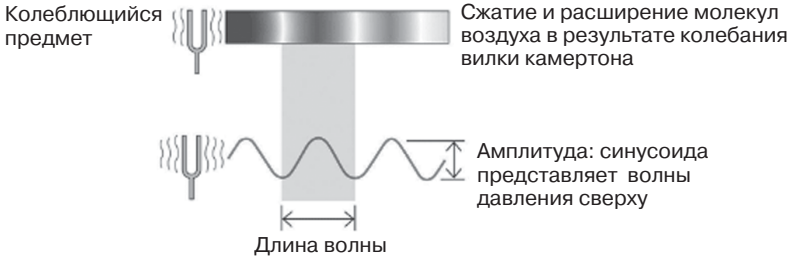


Рис. 4.2. Участки максимальной плотности, расположенные по длине волны

Помимо *фундаментальной частоты* генерируются другие, «вторичные частоты», называемые *гармониками*. Длины их волн — это целые дроби фундаментальной частоты. У первой гармоники длина волны равна половине длины фундаментальной частоты, у второй гармоники — одной трети длины фундаментальной волны, и так далее. Если фундаментальная частота определяет высоту звука, то гармоники определяют ее *тембр*, т.е. качество звука. Волны, которые есть во Вселенной, подобны тем, что производит музыкальный инструмент; разница лишь в том, что во Вселенной волны — это колебания во времени.

Продолжая аналогию между волнами музыкального инструмента и волнами Вселенной, можно сказать, что длина трубки представляет время, необходимое для того, чтобы волна достигла рекомбинации, начиная с инфляции. Важно иметь в виду, что если в случае с музыкальным инструментом периоды колебания волн находятся в диапазоне между миллионными и тысячными секунды, то фундаментальный тон во Вселенной совершил половину колебания за 380 000 лет — время, которое проходит между инфляцией и рекомбинацией (380 000 лет спустя).

А теперь рассмотрим рис. 4.3 и сравним его с рис. 4.1. На рис. 4.3 каждая полоска представляет изменение температуры и плотности благодаря распространению гармоник в плазме. Первая полоска сверху представляет собой фундаментальную частоту. Во время инфляции, соответствующей мундштуку флейты, плотность (и температура) максимальные. Во время рекомбинации, соответствующей наконечнику флейты, температура или плотность минимальные (максимальное разрежение во флейте). Как и в случае с флейтой, длины гармоник равны целым дробям длины фундаментальной частоты. Следовательно, переходя ко второму, третьему и четвертому пику (гармоникам), при рекомбинации области с максимальной или минимальной температурой всегда меньше, и есть разные максимальные и минимальные температуры.

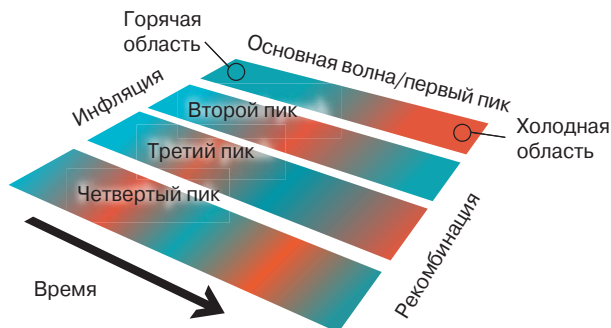


Рис. 4.3. Колебания звуковых волн в плазме. Волны производят сжатие и разрежение разных областей. Фундаментальное колебание производит максимальную температуру (синяя зона) для инфляции и минимальную для рекомбинации (красная зона). Гармоники производят разные области с максимальной и минимальной температурой. С разрешения: Modification of work by Scientific American 290N2 44 (2004), and Bryan Christie

Окажись во Вселенной только одна музыкальная нота, и построй мы карту, подобную карте реликтового излучения, мы бы увидели, что она состоит из более плотных и менее плотных участков, разделенных половиной длины волны. Эта карта была бы не такой, как карта реликтового излучения на левой панели рис. 4.4, а как шахматная доска на правой панели этого рисунка, с двумя клетками, соответствующими максимальной и минимальной плотностью, разделенными половиной длины волны.

Однако даже нота музыкального инструмента состоит не только из доминантного (основного) тона, но из многократных его гармоник. Следовательно, карта реликтового излучения намного сложнее шахматной доски, поскольку сгенерирована более чем одним звуком, или при наличии гармоник, как видно на левой панели рис. 4.4.

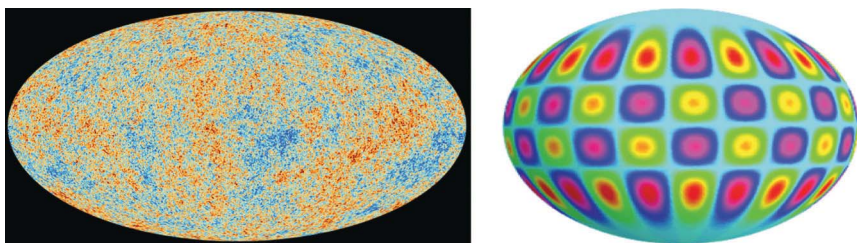


Рис. 4.4. Слева: карта анизотропии реликтового излучения, полученная космической обсерваторией Planck. С разрешения: ESA and the Planck Collaboration. Справа: карта, сгенерированная одной волной

Анализ карты реликтового излучения с помощью звукового спектра, т.е. содержания каждой длины волны на карте, позволяет выявить, что половина длины волны основного тона занимает угол в 1 градус на небосводе (рис. 4.5, левая панель). Это среднее расстояние между точками максимальной плотности (синяя) и минимальной плотности (оранжевая).

График на левой панели рис. 4.5 представляет звуковой спектр Вселенной, на удивление похожий на спектр музыкальных инструментов. В обоих случаях есть ряд акустических пиков. Если посмотреть на спектр кларнета, то он почти идентичен спектру первобытной Вселенной: плоский участок, подъем к пику и ряд последовательных вершин меньшей высоты. Систему вершин звукового спектра реликтового излучения, задолго до обнаружения пиков, предположили в 60-е годы прошлого века Андрей Сахаров, Рашид Сюняев и Яков Зельдович, а в 1970 году Джим Пиблс и Джер Ю.

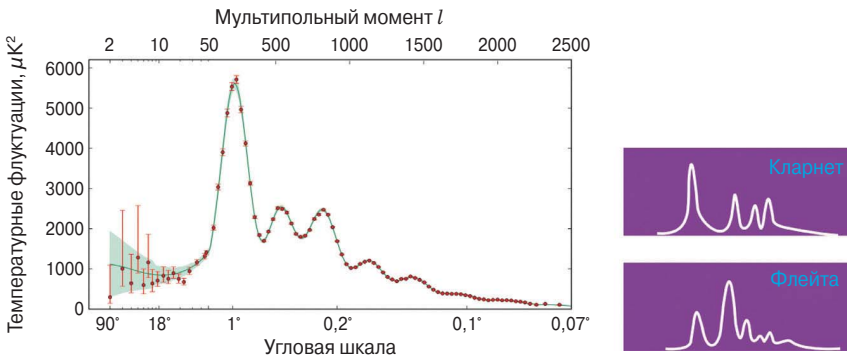


Рис. 4.5. Слева: звуковой спектр Вселенной, полученный космической обсерваторией Planck. С разрешения: ESA and the Planck Collaboration. Справа: звуковой спектр некоторых музыкальных инструментов. С разрешения: Modification of work by Judy Brown (<https://acoustics.org/pressroom/httpdocs/139th/brown.htm>)

Помимо основного тона, есть несколько гармоник с более короткой длиной волны и меньшей амплитудой. Если известно расстояние до *поверхности последнего рассеяния*, то оказывается, что 2 градуса на небосводе и длина волны основного тона соответствуют 1 миллиону световых лет. Таким образом, Вселенную пересекали звуковые волны огромной длины.

Другими словами, Вселенная была своего рода гигантским музыкальным инструментом. Во Вселенной были звуковые волны, но колебания происходили очень медленно, а значит, даже если бы мы там присутствовали, наш слух не уловил бы эти звуки. Однако существует способ сде-

лать звуки первичной Вселенной слышимыми: надо обработать информацию таким образом, чтобы они стали восприниматься человеческим ухом. Таким образом возможно получить звук первичной Вселенной. Именно так и поступил Джон Крамер из Университета Вашингтона (Сиэтл), и если вам интересно услышать этот звук, воспользуйтесь ссылкой в сноске¹.

Как заметил Альберто Касас², звук, произведенный музыкальным инструментом, можно использовать для получения информации о самом инструменте, например, из какого материала он сделан (рис. 4.5, правая панель). Подобным образом звуковой спектр первичной (или ранней) Вселенной позволяет нам определить, из чего она состоит, ее геометрическую форму и тому подобное.

Как же это возможно?

Звуковая волна фундаментальной волны после половины колебания вызвала увеличение плотности плазмы, которая претерпела сжатие. Это сжатие было усилено присутствием силы гравитации, которая в свою очередь зависит от количества материи в наличии: чем больше материи, тем больше гравитация.

Первый пик определяется сжатием области, которая достигла максимального сжатия во время рекомбинации. Второй пик (рис. 4.5, левая панель) соответствует второй волне, которая завершила колебание при рекомбинации. Во время колебания материя сначала сжалась, а потом расширилась под воздействием силы, связанной с давлением плазмы, достигнув максимального разрежения во время рекомбинации. Окончательным результатом стал пик, более низкий по отношению к первому.

Третий пик создается колебанием, которое достигло второго максимального сжатия в эпоху рекомбинации.

Есть еще одна причина снижения амплитуд. Процесс рекомбинации не является моментальным. Шкала, связанная с расстояниями, которые могут пройти фотоны в этот временной промежуток, «размыта». Другими словами, фотоны в движении уничтожают флуктуации плотности на шкале 10 Мпк. Эту шкалу называют *шкалой Силка*, а само явление — *затуханием Силка*, по имени британского астрофизика Джозефа Силка, описавшего это явление в 1968 году. Масса, связанная с этой шкалой, — это минимальная масса, которая необходима объекту для того, чтобы он сжался после рекомбинации, и равна типичной массе галактики. Уменьшение высоты пиков, особенно последних, есть результат затухания Силка.

¹ <https://www.youtube.com/watch?v=LtpXbrpEU3c>

² *Materia oscura. L'elemento piu misterioso dell'Universo* («Темная материя. Самый загадочный элемент во Вселенной»), редактор сайта RBA.

Положение пиков на рис. 4.5 (левая панель) чувствительно к кривизне Вселенной, а их форма и высота чувствительны к плотности материи. Положение первого пика сопоставимо с моделью плоской Вселенной. Высота второго пика по сравнению с первым соотносится с содержанием барионов, а высота третьего относительно первого соотносится с плотностью темной материи. Высота второго пика дает процентное содержание обычной материи, примерно 5%, и, следовательно, 26% Вселенной состоит из темной материи – разница между суммарной материей (31%) и барионной материей (5%).

4.2. Звуковые гармоника и геометрия Вселенной

Пики звукового спектра реликтового излучения (рис. 4.5, левая панель) можно также использовать для определения того, в каком пространстве мы живем. Мы видели, что среднее расстояние между оранжевой и синей областями на карте фонового излучения (рис. 4.4, левая панель) равно половине длины волны основного тона, что соответствует углу примерно в 1 градус, и подтверждается положением первого пика в звуковом спектре. В общей теории относительности пространство – время искривляется благодаря наличию материи и энергии. В зависимости от содержания, Вселенная, как она описана в главе 1, может иметь три разные геометрии: закрытая вселенная, если $\Omega > 1$, плоская вселенная, если $\Omega = 1$, и гиперболическая вселенная, если $\Omega < 1$.

Как видно на рис. 4.6 (левая панель), будь мы во вселенной с положительной кривизной, визуальный угол, занимающий половину длины волны фундаментального тона, был бы больше 1 градуса, а во вселенной с отрицательной кривизной он был бы меньше 1 градуса (рис. 4.6, правая панель). Из чего мы можем заключить, что у нашей Вселенной кривизна нулевая, т.е. она плоская, а значит, параметр полной плотности $\Omega_{\text{общий}} = 1$ (рис. 4.6, центральная часть). Вспомним из главы 1, что у открытой вселенной $\Omega_{\text{общий}} < 1$, а у закрытой $\Omega_{\text{общий}} > 1$.

Еще один способ определить геометрию Вселенной – моделировать карту реликтового излучения в разных вселенных и сравнить их с наблюдениями (см. раздел 9.3). Как и метод, обсуждаемый выше, сравнение подтверждает, что Вселенная плоская и сумма обычной материи (4,86%) с фотонами (0,005%), нейтрино (0,4%) и темной материей (25,89%) составляет приблизительно 31% критической плотности. Для достижения критической плотности не хватает большого процента массы, а именно 69%. Эта материя не может быть ни обычной, ни темной, и называется *темной энергией*.

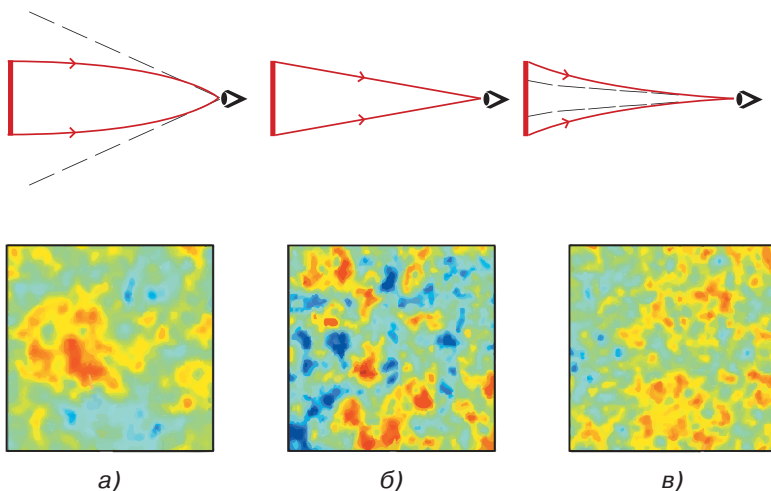


Рис. 4.6. Анизотропия реликтового излучения и геометрия пространства. В трех верхних рисунках жирные коричневые линии представляют длину фундаментальной волны, а тонкие коричневые линии — путь, которым распространяется свет, в закрытой, плоской и открытой вселенной, черная пунктирная линия — угол, образуемый геометрией, которую мы обсуждаем. В плоской вселенной длина фундаментальной волны образует угол в 1 градус. В закрытой вселенной образуемый угол больше (панель а) $(> 1^\circ)$, а в открытой вселенной (панель в) угол меньше $(< 1^\circ)$, по сравнению с плоской вселенной (панель б) (1°) . Таким образом, холодные и горячие пятна (по сравнению с плоской вселенной) оказываются большего размера в закрытой вселенной и меньшего размера в открытой вселенной. Это видно в нижней части рисунка. С разрешения: Cosmology Group/Lawrence Berkley Laboratories

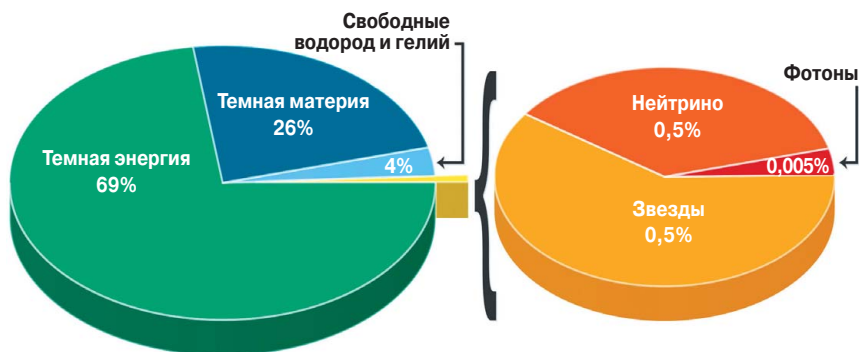


Рис. 4.7. Космологический пирог: содержание темной материи, темной энергии и других компонентов во Вселенной

Пики спектра анизотропии реликтового излучения на рис. 4.7 (левая панель) и всю кривую можно представить с помощью шестипараметрической модели, называемой *модель космического согласования*, *модель Λ CDM*, или *Стандартная космологическая модель*. В этой модели у нашей Вселенной плоская геометрия, она содержит обычное вещество, темную материю и темную энергию в указанных процентах. В этой модели Λ обозначает темную энергию, а CDM — темную материю (по первым буквам — Cold Dark Matter, холодная темная материя).

4.3. Космические симфонии и темная материя

Как мы увидим в главе 6, анизотропия реликтового излучения предоставляет нам информацию о природе темной материи. Например, мы знаем, что она должна быть холодной, т.е. дисперсионная скорость (случайная скорость) частиц должна быть намного ниже скорости света, поскольку *теплая темная материя*, произведенная нейтрино, создает возмущения, отличные от тех, что необходимы для создания космических структур.

Еще одна важная информация, которая вытекает из большой однородности и изотропии реликтового излучения, состоит в том, что на шкале, выше чем 100 Мпк Вселенная однородна, т.е. средняя плотность материи одинакова независимо от направления, в котором мы смотрим¹.

Реликтовое излучение является также проверкой теории инфляции. Флуктуации плотности, наблюдаемые при реликтовом излучении, были сгенерированы квантовыми флуктуациями, произведенными во время инфляции, усиленными гравитацией до макроскопических размеров. Первые подробные вычисления первичных флуктуаций были осуществлены в начале 1981 года Вячеславом Мухановым и Андреем Чибисовым, а в 1982 году — Стивеном Хокингом, Алексеем Старобинским, Дэвидом Тернером и Аланом Гуттом. Инфляция предоставляет четкий спектр флуктуаций, что подтвердило исследование анизотропии реликтового излучения². Еще один из прогнозов инфляции — это образование первичных гравитационных волн, которые оставили след на карте анизотропии реликтового излучения, т.н. *B-моды поляризации*. Амплитуду этих возмущений можно использовать как меру шкалы энергии, при которой имела место инфляция, таким образом обозначив энергию частицы, ин-

¹ Для облегчения вычислений Эйнштейн и другие физики использовали гипотезу однородности и изотропии, т.н. *космологический принцип*.

² С технической точки зрения мы говорим о *спектральном индексе*, *гауссовости* и *адиабатичности*.

флатона, который и стал причиной ее возникновения. Их также можно использовать для различения модели Большого взрыва и циклических моделей, описанных в разделе 10.5.

В марте 2014 года во время эксперимента в Антарктиде, проведенного с помощью аппарата ВИСЕР2, ученые объявили об обнаружении сигналов генерации первичных гравитационных волн, однако после более позднего анализа, проведенного в сентябре того же года другой группой исследователей с использованием космической обсерватории Planck, последовало опровержение.

Хотя большая часть свойств реликтового излучения и его анизотропии уже понята, остаются и загадки. Данные, полученные с помощью WMAP и Planck, показали, что карты анизотропии реликтового излучения демонстрируют различные аномалии по сравнению со статистической изотропией, что противоречит космологическому принципу. Одна из аномалий – это наличие холодного пятна углового размера примерно $5-10^\circ$ (рис. 4.8). Возможно, это объясняется большой пустотой, расположенной между нами и направлением холодного пятна, или какими-то другими более экзотическими причинами. По мнению Лауры Мерсини-Хоутон, холодное пятно может быть результатом *квантовой запутанности*, первичной корреляции между нашей Вселенной и другой, которая потом отделилась в результате расширения инфляции.

Итак, реликтовое излучение и его анизотропия – это мощная космологическая лаборатория. В целях обнаружения сигналов первичных гравитационных волн проводятся многочисленные наблюдения.

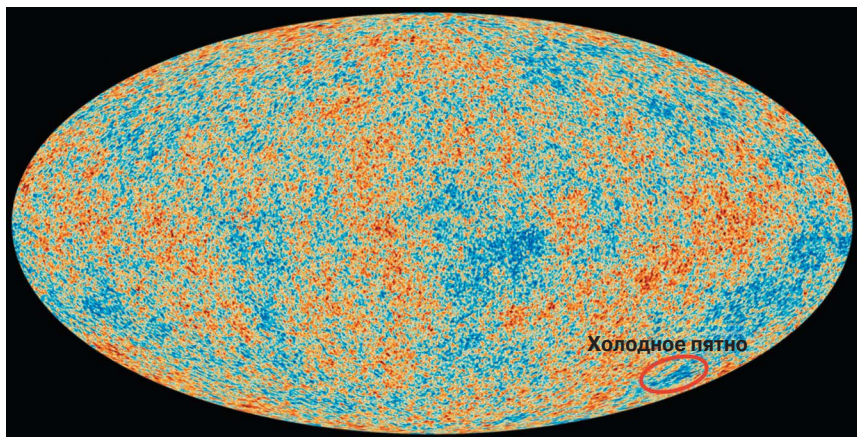


Рис. 4.8. Холодное пятно на карте анизотропии реликтового излучения

Возможно, ответ будет получен благодаря таким экспериментам, как VICEP или QUIJOTE, а может, с помощью спутников будущего: PIXIE, LiteBIRD, JAXA, CORE. Более глубокое исследование реликтового излучения и его анизотропии даст нам новые пути для изучения тепловой истории Вселенной, инфляции и темной материи.

ГЛАВА 5

ЧТО ТАКОЕ ТЕМНАЯ МАТЕРИЯ?

Вселенная была построена по проекту, глубинная симметрия которого каким-то образом присутствует во внутренней структуре нашего интеллекта.

Поль Валери

5.1. Обычная темная материя?

Мы обсудили ряд косвенных тестов, каждый из которых приводит к убеждению, что Вселенная должна содержать темную материю. Однако остается открытым вопрос: из чего же состоит темная материя? Первое, что приходит на ум: это обычное вещество, которое по какой-то причине невидимо, например, поскольку излучение настолько слабое, что его невозможно обнаружить. В 1956 году Дэвид Хишен пытался обнаружить излучение нейтрального водорода (HI) в скоплении Волосы Вероники (Coma) и ему это удалось, однако три года спустя Мюллер доказал, что результат Хишена не верен.

В середине 60-х годов прошлого века Херб Руд пытался понять, из чего состоит темная материя между скоплениями галактик. Он пришел к выводу, что эту материю можно обнаружить в межгалактическом пространстве. Поскольку нейтральный водород не обнаружили, стали полагать, что это может быть ионизированный водород. Благодаря наблюдениям в диапазонах радиоволн и рентгеновского излучения стало возможным подсчитать, сколько газа содержится в скоплениях, в результате чего пришли к выводу, что всего лишь 2% материала удерживают скопление в гравитационно связанном состоянии. Слишком незначительное количество для того, чтобы идентифицировать газ с помощью темной материи. Как только от этой возможности отказались, обратили внимание на следующие:

- сжавшиеся массивные объекты с массой от сотен миллионов до тысяч миллиардов массы Солнца — эту гипотезу отвергли из-за отсутствия приливного искажения галактик;

- «снежки» из нейтрального водорода — от этой версии пока не отказались;
- карликовые звезды, планеты, коричневые, красные, белые карлики или черные дыры.

Для этих объектов Ким Грист ввел термин МАСНО (акроним *massive astrophysical compact halo objects* — массивные астрофизические компактные объекты гало).

Мысль, что темная материя состоит из МАСНО, представлялась отличной интуитивной догадкой, и поэтому для проверки этой гипотезы были продуманы эксперименты. Сейчас мы с вами поговорим о *темной материи МАСНО*, которая состоит из объектов, связанных с формированием и эволюцией звезд. Постепенно мы познакомимся с каждым из них.

5.2. Звезды

Солнце — это звезда, удаленная от нас на 8 световых минут. Это источник энергии, необходимый для жизни на Земле. По сравнению с другими звездами, Солнце представляет собой звезду малых или средних размеров с радиусом более чем в 100 раз больше, чем радиус Земли, с массой в 300 000 раз больше и плотностью, подобной плотности воды. Как и другие звезды, Солнце — это плазменный шар, устойчивая структура которого объясняется равновесием между гравитационной силой, имеющей тенденцию привести ее к коллапсу, и давлением газа, создаваемым ядерными реакциями в его центре, которые преобразуют водород в гелий, пока звезда молодая. Ядерные реакции производят электромагнитное излучение, поток элементарных частиц, называемых *солнечным ветром*, и *нейтрино*. Температура поверхности Солнца 5780 К, и она растет по мере приближения к центру, достигая десятков миллионов градусов. Помимо центральной части звезды, где происходят ядерные реакции, выходящие наружу, звезда характеризуется *зоной лучистого переноса* и *конвективной зоной*. В первой энергия переносится с помощью излучения, во второй — конвективными движениями. У малых и больших звезд зоны расположены по-разному. У звезд есть и атмосфера. Начиная с *фотосферы* (с греческого «сфера света»), из которой исходят видимые нам лучи, мы знакомимся с *хромосферой* (буквально «сфера цвета»). За ней следует *корона*, состоящая из разреженного газа с температурой несколько миллионов градусов.

Звезды различаются цветом в зависимости от температуры своей поверхности. Самые холодные, примерно 2000 К, темно-красные, а самые горячие (с температурой порядка 20 000 К и выше) — голубые. Цветовое различие нетрудно понять на бытовом примере. Когда кузнец

раскаляет железо, оно начинает излучать темно-красный цвет, но постепенно с увеличением температуры излучение становится желтым, а потом и голубым.

С возрастом внутренний состав звезд меняется. Звезды, подобные Солнцу, состоят из 70% водорода, 28% гелия и 2% более тяжелых элементов, но со временем количество водорода снижается, а других компонентов растет. Звезды различаются размером и массой. У самых маленьких минимальная масса, необходимая для запуска синтеза водорода (0,08 солнечной массы), у самых больших масса достигает порядка 100 солнечных масс. Размеры варьируют от 10 км (как у *нейтронных звезд*) до миллиардов километров, как у *сверхгигантов*. Звезды образуются в результате гравитационного коллапса больших облаков газа и объединяются в группы, образуя звездные ассоциации или т.н. звездные скопления. В Приложении Б мы поговорим о том, что для образования звезды или галактики из газового облака необходима масса выше критической, т.н. *масса Джинса*, по имени британского физика Джеймса Джинса, который в 1902 году опубликовал исследование на тему гравитационного коллапса газового облака. Джинс показал, что есть предел массы, выше которого облако может сжаться, как правило, порядка тысячи солнечных масс. В отличие от нашего Солнца, у звезд обычно есть партнеры. Помимо групп, звезды являются частью очень крупных структур — галактик, состоящих из нескольких сот миллиардов звезд, как в случае нашей Галактики.

Даже если звезды образовались в результате коллапса больших масс газа и объединились в группы, каждая следует своей собственной судьбе. Представление о формировании звезды и связанной с ней планетарной системы дает *гипотеза Канта — Лапласа*, согласно которой масса газа становится неустойчивой, например, в результате взрыва соседней звезды, и сжимается. Во время сжатия, благодаря сохранению момента импульса, туманность начинает вращаться все быстрее и быстрее и нагревается. Когда температура достигает значения, необходимого для термоядерной реакции, в центре сжимающейся туманности образуется звезда. В результате силы, производящей вращение и давление газа, возникает плоская структура, т.н. *протопланетный диск*, с *протозвездой* в его центре. Из протопланетного диска образуются планеты. Во время формирования Солнечной системы на расстояниях меньше расстояния от Солнца до Юпитера температура была настолько высокой, что конденсация молекул, воды или метана, была невозможна. В этой области планеты образовались в результате аккумуляции каменных объектов, т.н. *планетезималей*, при столкновении которых друг с другом

образовались планеты земной группы. За *снеговой линией*, на расстоянии примерно трех астрономических единиц, температура была достаточно низкой для того, чтобы планетезимали захватили газ, в результате чего образовались планеты типа Юпитер (в 318 раз больше Земли) и Сатурн. Уран и Нептун захватили меньшее количество газа и конденсировали вокруг ледяных ядер (кernов). В конце этого процесса солнечный ветер сдул газ и пыль, остановив процесс роста планет. До 1995 года не было известно ни одной солнечной системы, подобной нашей. В том году два швейцарских астронома, Мишель Майор и Дидье Кело, косвенно наблюдали Гельветиос, планету 51 в созвездии Пегаса, за что в 2020 году получили Нобелевскую премию. С тех пор, благодаря улучшению техники наблюдения и полетов спутников-телескопов, например *Kepler*, число *экзопланет* выросло до нескольких тысяч, а всего в нашей Галактике их около миллиарда. Первые из обнаруженных планет были массой больше, чем у Юпитера, поскольку уровень техники наблюдений располагал к открытию более крупных планет. Сегодня обнаруживают планеты, близкие по массе нашей Земле. Наиболее близка Земле по т.н. индексу подобия (ESI — Earth Similitude Index) 0,90 экзопланета звезды *K2-72*, в 228 световых годах от Земли, с массой 2,7 и радиусом 0,82 по сравнению с земным. Другие землеподобные планеты вращаются вокруг звезды *Trappist*, в частности, планета¹ *Trappist-1*. Эта планета удалена от Земли на 39,5 световых лет, с массой 0,62 и радиусом 0,92 по сравнению с земным. Есть и другие планеты, например *Kepler-442b* на расстоянии 11 световых лет. Она не только похожа на Землю, но и, вероятно, находится в центре *зоны пригодности для жизни*² своей звезды.

5.3. Смерть звезды и космическое ископаемое

Мы часто задумываемся о быстротечности человеческой жизни на фоне продолжительности жизни звезд, галактик и Вселенной. На самом деле, хотя звезды, галактики и Вселенная и живут несравнимо дольше, чем мы, они тоже смертны. В последней главе вы узнаете разные версии конца нашей Вселенной.

Так же как и люди, звезды живут и со временем умирают, и, как и люди, умирают они по-разному. То, как умирает звезда, зависит от ее

¹ Автор ошибочно называет планетой звезду *Trappist 1*, обладающую системой экзопланет. Скорее всего, речь идет об экзопланете *Trappist 1e*. — *Прим. ред.*

² Зона пригодности для жизни, называемая также *Зоной Златовласки*, это область, где на поверхности планеты есть жидкая вода.

массы. Звезды с массой подобной солнечной потребляют свое топливо (водород) медленно. Они могут жить до 10 миллиардов лет. Когда водород преобразуется в гелий, звезды сжимаются, что приводит к термоядерным реакциям в сферических оболочках за пределами ядра. Когда и эти реакции заканчиваются, звезда снова сжимается и запускает синтез гелия, температура в центре достигает 100 миллионов градусов. Солнце расширяется на фазе *красного гиганта*, пока не соприкоснется с Землей. Когда не останется и гелия в качестве топлива, Солнце сожмется, но на этот раз сжатия будет недостаточно для запуска синтеза углерода. В результате сжатия внешние части отторгнутся, образуя планетарную туманность, а в центре образуется *белый карлик*. Сила, которая останавливает гравитационный коллапс, образуя белых карликов, это давление *вырожденных электронов* — конкретной фазы материи, которую характеризует высокая плотность и высокая кинетическая энергия, как следствие *принципа исключения Паули*. Этот принцип (его также называют принципом запрета) ввел в 1925 году Вольфганг Паули: два фермиона, например электроны, одного и того же вида не могут одновременно находиться в одном и том же квантовом состоянии, т.е. не могут иметь одинаковую энергию, угловой момент и момент импульса. Когда частицы сближаются, они имеют тенденцию занимать состояние с большей энергией.

Принцип Паули вынуждает электроны беспорядочно двигаться и занимать состояния с более высокой кинетической энергией. Эти движения создают давление, которое уравнивает гравитационное воздействие, разрешая существование белого карлика. Высокая плотность и скорость электронов называется *вырожденным состоянием*, а сами электроны — *вырожденными*.

Звезды с массой больше восьми солнечных сжигают свое топливо быстрее и живут 10 миллионов лет. Последовательно сжимаясь и расширяясь, они смогут запустить синтез всех элементов тяжелее железа. Синтез железа требует больше энергии, чем он излучает. Следовательно, ядерные реакции прекратятся. Звезда взорвется, породив *сверхновую*, которая выбросит в космос оболочки внешней материи, а сердцевина в то же время сожмется, образуя *нейтронную звезду*, когда электроны и протоны соединятся воедино. Звезды с большей массой порождают *черные дыры*.

5.4. Коричневые карлики

Коричневые карлики — это небесные объекты с массой от 1 до 75–80 масс Юпитера. Это минимальная масса, необходимая для синтеза водорода. Объекты с массой примерно 13 масс Юпитера называют *коричневыми*

субкарликами. Для масс в интервале 13–65 масс Юпитера внутри коричневого карлика запускаются реакции дейтерия, а свыше 65 масс Юпитера — реакции лития. У этих звезд температура около 2000 К, гораздо ниже температуры Солнца, 5780 К. Учитывая их небольшую массу, коричневые карлики не в состоянии запускать реакции синтеза водорода, но благодаря синтезу дейтерия и лития генерируют энергию. Эти элементы синтезируются проще, чем водород, и поэтому отсутствуют в обычных звездах, которые сжигают их в короткое время. Помимо этих реакций, у коричневых карликов есть еще один источник энергии — гравитационное сжатие. Недалеко от нас, в 6,5 светового года, есть двойная система коричневых карликов — *WISE 1049-5319*.

5.5. Космическое ископаемое

Другие объекты, которые могут составлять барионную темную материю, — это остатки звезд на их финальной стадии эволюции, а именно: белые карлики, нейтронные звезды и черные дыры.

Белый карлик — это звезда низкой светимости с размером подобным земному, но массой близкой к солнечной. Следовательно, эти объекты очень компактны, с гравитационным полем в миллион раз больше земного и плотностью в миллион раз больше, чем у воды. Они представляют конечную фазу эволюции звезд с массой, подобной солнечной, и после фазы *Главной последовательности* следуют эволюции, которая приводит их к неустойчивым фазам. Оболочки внешней массы отторгаются и дают жизнь *планетарной туманности*, оставляя в центре белого карлика. Белые карлики образуются, когда гравитационное сжатие родительской звезды прекращается в результате давления вырожденных электронов.

Максимальная масса невращающихся белых карликов может достигать примерно 1,44 солнечной массы, т.н. *предела Чандрасекара*. При рождении этих звезд температура их поверхности порядка 100 000 К, она постепенно снижается, пока звезда не перестает давать излучение, и называется такая звезда *черным карликом*. Время, необходимое для охлаждения, намного больше возраста Вселенной и, следовательно, полагают, что в нашей Вселенной черных карликов пока нет. В наших окрестностях (на расстоянии в 21 световой год), есть восемь белых карликов из 11 000, которые насчитывают во Вселенной.

Еще одна возможность — это нейтронные звезды. Как и белые карлики, нейтронные звезды — это вырожденные звезды с размером примерно 10 км, массой от 1,4 до 3 M_{\odot} , хотя у максимальной из обнаруженных нейтронных звезд масса 2,01 M_{\odot} .

Плотность этих объектов подобна плотности атомных ядер, примерно 10^{14} г/см³, или 198 миллионов тонн на кубический сантиметр, а гравитационное поле в сто миллиардов (10^{11}) раз больше, чем у Земли. Более быстрые совершают полный оборот за периоды в одну тысячную секунды, а более медленные в десятки секунд. Через два года после открытия нейтрона Джеймсом Чедвиком, Вальтер Бааде и Фриц Цвикки предположили, что есть звезды, полностью состоящие из нейтронов. Нейтронные звезды обнаружили в 1967 году в результате наблюдений в Кембридже, и первой, кому это удалось, была Джоселин Бернелл Белл¹. Эти звезды, названные *пульсарами*, испускают излучение только во время вращения. А увидеть их можно, только если свет исходит в поле нашего зрения, как экстремально регулярные импульсы. Пульсары — это своего рода космические маяки.

И наконец, если масса звезд-прародителей несколько десятков солнечных масс, в природе нет силы, которая могла бы остановить гравитационный коллапс. Коллапс звезды порождает *черную дыру*. Эти объекты представляют собой отличные лаборатории для изучения следствий общей теории относительности и квантовой механики. Их характеризует т.н. *горизонт событий* (рис. 5.1), от которого не сможет уйти ни один объект, даже свет. Если бы Солнце коллапсировало, образовав черную дыру, его радиус сжался бы до 3 км.

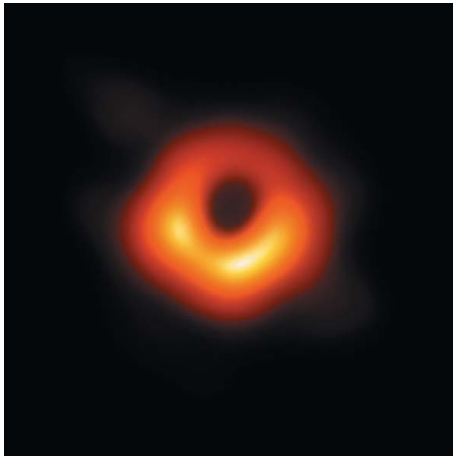


Рис. 5.1. Т.н. тень черной дыры в центре галактики M87 — первое полученное учеными изображение черной дыры с помощью данных Event Horizon Telescope. С разрешения Event Horizon Telescope team

¹ Интересная деталь: Джоселин Бернелл Белл так и не получила Нобелевскую премию за свое открытие, а присудили премию Энтони Хьюишу, ее руководителю.

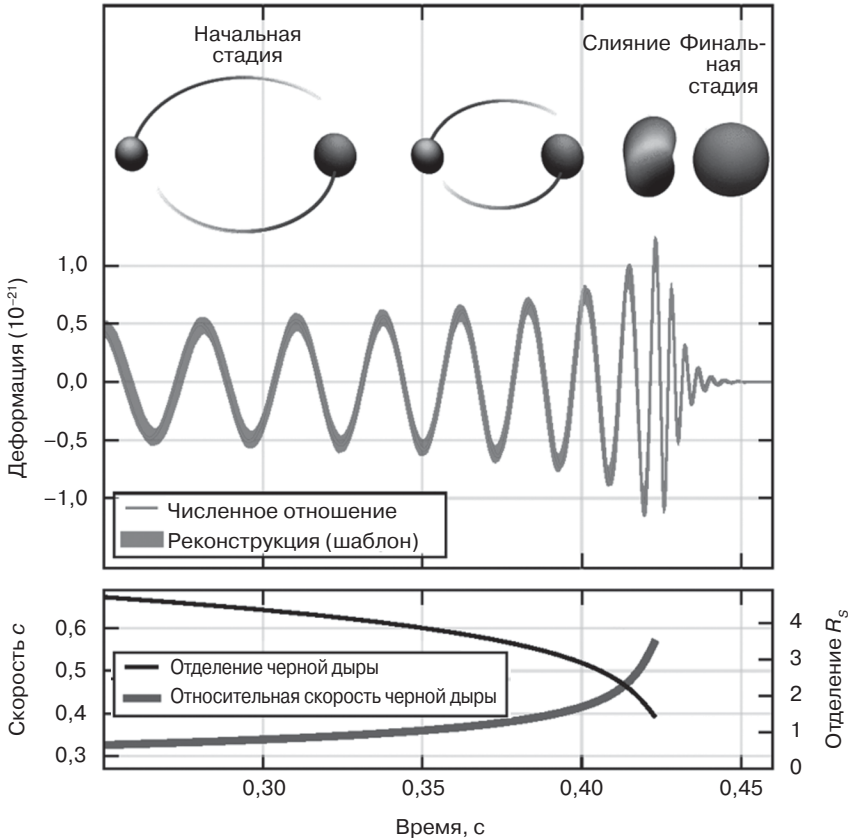


Рис. 5.2. Первые наблюдения гравитационных волн в сентябре 2015 года. Верхняя панель: Событие GW 150914, а именно гравитационная волна (GW), полученное 14 сентября 2015 года, благодаря слиянию черных дыр $36 M_{\odot}$ и $29 M_{\odot}$. На верхней панели показано, как черные дыры приближаются друг к другу и сливаются в одну. Осциллирующая линия – это амплитуда деформации гравитационной волны. Нижняя панель: Относительная скорость черной дыры и отделение. С разрешения: LIGO Collaboration (<http://doi.org/10.103/PhysRevLett.116061102>)

Масса черных дыр, образованных в результате гравитационного коллапса звезды, составляет от пяти до десяти масс Солнца, в исключительных случаях до 20 солнечных масс. Черные дыры массой примерно 30 солнечных масс были обнаружены в результате столкновения, которое создало первую гравитационную волну; наблюдения вели в 2015 году в обсерватории LIGO (рис. 5.2). Кроме этих черных дыр, есть и другие, массой

в миллионы солнечных масс в центре галактики, подобной нашей, или в миллиарды солнечных масс в центре эллиптических галактик, как M87.

5.6. Поиск МАСНО

Хотя сегодня уже очевидно, что объекты МАСНО не могут объяснить темную материю во всей совокупности, еще два десятилетия назад ситуация не была столь очевидной.

Однако есть доказательства и против существования этих объектов — например, предсказания первичного нуклеосинтеза, что подразумевает, что во Вселенной 5% барионной массы — и были задуманы исследования и эксперименты с целью определения количества этих элементов. В этом случае было ясно, что заметную роль сыграет явление гравитационного линзирования. В 1979 году Кёнге Чанг и Сюр Рефсдаль показали, что вопреки ожиданиям Эйнштейна даже звезды могут выступать в роли гравитационных линз. В 1986 году Богдан Пачинский предложил использовать это явление для обнаружения компактных объектов в нашей Галактике, а Роберт Немирофф подсчитал вероятность событий микролинзирования благодаря этим объектам.

Для эффекта микролинзирования характерно увеличение звездного света в зависимости от массы объекта, как видно на рис. 3.13. Например, если смотреть на звезду в *Магеллановом облаке* и МАСНО пересекает линию, соединяющую наблюдателя с наблюдаемой звездой, будет рост звездной светимости (см. рис. 3.13). Время варьируется от нескольких часов до года для МАСНО с массой от одной десятиллионной до сотни масс Солнца. В 90-е годы прошлого века к поискам МАСНО совместно приступили: EROS (Experience pour la Recherche d'Objets Sombres — Опыт поиска темных объектов), OGLE (Optical Gravitational Lensing Experiment — Изучение темных объектов с помощью гравитационного линзирования) и МАСНО. После шести лет работы и наблюдений кривых света десятков миллионов звезд было выявлено 14–17 событий микролинзирования. Пришли к выводу, что объекты МАСНО должны составлять 8–50% массы гало нашей Галактики. Через год результаты значительно сократили: МАСНО могут составлять не больше 8% массы гало.

5.7. Первичные черные дыры

Последняя возможность объектов, которые могли составлять барионную массу темной материи, — это первичные черные дыры. Могут существовать черные дыры, созданные не коллапсом звезд, а возникшие

в первые моменты формирования Вселенной благодаря очень высокой плотности вещества во время тех фаз. Первичные черные дыры имеют довольно небольшую массу, примерно до 10^{12} кг, подобно массе кометы. В первые моменты после Большого взрыва флуктуации в плотности материала могут привести к появлению настолько плотных областей, что они коллапсируют, образуя черные дыры. Мысль о том, что первичные черные дыры могут составлять всю темную материю или ее часть, получила развитие после обнаружения с помощью сотрудничества LIGO/VIRGO гравитационных волн в результате слияния черных дыр. Черные дыры, которые произвели гравитационную волну 2015 года, имели неожиданно большую массу для черной дыры. Есть вероятность, что они представляют большое семейство черных дыр с пространственным распределением подобным распределению темной материи, возникшей в результате роста популяции первичных черных дыр. Пределы на количество барионной материи, полученные на основании первичного нуклеосинтеза и анизотропии реликтового излучения, не приложимы к таким объектам, которые сформировались до нуклеосинтеза, во всяком случае, для объектов с маленькой массой.

Ограничения на первичные черные дыры, полученные коллаборацией EROS, и по данным анизотропии реликтового излучения были пересмотрены, и некоторые исследования показали, что первичные черные дыры могут составлять темную материю, в то время как другие исследования обнаружили противоположные результаты. Этот вопрос не очень ясен.

В заключение, если исключить первичные черные дыры, то теория первичного нуклеосинтеза накладывает ограничения на массу барионной материи во Вселенной, а именно 5%, что подтверждает исследование анизотропии реликтового излучения. Более того, только примерно 1% образовал звезды, планеты и другие компактные объекты. Большая часть барионной материи находится в межзвездной материи, в горячем газе внутри галактик и скоплений. Следовательно, эти пределы указывают, что темная материя, составляющая 26% материи Вселенной, не может состоять только из барионов, и в то же время эта часть барионной материи невидима.

5.8. Темная материя в частицах

Если темная материя необходима для объяснения целого ряда явлений и если она не состоит из обычной, или барионной материи, то из чего же она состоит?

Еще в 70-е годы прошлого столетия люди задумались над тем, что темная материя состоит из какого-то сорта частиц. На это указывало

несколько причин. Во-первых, барионная материя не объясняет подсчитанное количество материи. Если допустить, что Вселенная плоская и, значит, $\Omega = 1$, то, по оценкам, темная материя составляет от 20 до 30% (0,2–0,3 в терминах критической плотности) — намного больше, чем ожидалось на основании первичного нуклеосинтеза, т.е. всего около 5%.

Еще один фундаментальный аспект возник в результате исследования анизотропии реликтового излучения. Как мы уже знаем, после рекомбинации плазма, из которой состоит Вселенная, начала охлаждаться, а возмущения плотности начали расти благодаря гравитационной неустойчивости в структурах. Чтобы хватило времени на образование структур, т.е. галактик, скоплений и сверхскоплений, флуктуации плотности при рекомбинации оценили как $\sim 10^{-3}$. Первые исследования флуктуаций плотности не принесли никаких результатов. Только в конце 70-х годов прошлого столетия стало очевидно, что эти флуктуации должны быть намного ниже, чем теоретические ожидания. Потом астрономы начали думать, что темная материя могла состоять из частиц. Первые частицы, которые связывали с недостающей массой, были *нейтрино*.

В 1973 году Раманат Ковсик и Джеймс Макклелланд, получив верхний предел массы нейтрино (1972 год), впервые высказали предположение, что некоторое количество нейтрино с массой в несколько электрон-вольт могут преобладать над гравитационной динамикой скоплений галактик и Вселенной, и приложили результат к проблеме недостающей массы в скоплении Волосы Вероники.

До них, в 1966 году Семен Герштейн и Яков Зельдович обсуждали роль *мюонных нейтрино*¹ в космологии, но не связали их с недостающей массой. Они предсказали количество мюонных нейтрино в термодинамическом равновесии в ранней Вселенной, температуру, при которой частицы перестают аннигилировать, оставляя популяцию нейтрино, выживших как термальные реликты. Они также предсказали, что их масса должна быть < 400 эВ, и пришли к выводу, что нейтрино с массой 10 эВ будут доминировать в энергии и массе Вселенной. В последующие годы была высказана неверная идея, что нейтрино могут помочь преодолеть парадокс флуктуаций реликтового излучения. Во Вселенной, где преобладают нейтрино, рост возмущений может начаться раньше, чем во Вселенной, состоящей из барионов,

¹ Нейтрино — это группа из трех частиц: нейтрино, связанные с электронами, т.н. *электронные нейтрино*; те, что связаны с мюонами, называют *мюонными нейтрино*, а те, что связаны с частицей τ , называются *тау-нейтрино*.



и при рекомбинации иметь достаточную амплитуду для образования структур.

Наиболее видный представитель космологии нейтрино – советский физик Яков Зельдович, можно сказать, легендарная личность в советской физике и астрофизике, чрезвычайно многогранный и плодовитый ученый. Он внес весомый вклад в ядерную физику, физику частиц, ОТО, астрофизику, космологию и физику материалов, а также сыграл значительную роль в развитии проекта советской атомной и водородной бомбы. Среди всего прочего в 60-е годы прошлого века Зельдович внес немалый вклад в термодинамику черных дыр.

Он связал задачи аккреционных дисков вокруг черных дыр и квазары, а также обсуждал первичные черные дыры. Когда в 1973 году в Москву приезжал Стивен Хокинг, Зельдович и Алексей Старобинский показали Хокингу, что из-за принципа неопределенности черные дыры должны излучать и поглощать частицы. На основе этих идей Хокинг развил известную теорию испарения черных дыр, которую назвали *излучением Хокинга*.

Хотя это может показаться странным, но черные дыры не полностью черные. Явление испарения можно упростить следующим образом. В безвоздушном пространстве вокруг черной дыры возникают и пропадают частицы и античастицы. Из-за огромного гравитационного поля черной дыры одна из частиц пары может упасть в черную дыру, оставляя другую частицу снаружи. Это равносильно созданию частиц с массой эквивалентной массе частицы снаружи черной дыры, за счет энергии самой черной дыры. Следовательно, черная дыра будет постепенно терять массу, пропорционально кубу ее массы. Например, черная дыра с солнечной массой испарится за 10^{67} лет. Ее температура также увеличится обратно пропорционально ее массе.

Модель образования космических структур Зельдовича основана на нейтрино, которые являются частицами с релятивистской¹ скоростью, и по этой причине модель называется *модель горячей темной материи* (HDM – hot dark matter).

Однако существует нетривиальная проблема. Во вселенной, где доминируют нейтрино, высокая скорость их движения гасит мелкие возмущения, оставляя только самые крупные. В этой модели первыми образуются большие объекты, например скопления галактик, называемые *блинами*. Галактики образуются позже путем фрагментации. Эта модель

¹ Частицы со скоростью, близкой к скорости света.

также носит название *нисходящей*, поскольку образование структур начинается с больших масштабов (несколько мегапарсек) и продолжается на малых. Скоро стало очевидно, что модель, основанная на нейтрино, не работает. В сущности, во Вселенной сначала образуются галактики, а потом скопления галактик, вопреки предсказаниям модели НДМ. Этот недостаток, наряду с другими, например сравнением с моделированием, привел к тому, что эту модель отвергли, и было ясно, что нейтрино не могли быть единственным строительным материалом Вселенной, и она состоит из частиц разных типов. Нейтрино снова вошли в моду намного позже, в 1993 году, когда Скотт Додельсон и Лоуренс Уидроу предложили четвертый тип нейтрино, т.н. *стерильные нейтрино*, которыми можно объяснить всю темную материю. Эта гипотетическая частица может только взаимодействовать с другими частицами с помощью гравитации и механизма *нейтринных осцилляций*, и с другими нейтрино, которые позволяют нейтрино определенного типа трансформироваться в другие типы нейтрино.

В 1982 году, когда стало ясно, что нейтринная модель темной материи не точна, несколько физиков, в том числе Джим Пиблс, предположили, что темная материя состоит из других частиц, например *аксионов*, *гравитино* и *фотино*. Поскольку эти частицы не являются релятивистскими, модель назвали *моделью холодной темной материи* (CDM – cold dark matter). Более того, поскольку мелкомасштабные структуры образуются раньше крупномасштабных, эти модели называются *восходящими*.

Поскольку эти частицы не являются релятивистскими, они не подавляют мелкомасштабные возмущения. Таким образом, структуры образуются от маленьких масштабов к большим, в соответствии с наблюдениями.

Итак, суммируем: темная материя не может состоять из барионов не только потому, что это не объясняет количество недостающей материи, а потому, что произведенные барионные возмущения намного больше, чем те, что наблюдаются в анизотропии реликтового излучения. Подобным образом, она не может состоять из нейтрино, поскольку они ведут себя как горячая темная материя, а еще у них очень маленькая масса. Несмотря на то что в численном выражении нейтрино изобильны¹, они не составляют и 26% критической плотности. Что касается модели холодной темной материи, то она предсказывает возмущения в соответствии с на-

¹ Чтобы вы имели представление: за одну секунду поверхность площадью в один квадратный сантиметр пересекают 100 миллиардов нейтрино.

блюдаемыми в анизотропии реликтового излучения и лишена проблем модели горячей темной материи.

Однако по-прежнему остается открытым вопрос: из чего же состоит темная материя? Мы полагаем, что знаем, что она должна состоять из частиц, но в природе есть разные типы частиц. Какая же из них та самая? Наиболее тривиальная мысль — взять и поискать частицы, которые мы знаем, те, что входят в *Стандартную модель физики элементарных частиц*. Для этого нам придется совершить небольшую экскурсию в эту модель.

ГЛАВА 6

ЗОЛОТОЙ ВЕК ФИЗИКИ ЧАСТИЦ: СТАНДАРТНАЯ МОДЕЛЬ

*Тигр, о тигр светло горящий,
В мраке полуночной чащи;
Чьей рукою сотворен
Соразмерный образ твой?*

Уильям Блэйк

Мир вокруг нас похож на *континуум*, то есть предметы можно разделить неопределенным образом. Концепцию элементов на основе представления о континууме предлагали Фалес Милетский, Анаксимандр, Анаксимен и Эмпедокл. Благодаря Аристотелю эти идеи выросли до философии, и по его мнению, космос состоит всего из четырех элементов: земли, воды, воздуха и огня. Позже добавили пятый элемент — эфир. Все земные предметы получали из комбинации первых четырех, а Солнце и звезды состояли из пятого элемента. Эта ошибочная концепция преобладала в западной культуре тысячелетиями. Однако была и другая: ее поддерживали Левкипп и Демокрит и их последователи, — т.н. *атомарная теория*.

Эта теория основывалась на представлении, что материя состоит из неделимых основных элементов, чем и объясняется термин *атом*, т.е. неделимый. В противоположность аристотелевой *horror vacui* (боязнь пустоты), космос с точки зрения атомистов состоит из пустого и неограниченного пространства, внутри которого беспрестанно движутся атомы, и движение это случайное, поскольку они не подвержены сверхъестественным вмешательствам. В результате сочетания атомов появлялись материальные предметы. Но что же находится между атомами? Согласно Демокриту, ничего, только пустое пространство. С его точки зрения, когда разрезают яблоко, то сам этот факт уже четко свидетельствует о существовании атома. Допустим, атом на самом деле неделим, тогда нож разрежет яблоко, только если лезвие пройдет в промежутках между атомами — согласитесь, похоже на современное представление о том, как сделана материя.

В отличие от современной науки, представления атомистов были всего лишь философией, поскольку не основывались на количественных измерениях и экспериментах. Прошло более двух тысяч лет, прежде чем эти представления поднялись на более высокий уровень. Атомистическая гипотеза Джона Дальтона дала начало первой современной теории материи. Другие ученые также пытались выделить элементы в группы с подобными свойствами: Иоганн Дёберейнер с его теорией триад, Станислао Канниццаро, Александр Шанкуртуа и Джон Ньюлендс с его законом октав. Потом пришел черед Дмитрия Менделеева, который в 1869 году предложил периодическую систему элементов, согласно которой при правильном построении элементов в порядке увеличения атомных весов регулярно изменялись их химико-физические свойства. Регулярность была настолько очевидна, что в своей *таблице элементов* Менделеев оставил пустые места для еще не открытых элементов. Он даже описал характеристики элементов, которые открыли через несколько лет, и дал им названия: *скандий, германий и галлий*.

Однако несмотря на эти открытия, все они были лишь ключами к существованию атомов. В XX веке несколько ученых, например Эрнст Мах, считали вопрос этот заумным и не предполагали возможности получить ему подтверждение. Через двадцать лет, в 1905 году, Альберт Эйнштейн объяснил *броуновское движение*¹, чем дал косвенное объяснение существованию атомов.

Потребовалось еще сто лет и огромное количество теоретических и практических усилий, чтобы сформулировать полную теорию, которая описывает основные взаимодействия и связанные с ними частицы, т.н. *Стандартную модель физики элементарных частиц*. Эта модель, основанная на теориях квантового поля, описывает все основные частицы и взаимодействия, кроме гравитации. Как мы увидим, первая из теорий поля, на которой основана эта модель, строится на *квантовой электродинамике*, описывающей взаимодействие между светом и электронами (со временем она войдет в *теорию электрослабого взаимодействия*, которая объединяет электромагнитные и ядерные силы). Теорию поля, которая описывает сильные ядерные взаимодействия, назвали *квантовой хромодинамикой* и также ввели в модель. Последним недостающим фрагментом пазла стал бозон Хиггса, открытый в 2012 году, — так проблема отсутствия массы частиц в Стандартной модели была решена.

¹ Т.е. случайное движение частиц, взвешенных в жидкости. Эйнштейн объяснил эти движения, допустив существование молекул в жидкости, которые при столкновении с частицами суспензии вызывают их движение.

6.1. Поля и взаимодействия

Как уже было сказано, у нас есть модель, которая описывает три из четырех основных взаимодействий и связанных с ними частиц: *Стандартная модель физики элементарных частиц*. По сути, эта модель и есть теория квантовых полей. Что же вкладывается в понятие поля?

Поле есть функция, задающая значение каждой точки в пространстве. Поясним на примере. В каждой точке помещения есть определенная температура, и набор всех этих температур и есть *температурное поле* помещения. Этот конкретный тип поля называется *скалярное поле*, поскольку связывает единственное значение некоей переменной с каждой точкой пространства. В случае со скалярным температурным полем каждая точка в пространстве связана с температурой (рис. 6.1).

Подобным образом, в ветреный день каждой точке пространства соответствует скорость и направление ветра. Это тоже поле, но *поле векторное*, поскольку в каждой точке необходимо знать три компонента вектора, чтобы понять, «какой дует ветер» (рис. 6.2).

Однако эти поля не являются фундаментальными, это свойства воздуха. А гравитационное и магнитное поля являются *фундаментальными полями*. Проще всего наблюдать *магнитное поле*. Попробуйте провести известный всем опыт: рассыпьте железные опилки на какую-либо поверхность, а под нее поместите магнит. И вы увидите линии магнитного поля (рис. 6.3).

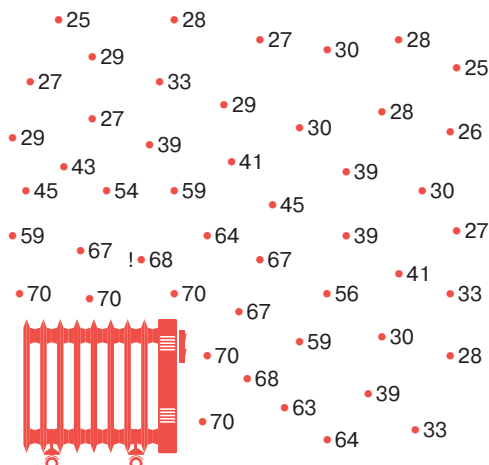


Рис. 6.1. Температурное поле в помещении. В каждой точке есть определенная температура (по шкале Фаренгейта). Рядом с обогревателем температурные значения выше, чем у более удаленных от него точек

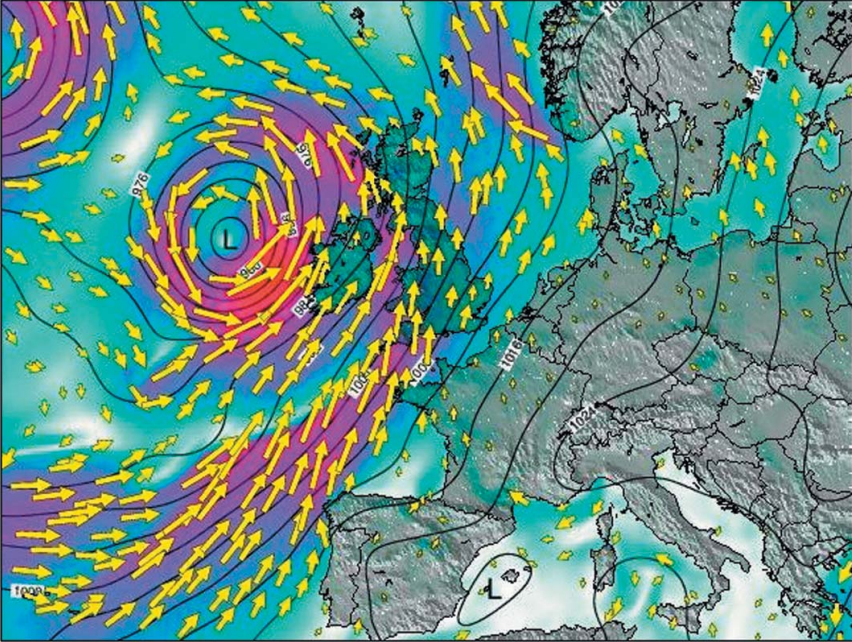


Рис. 6.2. Поле ветра в Европе. Желтые стрелки показывают направление и интенсивность ветра (чем больше стрелка, тем сильнее ветер). С разрешения: Tide-forecast.com

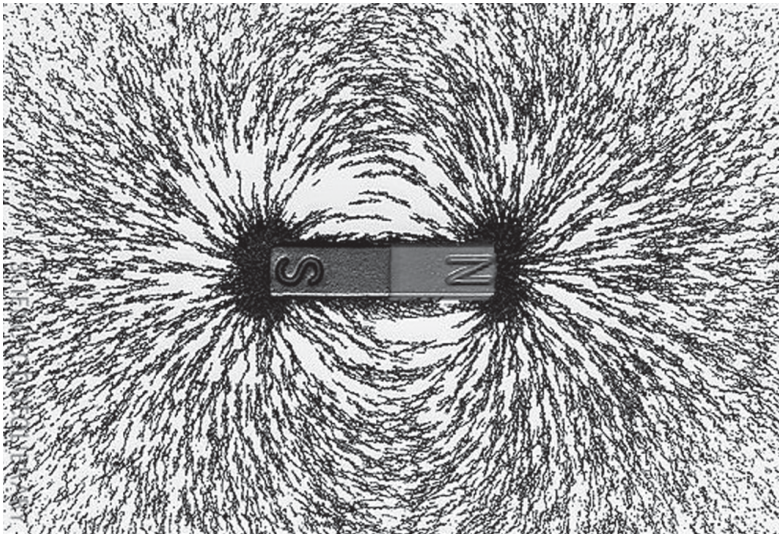


Рис. 6.3. Линии магнитного поля магнита

Классическую теорию поля предложил Майкл Фарадей. Фарадей считал, что линии, видные на рис. 6.3, т.н. *силовые линии*, — это своего рода бечевка, чье натяжение отвечает за силы притяжения и отталкивания между полюсами магнитов. Для него поле было связкой тонких линий, заполняющих пространство, в которое мы погружены. Таким образом, Фарадей дал ответ на один из открытых вопросов в «Началах» Ньютона:

Возможно, гравитация вызвана неким фактором, постоянно действующим в соответствии с определенными законами, однако насколько этот фактор материален или нематериален, я предоставляю судить моим читателям.

Таким образом, Ньютон вывел гравитационные уравнения как своего рода инструкцию, не заботясь о том, чтобы объяснить, как на самом деле это работает. Идея Фарадея наконец-то объяснила, как тела умудряются притягиваться и отталкиваться, не касаясь друг друга. Позже идею, введенную ради электромагнитного поля, Эйнштейн распространил и на гравитационное поле.

Джеймс Клерк Максвелл формализовал идею Фарадея в виде 20 уравнений, а Оливер Хевисайд сократил их число до четырех.

Еще одно фундаментальное поле — гравитационное. Соединив ньютоновскую механику и механику полей, тот факт, что Луна продолжает вращаться вокруг Земли, можно объяснить лишь тем, что Земля и Луна погружены в гравитационное поле. Земля действует на гравитационное поле, или точнее, на *гравитационный потенциал*, который его окружает. А это действует на «соседний потенциал» и так далее. Другими словами, Луна получит — не мгновенно, а со скоростью света — информацию о присутствии Земли и притянется к ней.

Приложив квантовую теорию к полям, получаем *квантовое поле*, подверженное правилам квантовой механики. В отличие от классических полей, квантовое поле не связывает число с каждой точкой, но есть функция, бесконечное число точек. В случае с квантовыми полями, если мы, например, измеряем энергию в помещении, она не может принять все возможные значения, которые есть в наличии, а только некоторый набор определенных значений. Более того, мы не можем сказать, что энергия связана с конкретной точкой поля, мы можем лишь указать вероятность, что с каждой точкой связано некое значение энергии. Сколько типов полей существует? Несколько десятков: *нейтронное, фотонное, кварковое, нейтринное* и так далее. Поля, связанные с фермионами, называются *фермионными полями*, или полями материи, а те, что связаны с бозонами, — *бозонными*, или полями-переносчиками

взаимодействия. Более того, возмущения поля могут передаваться и другим полям.

С точки зрения современной физики, реальность состоит из полей, сущностей, которые пронизывают пространство и проявляются вибрациями. Согласно этой точке зрения, частицы и античастицы — это не фрагменты материи, а пакеты энергии, или, скорее, вибрации квантовых полей. Наблюдая поле подробнее, мы видим, как оно «разрешается» в частицы. Энергия одного поля может передаться другому через взаимодействия, явление, присутствующее в процессах, в которых набор начальных частиц трансформируется в другой набор конечных частиц. Поля — это реальный строительный материал, из которого состоит материя. Более того, благодаря полям становится возможным взаимодействие, т.е. это — фундаментальные силы природы.

Поскольку поля — это сущности, распространенные в пространстве, это объясняет несколько очевидных парадоксов, связанных с поведением субатомных частиц¹.

Частицы — это просто осцилляции полей. Как у каждой дочери есть отец, так у каждой частицы есть свой «отец» — конкретное поле. Например, частицы, называемые *фотонами*, это «дочери» *электромагнитного поля*. Занятный факт: для квантовой механики в нашем мире пустое место не является полностью пустым, оно заполнено полями.

6.2. Истинный и ложный вакуум

Квантовый вакуум — это своего рода море, полное частиц и античастиц, *виртуальных частиц*, которые рождаются и быстро аннигилируют. Эти непрерывные рождения и исчезновения флуктуаций вакуума регулируются принципом неопределенности Гейзенберга. Следовательно, благодаря квантовой неопределенности, могут возникнуть малые количества энергии, в форме пар «частица — античастица», при условии, что они исчезают в очень короткое время. В результате, в каждом окружении должны быть некоторые квантовые нерегулярности. У каждого поля есть следующие характеристики и «ингредиенты»:

- энергия;
- *реальные частицы*, идентифицируемые как возбуждения самого поля; например, у электромагнитного поля есть фотоны как связанные частицы;

¹ Я имею в виду, например, делокализацию и интерференцию, которые ранее приписывали волнам, связанным с частицами, и которые объясняют непонятные в противном случае эксперименты, скажем, эксперимент Янга с двумя щелями.

- виртуальные частицы, т.е. флуктуации в вакууме, которые непрерывно исчезают и появляются;
- состояние вакуума.

Итак, что же такое вакуум?

Природа «ленива», если можно так выразиться, а значит, в физике каждая система предпочитает стремиться к состоянию, обладающему минимальной энергией. У каждого поля есть энергия, и минимальное значение этой энергии называется *вакуум*. В зависимости от энергетического профиля поля вакуум может быть истинным и ложным.

Чтобы лучше разобраться с этим понятием, рассмотрим рис. 6.4. Коричневая линия (левая панель) представляет собой энергетический потенциал, связанный с этим полем. Горизонтальная ось это значение поля, ϕ , а вертикальная — его энергия, $V(\phi)$. На рис. 6.4 (левая панель) энергетический профиль имеет вид параболы, и у него только один минимум. В минимальной точке параболы значение поля нулевое ($\phi = 0$), а у энергии минимально возможное значение. Этот минимум по определению и есть *вакуум поля*. А теперь давайте еще раз посмотрим на рис. 6.4 (правую панель). Точка, где поле нулевое ($\phi = 0$), не является точкой минимума энергии, поскольку есть две точки (области) с меньшей энергией, две маленькие «ямки» слева и справа: слева точка, в которой $\phi = -v$, а справа точка, где $\phi = +v$. Эти две точки с минимальной энергией, и, таким образом, это *истинный вакуум поля*. Точка, где поле равно нулю ($\phi = 0$), не обладает минимальной энергией и называется *ложный вакуум поля*. Это неустойчивое условие для поля (черная частица-шарик) и, будучи таковым, оно «скатывается» к минимальной энергии, т.е. в *истинный вакуум*.

Давайте выразим это иными словами, чтобы придать обсуждению физический смысл. Как уже было сказано, состояние с минимальной энергией называют *вакуумом*. Поля в вакууме подвержены флуктуациям около минимальной энергии. Эти флуктуации представляют собой виртуальные частицы. Если вакуум поля соответствует его нулевой конфигурации ($\phi = 0$), т.е. если значение поля равно нулю при минимальной энергии (рис. 6.4, левая панель), то поле имеет нулевое значение во всем пространстве и не содержит реальных частиц¹. Если же нам нужны реальные частицы в поле, то необходимо снабдить это поле энергией и привести в конфигурацию, где его значение отлично от нуля. По своей природе поле, обладающее наименьшей энергией, «очень спокойное».

¹ Однако присутствуют виртуальные частицы, флуктуации вокруг нулевого значения.

Такой тип поля (рис. 6.4, левая панель) находится в истинном вакууме: когда у поля нулевое значение, оно в состоянии минимальной энергии, т.е. в состоянии вакуума, и реальных частиц нет. В случае с полем на рис. 6.4 (правая панель) нулевая конфигурация ($\varphi = 0$) не соответствует состоянию минимальной энергии, и реальных частиц, связанных с полем, нет. Другими словами, если нам не нужны реальные частицы, связанные с полем, мы должны обеспечить поле энергией. Этот тип поля по природе «гиперактивный» и имеет тенденцию заполнять пространство реальными частицами, пока мы не потратим энергию и не «выключим ее».

Итак, поля с *истинным вакуумом* (рис. 6.4, левая панель), если не возбуждены, то имеют только небольшие возбуждения энергии вокруг нулевого значения. Поля с *ложным вакуумом* (рис. 6.4, правая панель) всегда полны частиц.

Поле на рис. 6.4 (левая панель) подобно большинству полей, например электромагнитному, а то, что на рис. 6.4 (правая панель), подобно *полю Хиггса*, речь о котором пойдет в разделе 6.7.

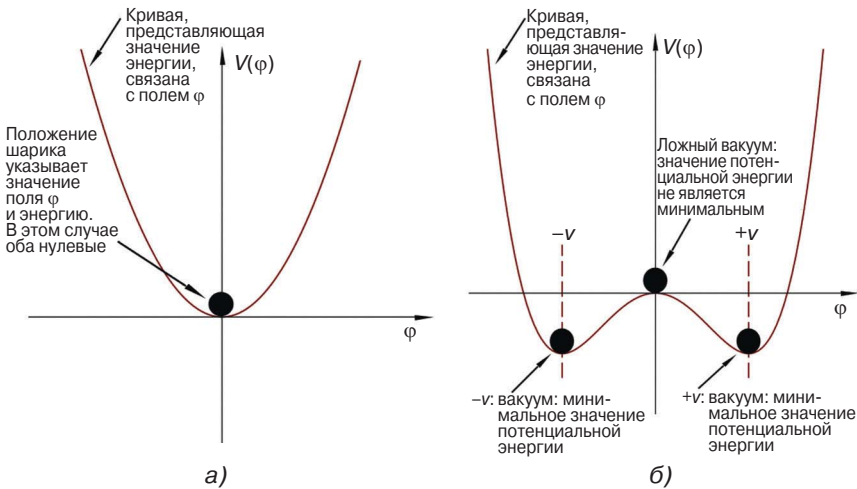


Рис. 6.4. Потенциальная энергия поля, $V(\varphi)$, с точки зрения значения поля φ . Это поле обладает минимальной энергией (черная точка) в точке, где поле φ равно нулю. Эта точка — *вакуум поля*, и никаких связанных с ней частиц нет (а). Поле с двумя минимумами: $\varphi = +v$ и $\varphi = -v$ есть точки истинного вакуума. Точка, где $\varphi = 0$, не является точкой минимальной энергии, и поэтому называется *ложный вакуум*. Видно, что когда черная частица «наверху холма», поле находится в ложном вакууме. Таким образом, оно «скатывается» в минимум, т.е. в *истинный вакуум* (б)

Возникает вопрос: возможно ли подтвердить, что вакуум с определенными характеристиками на самом деле существует? Ответ утвердительный. Есть три эффекта, которые можно объяснить благодаря существованию вакуума: *эффект Лэмба* (Лэмбовский сдвиг), *эффект Казимира* и *эффект Завтера – Швингера*.

В 1928 году Поль Дирак вывел уравнение, объединяющее квантовую механику и специальную теорию относительности. В 1947 году Виллис Лэмб и Роберт Резерфорд обнаружили крошечное различие в энергии между двумя уровнями (2s и 2p) атома водорода (разные состояния для орбиты электрона вокруг ядра). Согласно уравнению Дирака, эти два состояния должны были иметь одну и ту же энергию. Это было серьезной проблемой, поскольку уравнение давало четкие предсказания и представляло собой лучшее уравнение для понимания структуры атома. Уравнение Дирака отлично «работает»: проблема имеет отношение к существованию вакуума. Благодаря флуктуациям вакуума в каждой точке появляются и исчезают частицы и античастицы, за время, пропорциональное создаваемым энергиям частиц. Есть большая вероятность, что электроны атома, которые находятся в двух состояниях (2s и 2p), расположены близко к ядру. Флуктуации вакуума отодвигают их от протона, увеличивая их энергию. В конечном итоге за указанное расхождение в энергии отвечает вакуум. Это явление называется *эффект Лэмба*, и оно имеет большое значение, поскольку его объяснение подсказало формулировку *квантовой электродинамики*.

В 1948 году Хендрик Казимир показал, что две параллельные металлические пластины, разделенные в вакууме небольшим расстоянием, подвергаются воздействию силы притяжения (рис. 6.5). Сила возникает, поскольку структура вакуума изменяется в присутствии проводящих пластин.

Упростим ситуацию: пусть пластины погружены в вакуум. Длина волны виртуальных фотонов, расположенных вне пластин, не ограничена их присутствием, а виртуальные частицы между пластинами должны иметь длину волны, которая является целой долей расстояния между пластинами.

Таким образом, за пределами пластин происходит больше флуктуаций, чем между пластинами, что приводит к дефициту баланса энергии между пластинами, и они имеют тенденцию сближаться.

Есть ли способ «наблюдать» за квантовыми флуктуациями? Теоретически да, и называется *эффект Завтера – Швингера*, предложенный в 1931 году Фрицем Завтером. В 1951 году Джулиан Швингер дал полное теоретическое описание, основанное на работах Вернера Гейзенберга и

Ганса Эйлера. В вакууме создаются пары частиц и античастиц, которые с готовностью вновь поглощает вакуум. Если приложить достаточно мощное электрическое поле, пары можно разделить (например, электрон-позитронные пары). Однако для этого необходимы огромные поля, и пока это невозможно.

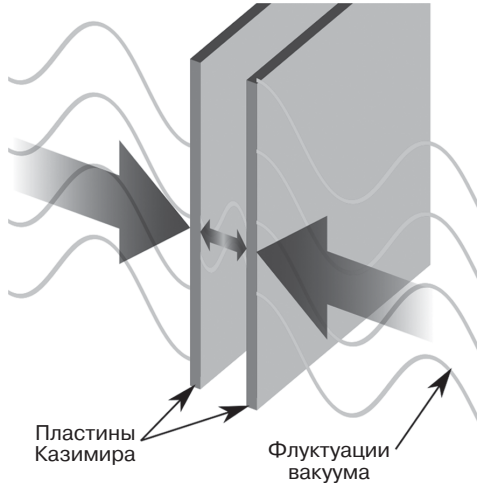


Рис. 6.5. Эффект Казимира. Между пластинами допускаются только флуктуации с длиной волны, равной целой доле расстояния между пластинами. Вне пластин длина волны виртуальных частиц такого предела не имеет, в результате чего произведенная сила имеет тенденцию сближать пластины. С разрешения: Wikipedia, Davide Mauro

Еще один ключевой момент, имеющий отношение к полям, состоит в следующем: силы или взаимодействия возникают из деформаций полей в пространстве и имеют отношение к симметриям. Итак, поля не только строительный материал для мира, но и причина взаимодействий, которые чаще называют силами. Для объяснения этого момента нам потребуется связать поля с концепцией симметрии.

6.3. От симметрий к реальности

Симметрия присутствует в нашей жизни повсюду. Мы имеем об этом лишь интуитивное представление. Например, нельзя не заметить, что бабочка на фото слева на рис. 6.6 имеет двустороннюю симметрию, а софа на фото справа несимметрична.



Рис. 6.6. Двусторонняя симметрия у бабочки и несимметричная софа

Например, если смотреть на сферу с различных направлений, то она всегда выглядит одинаково, поскольку она *инвариантна* относительно вращений. Подобным образом, если вращать цилиндр вокруг его основной оси, то он тоже выглядит одинаково. Таким образом, физическая система является симметричной, если ее свойства не меняются после совершенной с ней трансформации. Существует несколько видов симметрии, например, *непрерывная* и *дискретная*. Если вращать вазу с круглым основанием относительно основной оси, ее вид не меняется в зависимости от угла вращения. Это пример *непрерывной симметрии* (рис. 6.7, левая панель). Если у вазы шестиугольное основание, она будет выглядеть одинаково только при вращении на 60 градусов, и у нас пример *дискретной симметрии* (рис. 6.7, центральная часть). Если в этот момент мы представим себе, что бесконечно умножили вазы, как на рис. 6.7 справа, чтобы в каждой точке было по одной, у нас будет еще больше всевозможных симметрий. Если вращать все вазы на один и тот же угол, мы произведем *глобальное преобразование*, а если вращать каждую вазу на разные углы, это будет *локальное* или *калибровочное преобразование* (рис. 6.7, правая панель).

Симметрии тоже могут нарушаться. В таком случае мы говорим о *спонтанном нарушении симметрии*. Термин кажется весьма заумным и далеким от реальности. Однако это весьма распространенный процесс, и мы часто бываем его свидетелями. Приведем несколько примеров. В жизни мы не раз видели трансформацию воды в лед или льда в воду. Это примеры спонтанного нарушения симметрии. Давайте рассмотрим пример с водой в контейнере. Дадим воде охладиться, для чего поставим контейнер в холодильник.

Сначала в вазе будет вода, которая является симметричной структурой: с какой стороны на нее ни смотреть, она все время кажется одинаковой. Со временем образуются первые кристаллы льда, а потом вода замерзнет. В этот момент симметрия воды будет спонтанно нарушена,



поскольку лед – это кристаллическая структура с предпочтительными направлениями. Еще один пример – это тонкий жидкий слой, например масло на подносе. Если нагревать его снизу, мы начнем с ситуации, при которой масло ровно распределено, и дойдем до момента, когда на поверхности образуются шестиугольные соты¹. Система перешла от более высокой степени симметрии (однородное распределение в лотке) к наличию гексагональных ячеек. И в завершение темы рассмотрим еще один пример спонтанного нарушения симметрии на рис. 6.4б. Изначально поле, представленное сферой, находится в состоянии максимума. При вращении система симметрична. Ситуация со сферой наверху неустойчива и имеет тенденцию к падению, т.е. к минимуму. Когда это случится, система теряет симметрию вращения.

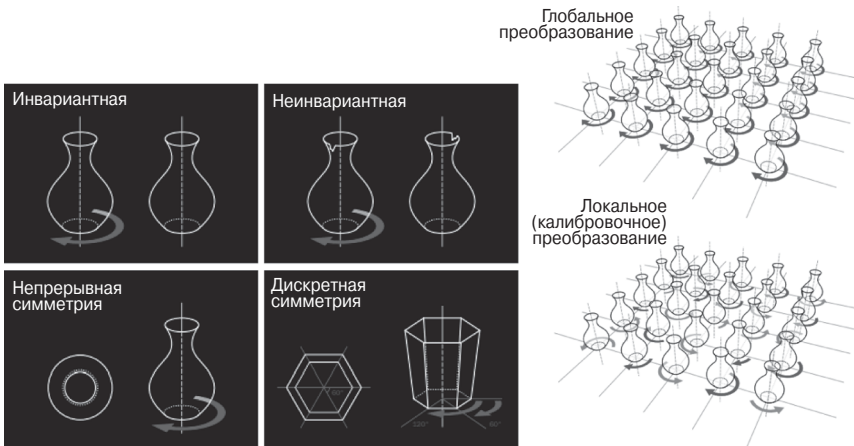


Рис. 6.7. Разные формы симметрии. С разрешения: Asimmetrie/INFN/F. Ciucchio

Если кратко, то *спонтанное нарушение симметрии* – это способ утраты симметрии после преобразования симметрии. В преобразовании система меняет свою структуру и, естественно, теряет симметрию, но лежащие в ее основе законы и уравнения все еще ее поддерживают. Иногда мы говорим о *скрытой симметрии*, чтобы подчеркнуть, что на фундаментальном уровне симметрия не утрачена.

Интересно, что явление спонтанного нарушения симметрии объясняет многие симметричные структуры, существующие в природе,

¹ Образующиеся шестиугольные соты называют ячейками Рэля – Бенара, названными по имени экспериментаторов, которые их наблюдали.

например, полосатое тело зебр и тигров, как заметил Алан Тьюринг в 1956 году, или пятна ягуара, о которых рассуждал Лучано Майани в 1990 году.

Помимо симметрий реального мира, есть и другие, в уравнениях, которые регулируют динамику физических систем. В 1918 году Эми Нётер показала, что для каждой непрерывной симметрии существует закон сохранения и соответствующее сохраненное количество. Например, инвариантность трансляции (перемещения) в пространстве приводит к сохранению импульса, произведения массы на скорость, а трансляция во времени приводит к сохранению энергии.

Непрерывные симметрии, о которых мы говорили, относятся к преобразованию пространственно-временных координат. Однако в случае преобразования полей могут существовать и *внутренние симметрии*.

Связь между симметриями и пониманием законов природы достигла пика с появлением квантовой механики. Было доказано, что калибровочная симметрия, о которой мы уже говорили, может создавать фундаментальные силы и частицы, передающие эти взаимодействия. Интересное представление и интуитивное описание значения внутренней симметрии (калибровки) и то, каким образом генерировать силы из этих симметрий, дает Хосе Игнасио Иллана в своей работе «Элементарные частицы: Сердце материи»¹. Мы приводим их ниже.

Представим себе реку, которая течет в конкретной местности. Рельеф местности — поле, поскольку каждая точка местности соответствует некой высоте, которая определяет динамику реки. Если поднять рельеф на высоту h , то, приложив *глобальное преобразование*, изменить курс реки невозможно. Значит, есть симметрия. Река продолжит свое течение, и все будет по-прежнему. Можно сказать, что «уравнения, которые описывают реку, инвариантны в случае глобального преобразования поля». Поток реки остается постоянным и представляет собой *сохраненное количество*. А теперь предположим, что мы можем провести местное преобразование поля, подняв высоту рельефа на высоту h , разную в каждой точке. В результате река не сможет течь прежним курсом, и «уравнения больше не будут инвариантны». Вода выйдет из русла, и поток больше не будет прежним. То есть сохраненного ранее количества больше нет. Для сохранения симметрии при наличии локальных преобразований необходимо добавить «компенсирующую силу» (*поле взаимодействия*, которое также называют *калибровочным* или *полем связи*) — чтобы ре-

¹ *Le particelle elementari: il cuore della materia* (RBA Italia).

ка могла войти в естественное (исходное) русло и продолжить свой путь. Очевидно, что поле взаимодействия определяется симметрией, которую желательно сохранить. Эти симметрии называют *калибровочными*.

Таким образом, происхождение фундаментальных взаимодействий — это проявление калибровочных симметрий Вселенной: симметрии регулируют взаимодействия.

6.4. Работа продолжается: строительство Стандартной модели

Суммировать приключения и открытия, приведшие к формулировке Стандартной модели физики элементарных частиц, не так уж просто, однако нельзя не рассказать об основных моментах, которые навсегда останутся в истории физики и представляют в ней важные вехи.

Одним из таких моментов было обнаружение Джозефом Томсоном в 1897 году электрона, элементарной частицы размером менее 10^{-22} м и массой 10^{-30} кг (0,511 МэВ) (см. врезку 1, Единицы измерения температуры и энергии) и открытие радиоактивности Анри Беккерелем в 1896 году. В 1898—1899 годах Эрнест Резерфорд открыл два типа излучения: альфа- и бета-излучение, а Поль Виллар открыл третий тип излучения, которое назвали гамма-излучением. Через несколько десятилетий изучение бета-излучения даст ключи к новым частицам и силам природы. Открытие радиоактивности положило конец представлению о неделимости атомов, что позволило Резерфорду в 1911 году определить распределение заряда в атоме и открыть положительный заряд в его центре, т.н. *протоны*.

Гипотеза квантования излучения Макса Планка для объяснения странностей излучения черного тела позволила Эйнштейну объяснить важное физическое явление, т.н. *фотоэлектрический эффект*: он распространил характеристики частиц на излучение. Термин *фотон*, или пакет света, который отвечает за электромагнитное взаимодействие, ввел Гилберт Льюис. Ту же гипотезу использовал Нильс Бор для объяснения атомной стабильности, допустив, что электроны движутся только по конкретным орбитам, где электрон не может излучать или поглощать энергию, что позволило объяснить спектральные линии.

В 1924 году Луи де Бройль указал, что частицы связаны с физическими свойствами волн, что привело к понятию *корпускулярно-волнового дуализма*, т.е. эти сущности нельзя описать как просто частицы или волны:

в одних экспериментах волна ведет себя как частица, а в других частица ведет себя как волна.

Совместными усилиями целого поколения физиков появилась теория, которая объяснила для систем со скоростями ниже скорости света, что происходит в мире атома. Эта теория – квантовая механика Вернера Гейзенберга и Эрвина Шрёдингера, построенная благодаря вкладу многих физиков, в том числе Планка, де Бройля, Бора, Дирака и др. Кроме того, происхождение квантовой механики в версии Гейзенберга послужило источником многочисленных забавных историй из мира физики, например о том, как колебания люстры в соборе Пизы привели к открытию закона изохронизма маятника (Галилео), или история про упавшее с ветки яблоко, которое натолкнуло Ньютона на мысль о том, что земное притяжение – это та же сила, что приводит в движение планеты. Если верить истории, рассказанной Карло Ровелли, то Гейзенберг, прогуливаясь по парку у Института теоретической физики в Копенгагене, заметил, как под фонарем прошел какой-то человек, и исчез из поля зрения. Потом Гейзенберг увидел, как он снова появился, проходя под следующим фонарем. Было очевидно, что такой крупный объект, как человек, не может обладать свойством являться и исчезать, однако в микрокосме (мире малых величин) это могло случиться. Электрон мог появляться и исчезать, делая «квантовые прыжки» между разными орбитами в атоме. В микрокосме траектория может переставать быть разумным понятием. Возможно, электрон существует только тогда, когда на него смотрят, т.е. когда он взаимодействует с фотоном. С этого эпизода и после многочисленных математических выкладок появилась первая формулировка квантовой механики в версии Гейзенберга.

На основе гипотезы де Бройля теория Шрёдингера ввела понятие *волнового уравнения*, в котором переменная, называемая *волновой функцией*, связана с вероятностью нахождения частицы в данной пространственной области. Появление этой теории, лишенной странного формализма Гейзенберга, было воспринято с большим энтузиазмом. Даже Эйнштейн заявил, что рад этому открытию, а теория Гейзенберга определенно неверна.

Помимо всего прочего, эта теория изменила классическое представление Резерфорда и Бора об атоме, согласно которому строение атома напоминало планетарную систему. В новой теории электрон был распределен в пространстве вокруг ядра как вероятностная волна в областях, называемых *орбиталями*. В 1925 году Джордж Уленбек и Сэмюэл Гаудсмит показали, что спектру атома необходимо, чтобы электроны *вращались*

(обладали спином), что в упрощенном виде и не совсем корректно объясняет сложное вращение вокруг оси частицы¹.

Спин позволяет классифицировать частицы на фермионы с полуцелым спином ($1/2\hbar$, $3/2\hbar$, $5/2\hbar$...) и бозоны с целым спином ($0\hbar$, $1\hbar$, $2\hbar$...).

В 1928 году Дирак вывел уравнение, которое описывает фермионы в релятивистском режиме, что привело его к гипотезе существования антифермиона для каждого фермиона, с противоположным зарядом и идентичной массой. В 1932 году Карл Андерсон обнаружил постулируемую античастицу в космических лучах, и ее назвали *позитроном*. В том же году Джеймс Чэдвик открыл *нейтрон*, о существовании которого делали предположение начиная с сохранения энергии в ядерных реакциях. Масса нейтрона примерно 939 МэВ, чуть больше, чем у протона (938 МэВ), а размер \hbar порядка 10^{-15} м.

6.5. Флирт света с электронами

Среди многочисленных вкладов Поля Дирака в физику есть и первая формулировка квантовой теории, описывающая взаимодействие материи и энергии. В качестве вычислительного метода использована *теория возмущений*, основанная на ряде последовательных аппроксимаций. Этот метод использовали в небесной механике для вычисления орбит планет. В качестве первой аппроксимации сделано допущение, что на движение планеты не влияет движение другой планеты, тогда вводят возмущения благодаря другим планетам. Другими словами, начинают с более простой проблемы, а потом добавляют более сложные «куски». Например, чтобы определить орбиту Земли под влиянием доминирующего гравитационного влияния Солнца, влиянием других планет на Землю в первом приближении пренебрегают, а потом добавляют их вклады. Используя аналогию, метод работает следующим образом. Допустим, вы хотите узнать цену своих антикварных наручных часов с бриллиантами. Если вы спросите часовщика, он осмотрит их и сделает первую оценку. Вы возразите, поскольку он не учел стоимость бриллиантов. В результате

¹ Некорректность этого представления была известна с самого начала. История открытия весьма любопытна. Со слов Гаудсмита (<https://www.lorenz.leidenuniv.nl/history/spin/goudsmit.html>), после того, как Уленбек и Гаудсмит написали статью относительно спина и представили ее своему руководителю, Паулю Эренфесту, Уленбек начал сомневаться и отправился поговорить с Хендриком Лоренцем, который сказал: «Да, это очень сложно, потому что выходит, что собственной энергии у электрона нет». Тогда Уленбек пошел к Эренфесту и сказал: «Не отсылайте статью, думаю, она неверна. Не может быть, чтобы электрон вращался с такой высокой скоростью и имел правильный импульс». Эренфест ответил: «Поздно, я уже отослал статью... Думаю, это красивая мысль, хотя, может, и ошибочная. Но у вас еще нет репутации, так что вам нечего терять».

будет сделана вторая, более точная оценка. Если же вы скажете, что это старинная и редкая вещь, часовщик еще раз изменит свою оценку. Другими словами, конечная цена достигается в результате ряда поправок и итераций. Однако у метода возмущений есть свои ограничения. Если бы понадобилось вычислить орбиту трех планет, обладающих примерно равными массами, то этот метод был бы практически неприменим, поскольку нет преобладающего эффекта для оценки его «улучшения» последующими вычислениями. В этом случае необходимы другие, «невозмущающие» методы или надо использовать компьютер.

Этот метод в сочетании с классической механикой был необходим для появления квантовой механики, в частности в работах Борна и Гейзенберга. Метод давал верные оценки с точностью до нескольких процентов. Попытка получить более точные оценки привела к появлению бесконечных величин. Проблему решили после Второй мировой войны Синьитиро Томонага, Джулиан Швингер, Ричард Фейнман и Фриман Дайсон, которые ввели набор методов для решения проблемы бесконечностей, т.н. *ренормализацию*.

В результате получили квантовую теорию электромагнитного поля, первую теорию квантовых полей, которую называют *квантовой электродинамикой* (КЭД). Она описывает все явления, имеющие отношение к заряженным частицам, взаимодействующим друг с другом с помощью электромагнитной силы, одновременно включая специальную теорию относительности. В этой теории заряженные частицы взаимодействуют друг с другом посредством обмена виртуальными фотонами, которые живут так мало, что их нельзя обнаружить. Например, взаимодействие двух электронов, отталкивающихся друг от друга при обмене фотоном, можно представить себе как ситуацию, во время которой два человека кидают друг другу тяжелый мяч, как показано на рис. 6.8. Лодка бросающего мяч отплывает назад. Лодка ловящего мяч тоже приходит в движение. Это похоже на то, что происходит под микроскопом, когда две частицы обмениваются одной частицей.

Вкратце взаимодействие объясняется на языке обмена виртуальных частиц. Более того, диапазон, в котором ощущается взаимодействие, обратно пропорционален массе частиц-переносчиков. Заряженные частицы взаимодействуют обменом виртуальных фотонов; кварки взаимодействуют обменом другой формы фотонов, *виртуальных глюонов*. Частицы, передающие взаимодействия, обычно называют *калибровочными бозонами*. Чем тяжелее калибровочный бозон, тем короче диапазон взаимодействия, и наоборот. Это правило не работает для теории сильных взаимодействий, где глюоны, хотя и имеют нулевую массу, ограничены внутри ядра.

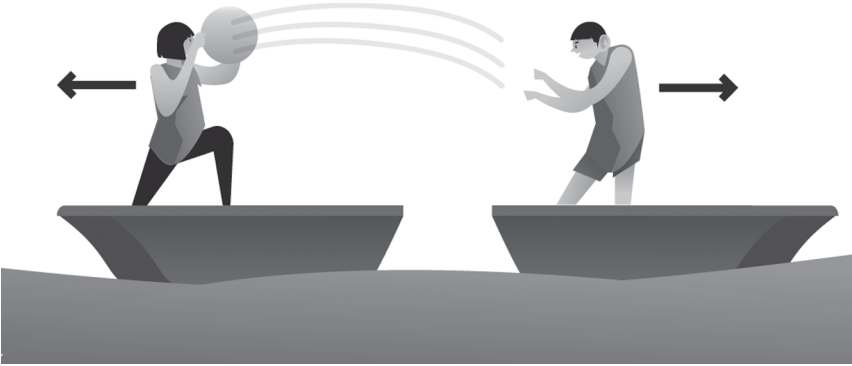


Рис. 6.8. Аналогия между перекидыванием тяжелым мячом двумя людьми в двух лодках и обменом виртуальной частицей между двумя частицами. Элементарные силы на субатомном уровне появляются, когда одна частица материи излучает виртуальную частицу. Подобным образом, в повседневной жизни, когда кидают тяжелый мяч с лодки, лодка отплывает назад, и лодка, где ловят мяч, тоже отодвигается назад

Таким образом, например, электромагнитное взаимодействие при посредстве фотона с нулевой массой будет иметь бесконечный радиус взаимодействия. Слабое ядерное взаимодействие при посредстве W^- - и Z -бозонов с массой, соответственно, 80,39 и 91,19 ГэВ (т.е. примерно в 90 и 100 раз больше массы протона) имеет маленький радиус.

В теории и материя, и взаимодействие описываются полями, и помимо описания экспериментальных данных с беспрецедентной точностью, эта теория представляет собой начало для объяснения других взаимодействий в природе, за исключением гравитации.

Кроме гравитации и электромагнетизма, есть еще две силы в природе, которые действуют на очень малых расстояниях, порядка размера атомного ядра. Первая — это *сильное ядерное взаимодействие*, оно действует на кварки. Вторая — это *слабое ядерное взаимодействие*, которое отвечает за распад частиц, например нейтрона. Оно позволяет сиять Солнцу, учитывая, что солнечная энергия происходит из преобразования фотонов в гелий и преобразования протонов в нейтроны. КЭД — это самая успешная физическая теория. Ричард Фейнман указывал на это, приводя аналогию: если измерить расстояние между Нью-Йорком и Лос-Анджелесом с точностью КЭД, это расстояние будет известно на уровне размера волоса. После успеха КЭД у теоретиков была цель — изучить эти две силы.

6.6. Странная история слабого и электрослабого взаимодействия

Дальнейшее развитие связано с изучением бета-излучения, обнаруженного Резерфордом, — процесса, который сегодня называют бета-распадом, то есть распадом протона в нейтрон, позитрон и нейтрино, когда электроны и нейтрино исходят из ядра с положительным зарядом. Резерфорд ошибочно полагал, что ядра состоят из протонов и электронов. Более того, он считал, что они связываются, образуя нейтральную частицу. В то время считалось, что в ядре происходит только электромагнитное взаимодействие, а ядро, состоящее лишь из положительных зарядов, разрушится. Более того, эта гипотеза объясняла бета-излучение, при котором электроны исходят из ядра. В 1932 году Джеймс Чэдвик повторил эксперимент, проведенный Вальтером Боте и Гербертом Бекером в Берлине, а супругами Жолио-Кюри — в Париже. При бомбардировке бериллиевой пластины ядрами ионизированного гелия излучались нейтральные частицы с массой, измеренной в ту эпоху как превышающая массу протона в 1,007 раза. Чэдвик пришел к выводу, что эта частица и есть нейтрон, предсказанный Резерфордом. Только в 1934 году стало ясно, что нейтрон — это новая фундаментальная частица, а не комбинация протона и электрона, как считал Резерфорд. Более точные измерения определили массу *нейтрона* в 939 МэВ, чуть больше протона, масса которого 938 МэВ, и размером порядка 10^{-15} м.

В 1934 году Энрико Ферми объяснил это явление как преобразование нейтрона в протон с излучением электрона из ядра. Объяснение, данное Ферми, проистекало из представления о том, что эти частицы являлись осцилляциями в квантовых полях и между ними было взаимодействие — подобная ситуация происходит с настенными часами, расположенными рядом друг с другом: каким-то непонятным по сей день образом очень скоро в результате взаимодействия звуковых волн часы синхронизируются. Таким образом, электрон и нейтрино возникают не из ничего, а в результате передачи ускорения нейтронного поля полям электрона, нейтрино и протона.

Однако есть проблема: при распаде энергия не сохраняется. На этот счет Вольфганг Паули высказал гипотезу о существовании частицы, которую Эдоардо Амальди во время разговора с Ферми окрестил *нейтрино*. Сегодня известно, что у этой частицы очень маленькая масса: она меньше массы электрона в 100 тыс. раз или вплоть до 10 млн раз.



Взаимодействие нейтрино с материей настолько слабое, что Клайд Коуэн и Фредерик Рейнс обнаружили его лишь в 1956 году после 22 лет интенсивных исследований. Чтобы понять, насколько слабо нейтрино взаимодействует с материей, подумайте о таком факте: чтобы заблокировать половину потока нейтрино, понадобится свинцовая стена толщиной больше светового года. Теорию слабого взаимодействия Ферми надо было пересмотреть, чтобы сделать ее перенормируемой как КЭД и учесть т.н. *симметрию четности (P-симметрия)*, о которой мы упоминали в главе 2. Мы помним, что в *преобразовании четности* все пространственные координаты меняют знак на противоположный: (x, y, z) становится $(-x, -y, -z)$. Слабым взаимодействиям «не нравится» подчиняться этому правилу (более строго, слабые взаимодействия не инвариантны при этих преобразованиях). Это значит, что слабые взаимодействия ведут себя по-разному для данной системы и для ее зеркального отражения.

В 1956 году Джулиан Швингер предложил *калибровочную теорию* для слабого взаимодействия, а после открытия в 1983 году частиц W^+ и W^- предположил, что поскольку фотон — это переносчик электромагнитной силы, то эти частицы, которые являются бозонами, — переносчики слабой силы. Чтобы решить некоторые технические проблемы, Шелдон Глэшоу и Абдус Салам добавили третью частицу, бозон Z^0 .

Калибровочная симметрия не позволяет частицам иметь массу, но на самом деле согласно наблюдениям у бозонов W^+ , W^- , Z^0 и кварков есть масса. Чтобы решить эту проблему, необходимо убедиться в том, что симметрию удалили некоторым определенным образом, т.е. необходим переход от ситуации, в которой у частиц нет массы, к ситуации, когда она есть. Используя термин, введенный Роуз Бейкер и Шелдоном Глэшоу, необходимо *спонтанное нарушение симметрии*.

К сожалению, есть и еще одна проблема: считалось, что в каждой теории, совместимой со специальной теорией относительности, в результате нарушения симметрии должны появиться частицы без массы, т.н. *бозоны Намбу — Голдстоуна*. Эта мысль была даже закреплена в теореме.

В 1961 году Стивен Вайнберг приехал в Императорский колледж (в Лондоне), чтобы обсудить проблему с Абдусом Саламом. Они пришли к заключению, что нет способа избежать появления таких частиц. Этот нерадостный вывод привел к т.н. теореме Голдстоуна, опубликованной в 1962 году Голдстоуном, Саламом и Вайнбергом. Единственный физик, понимавший, что у этого правила есть исключение, был Филип Андерсон. В 1963 году он указал, что в лаборатории можно отыскать противоположный пример для *теоремы Голдстоуна*, в процессе наблюдения за нарушением спонтанной симметрии в осцилляциях электронной плазмы

или обретения фотонами массы в сверхпроводниках. В обоих случаях появлялись бозоны Голдстоуна, но увеличивалась масса. Однако это происходило в нерелятивистской системе, и было необходимо проверить, может ли это произойти в теории квантовых полей.

Способ избежать теоремы Голдстоуна и решить проблему предложили в 1964 году три группы исследователей: Франсуа Энглер и Роберт Браут в Брюсселе, Питер Хиггс в Эдинбурге и два американца (Джеральд Гуральник и Карл Хаген) и англичанин (Том Киббл). Вкратце было показано, что хотя бозоны Голдстоуна и появлялись, они не материализовывались, поскольку были «поглощены», как мы скоро увидим.

По различным причинам, как часто происходит в физике, механизм для решения этой проблемы назвали по имени лишь одного из участников: *механизм Хиггса*.

После формулирования указанного механизма в 1967 году Вайнберг предложил единую теорию слабого и электромагнитного взаимодействия и ввел в нее указанный механизм. В 1971 году Герард т'Хофт доказал, что теория была перенормируема, т.е. непротиворечива.

6.7. Механизм Хиггса

Частицы Стандартной модели можно разделить на две группы. С одной стороны, есть частицы, которые измеряют взаимодействия, а именно фотоны, W^+ , W^- , Z^0 и глюоны, а с другой стороны — частицы материи, а именно, кварки и лептоны.

К сожалению, существовала проблема: для симметрии у частиц этой модели должна была быть нулевая масса. Был необходим некий механизм нарушения симметрии, но в результате нарушения симметрии появлялись безмассовые бозоны Намбу — Голдстоуна. Был нужен какой-то трюк для того, чтобы эти бозоны исчезли или спрятались. И таким «трюком» стал механизм Хиггса, благодаря которому голдстоуновские бозоны «съедаются» калибровочными бозонами, которые приобретают массу. Как же это происходит?

Как известно, у частиц есть спин, который в классической механике и в ранней квантовой теории описывают как вращение¹. Например,

¹ Как уже говорилось, представление о спине как о вращении вокруг оси некорректно. Эта характеристика не была предусмотрена нерелятивистской квантовой механикой, ее ввели в результате ряда экспериментов. Она автоматически выводится в релятивистской версии квантовой механики с помощью уравнения Дирака и не соответствует вращению вокруг оси.

у электрона спин $1/2$, и в измерениях есть только два *состояния спина*, или *состояния поляризации*, или *степени свободы*, которые представляют способы вибрации поля: $1/2$ и $-1/2$. Каждое состояние поляризации можно рассматривать как различную частицу или различную степень свободы. *Важно помнить: массивные частицы имеют три степени свободы.*

Для частицы со спином 1 есть две возможности: если у частицы есть масса (например, как у W- и Z-бозонов), могут быть значения $-1, 0, 1$. У этой частицы три степени свободы, т.е. поля массивных частиц могут иметь вибрацию вверх-вниз (и наоборот), слева направо (и наоборот) и вперед-назад (и наоборот). Если у частицы нет массы, как в случае с фотонами, то мы найдем две величины, -1 и $+1$, т.е. две степени свободы¹. Поэтому поля частиц без массы могут колебаться только двумя способами: вверх-вниз (и наоборот) и справа налево (и наоборот). Эти осцилляции представлены в Приложении В (рис. В1).

Суммируем: у скалярного поля со спином 0 есть только одна степень свободы. Векторные поля со спином 1 имеют две степени свободы, если они безмассовые, и возбуждение перпендикулярно направлению пространства ($1, -1$). Если они массивные, то степеней свободы три, с двумя перпендикулярными возбуждениями ($1, -1$) и одним продольным (0) (см. Приложение В).

Итак, каким образом частицы W^+ , W^- и Z^0 приобретают свою массу?

До нарушения симметрии электрослабое взаимодействие передается посредством четырех полей: B, W_1, W_2 и W_3 (рис. 6.9) — и соответствующие бозоны были все безмассовые.

Мы можем рассматривать их как прародителей полей фотона — и полей W^+ , W^- и Z^0 . Следовательно, у них только две степени свободы, возбуждения, перпендикулярные направлению распространения, и двигаются они со скоростью света. Чтобы наделить их массой, необходима третья степень свободы, продольная (осцилляция вперед-назад). Нам нужны три скалярные частицы, которые в сочетании с W_1, W_2 и W_3 обеспечат каждую недостающей продольной степенью свободы. Эти скалярные частицы, бозоны Голдстоуна, появились в конце электрослабой эры, когда время жизни Вселенной было 10^{-12} с, а температура 10^{15} К в фазе нарушения электрослабой симметрии, упомянутой в главе 2. Как описано в Приложении В, потенциал Хиггса претерпел преобразование. Поле «скользит» из ложного вакуума в истинный, как мяч, который скатывается с вершины холма в долину (см. рис. В3).

¹ Следует отметить, что если найденное значение 0, то это не значит, что у частицы нет спина.



Рис. 6.9. Переносчики электрослабого взаимодействия



Рис. 6.10. Три безмассовых голдстоуновских бозона H^+ , H^- , H^0 и бозон Хигса h (массивный)

В данном случае были сгенерированы четыре скалярные частицы (см. рис. 6.10), которые мы называем H_1 , H_2 , H_3 и H , а также H^0 , H^+ , H^- и h , три из которых (H^0 , H^+ , H^-) являются бозонами Голдстоуна, которые помогут W_1 , W_2 , W_3 стать частицами с массой. Частицы H_1 , H_2 , H_3 , они же H^0 , H^+ , H^- , предоставят недостающую степень продольной свободы, необходимой частицам W_1 , W_2 , W_3 , чтобы получить массу.

После поглощения частицами W_1 , W_2 , W_3 частиц H_1 , H_2 , H_3 , т.е. недостающей степени свободы, они тут же получают массу. На рис. 6.9–6.13 показано, как бозоны W_1 , W_2 , W_3 , съев H^0 , H^+ , H^- , преобразуются в частицы W^+ , W^- и Z^0 . W_1 и W_2 объединяются и, съев H^+ , порождают W^+ (рис. 6.11).

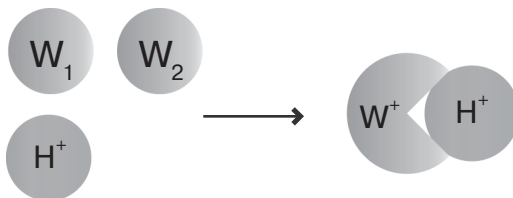


Рис. 6.11. Поколение W^+ из комбинации W_1 и W_2 и поглощение H^+ . С разрешения: Modification of work by Flip Tanedo, Quantum Diaries

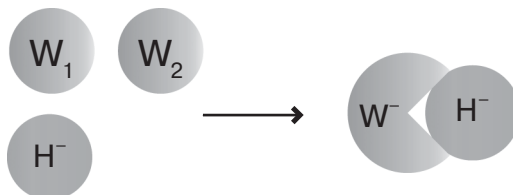


Рис. 6.12. Поколение W^- из комбинации W_1 и W_2 и поглощение H^- . С разрешения: Modification of work by Flip Tanedo, Quantum Diaries

Подобным образом W_1 и W_2 объединяются и, съев H^- , порождают W^- (рис. 6.12).

Z -бозон возникает при объединении W_3 и B и поглощении H^0 . W_3 и B также сочетаются (рис. 6.13). Ни одного бозона Голдстоуна не остается, и потом фотон (комбинация W_3 и B) остается без массы, а h , т.е. бозон Хиггса, обнаруженный в 2012 году, остается свободным.

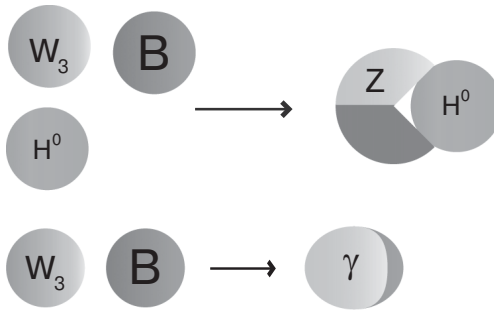


Рис. 6.13. Наверху: поколение Z^0 из комбинации W_3 и B и поглощение H^0 .
Внизу: поколение фотона — из комбинации W_3 и B . С разрешения: Modification of work by Flip Tanedo, Quantum Diaries

В Приложении В дано более подробное описание механизма Хиггса.

В случае с фермионами (кварками и лептонами) приобретение массы происходит иначе, при помощи т.н. *взаимодействия Юкавы* — взаимодействия, которое соединяет фермионное поле с полем Хиггса. Интуитивно эти частицы в движении «ощущают» присутствие поля Хиггса, которое заполняет все пространство, и начинают с ним взаимодействовать. Когда фермионы перемещаются в пространстве, они взаимодействуют с полем Хиггса. Используя не слишком корректную, но эффектную аналогию, можно сказать, что поле Хиггса замедляет их, как замедлял бы липкий мёд движущийся в нем предмет. Застрыв в поле Хиггса, частицам все труднее двигаться, как будто у них есть масса, а их скорость становится меньше световой. Частицы, например электроны, приобретают массу, когда бозон Хиггса «оплетает» два полюса электрона. Для этой операции необходима энергия, которую дает поле Хиггса, воспринимаемая как масса покоя частицы. Масса растет по мере роста интенсивности взаимодействия.

Если бы мы могли разрушить поле Хиггса, мы бы вернулись к первоначальному состоянию с четырьмя безмассовыми бозонами. Кварки бы потеряли свою массу, два компонента электрона с разной поляризацией разъединились бы и потеряли свою массу, а атомы и материя аннигилировали.

Возникает закономерный вопрос: почему другие поля не могут делать то, что делает поле Хиггса? Что же отличает поле Хиггса от других полей, например, от электромагнитного? Подробно это отличие описано в разделе 6.2, где мы говорили о полях. В отличие от других полей, поле Хиггса в состоянии минимальной активности всегда отлично от нуля, $\varphi = 0$, как видно на рис. 6.4 (правая панель) и на рис. 6.14. Бывает, что у поля Хиггса энергия больше, когда оно равно нулю, т.е. когда $\varphi = 0$, чем когда оно не нулевое. В отличие от обычных полей, если мы хотим, чтобы поле Хиггса не наводняло пространство своими бозонами, надо обеспечить энергию. Вот что отличает поле Хиггса от других полей. У чувствительных к нему частиц всегда есть вероятность взаимодействовать с ним и приобрести массу.

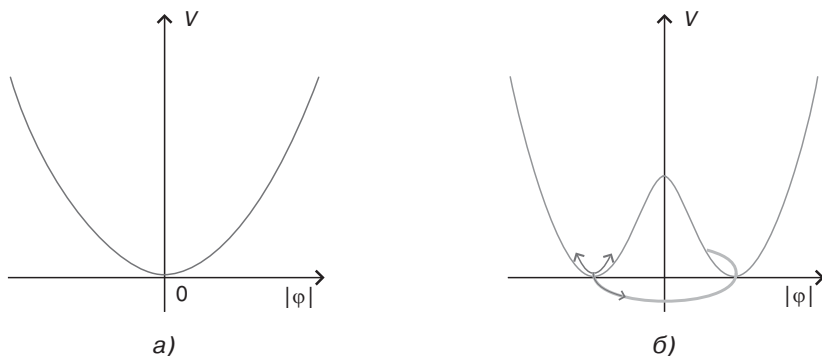


Рис. 6.14. Потенциал V поля, например электромагнитного (слева) и поля Хиггса (справа). Когда поле «скатывается» с холма к минимуму, у него может быть осцилляция вверх-вниз, в результате чего образуется бозон H , и на длине окружности минимума образуются бозоны H_1, H_2, H_3

Интуитивное описание механизма Хиггса появилось благодаря Дэвиду Миллеру, физику из Университетского колледжа Лондона. Он выиграл приз, обещанный министром иностранных дел Уильямом Уолдгрейвом (бутылка шампанского) физику, который сумеет объяснить просто, но емко, как работает механизм и для обнаружения чего его использовали.

Миллер представил салон, равномерно заполненный людьми, беседующими друг с другом, в момент, когда там появляется очень важный человек. По мере своего передвижения он притягивает к себе людей, и образуется толпа. В результате возникает сопротивление его движению, и выглядит это так, словно он получает массу. Частица, перемещающаяся в поле Хиггса, оказывается в похожей ситуации.

Понятие бозона Хиггса можно объяснить, представив себе, что в зале раздался чей-то голос. Те, кто услышали его первыми, передают соседям. Помещение заполняет волна «групп людей», которые, как и очень важный человек, «получают массу». Бозон Хиггса похож на такое сборище.

Часто говорят, что бозон Хиггса дает массу объектам. Это не совсем правильно. Механизм Хиггса обеспечивает массу только элементарным частицам. Важно понимать, что масса любого предмета, например стола, есть результат поля Хиггса лишь в минимальной степени. Привычные нам предметы состоят из протонов и нейтронов.

Каждый протон состоит из двух «верхних» кварков (up-кварков) с массой 2,3 МэВ и одного «нижнего» кварка (down-кварк) с массой 4,8 МэВ. Поэтому если бы масса протона определялась бы только входящими в него кварками, то она была бы $2,3 + 2,3 + 4,8 = 9,4$ МэВ. На самом же деле, у протона масса намного больше, а именно 938 МэВ. А значит, механизм Хиггса, дающий массу кваркам, отвечает всего лишь за 1% массы протона. В основном масса протона объясняется флуктуациями вакуума (рис. 6.15). Кварки, составляющие протон, ограничены протоном, внутри которого квантовый вакуум подвергается флуктуациям, которые создают и разрушают кварки и глюоны в очень краткий период времени. Взаимодействие кварков, составляющих протон, с флуктуациями вакуума генерирует энергию (см. эффект Казимира, Лэмба и Швингера в главе 6).

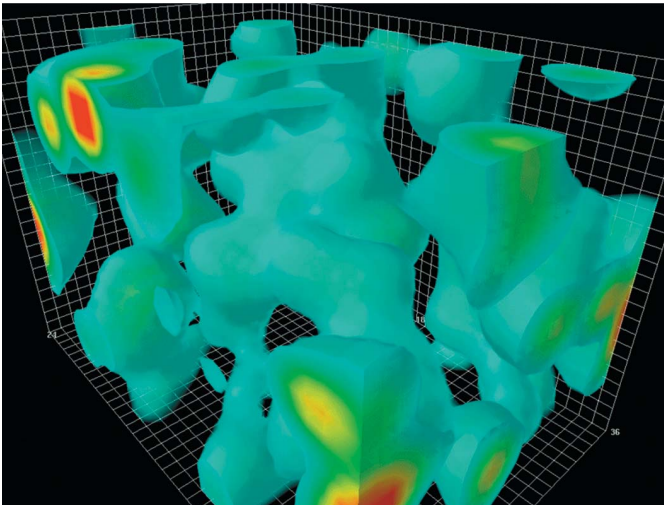


Рис. 6.15. Флуктуации вакуума в протоне. С разрешения: Wikipedia, Derek B. Leinweber

Если бы поля Хиггса не существовало, кварки и лептоны не имели бы массы и передвигались в пространстве со скоростью света. И в результате протоны, нейтроны, ядра и атомы не образовали бы Вселенную, а значит, и нас.

До настоящего момента мы говорили про теорию о том, как элементарные частицы получают массу. А есть ли доказательство тому, что это на самом деле так? Да, есть. Большую часть механизма Хиггса ($3/4$) открыли в 1983 году в ЦЕРНе Карло Руббиа и Саймон ван дер Меер, при обнаружении бозонов W^+ , W^- и Z^0 . А вишенку на торте, т.е. сам бозон Хиггса, открыли 4 июля 2012 года, тем самым завершив построение Стандартной модели.

6.8. Динамика цветового заряда и атомное ядро

Тем временем благодаря исследованию космического излучения идентифицировали несколько частиц. В 1936 году Карл Андерсон, открывший позитрон, вместе с Сетом Неддермеером обнаружили отрицательно заряженную частицу, как электрон, но в 200 раз тяжелее. Ее назвали *мю-мезон*.

Мезон — это частица, состоящая, как мы увидим, из двух других элементарных частиц: кварка и антикварка. Эти частицы «ощущают» сильное ядерное взаимодействие.

Приняли новую частицу не слишком тепло, поскольку было неясно, почему у электрона должен быть более тяжелый родственник. Физики были настолько изумлены, что Исидор Айзек Раби, узнав об этом открытии, воскликнул: «А кто ж его заказывал?»

Более того, физики не осознавали, что в действительности эта частица не мезон, а именно родственник электрона, но в 200 раз тяжелее. Как и нейтрино, он принадлежит к семье лептонов, которые «ощущают» слабое ядерное воздействие. А в 70-х годах прошлого века история повторилась, и обнаружился еще один родственник электрона и мюона — *тау*, или *тау-мезон*, с массой в 3500 раз больше, чем у электрона. Только в 1947 году открыли мезоны, которые предсказал Юкава, — *пион*, или *пи-мезон*, и *каон*, или *K-мезон*.

Для изучения глубинной структуры материи в 50-е годы прошлого века начали строить ускорители частиц. Ускорители частиц позволяют производить столкновения с энергиями, намного большими, чем энергии частиц, вовлеченных в столкновение, производя в результате частицы с большей массой. Согласно уравнению $E = mc^2$, для создания частицы

необходимо, чтобы энергия была больше, чем ее масса в состоянии покоя. По мере увеличения энергий ускорителя частиц число производимых частиц стало настолько велико, что заговорили о *зоопарке частиц*.

Мюррей Гелл-Манн и Ювал Неeman показали, что частицы можно организовать в двухмерную схему, т.н. «Восьмеричный путь», поскольку они имели геометрическую структуру октетов.

Новые частицы принадлежали к семье адронов. Физики предположили, что эти частицы на самом деле не были элементарными, и в 1964 году Гелл-Манн и Джордж Цвейг предложили *модель кварка*, подтвержденную в 1968 году экспериментально на Стэнфордском линейном ускорителе (SLAC), разделив внутренние свойства кварков на группы с помощью терминов *up* (*u*) – вверх, *down* (*d*) – вниз, и *strange* (*s*) – странные. Модель описывает фотон как состоящий из трех кварков *uud*, а нейтрон – как комбинацию *udd*. Частицы пионы состоят из кварка и антикварка. Однако у модели есть один недостаток. Частица (барион) Δ^{++} состоит из трех верхних кварков – это нарушает принцип исключения Паули. Решение предложили Моо-Юнг Хан, Йохиро Намбу и Оскар Гринберг: допустить существование нового квантового числа для кварков, т.н. *цветового заряда*. Это на самом деле своего рода заряд (подобный электрическому, но в то же самое время с рядом отличий). Поэтому у каждого из этих кварков три разных цветовых заряда, и внезапно число кварков утроилось. Хан и Намбу предположили, что сильное взаимодействие переносится восемью калибровочными бозонами, т.н. *глюонами*. Вот таковы представления в теории сильного взаимодействия, *квантовой хромодинамики*, название которой произошло от греческого слова *chrōma* – цвет. Дэвид Гросс, Фрэнк Вильчек и Хью Политцер показали, что в отличие от электромагнетизма, цветовая сила затухает с расстоянием, явление это называется *асимптотическая свобода*. Кроме того, цветовая сила увеличивается, когда кварки пытаются удалиться, что приводит к тому, что свободные кварки увидеть невозможно. Это явление называется *удержание (конфайнмент)*. Сегодня, кроме верхних кварков, нижних кварков и странных кварков, известны еще три вида кварков: *charm* (*c*) – очарованный, *bottom* (*b*) – прелестный, и *top* (*t*) – истинный. Кварки соединяются в три пары: (*u, d*), (*c, s*), (*t, b*) – с растущей массой и каждый с одинаковой парой зарядов, $2/3e^-$, $-1/3e^-$. Следовательно, у кварков три поколения частиц, как и у лептонов: (e^-, ν_e), (μ, ν_μ), (τ, ν_τ). Кварки обнаружили между 70-ми и 90-ми годами прошлого столетия. Последний и самый тяжелый из кварков, истинный, наблюдали в 1995 году в Фермилабе (Национальная ускорительная лаборатория Ферми Министерства энергетики США).

6.9. Заключение: частицы и взаимодействия Стандартной модели

6.9.1. Частицы

Фундаментальные строительные блоки для создания мира — это поля. Однако их колебания проявляются как частицы. В Стандартной модели два больших семейства частиц: фермионы и бозоны.

Фермионы получили название по имени Энрико Ферми и подчиняются *принципу исключения Паули*. Они следуют *статистике Ферми — Дирака* и, следовательно, у них полуцелый спин ($1/2\hbar, 3/2\hbar, 5/2\hbar\dots$), и они являются составляющими материи. Есть два типа фермионов: кварки, составляющие протоны и нейтроны, и лептоны, составляющие электроны, мюоны, тау-частицы, нейтрино и их соответствующие античастицы.

Бозоны назвали по имени Шатъендраната Бозе, они следуют *статистике Бозе — Эйнштейна* и согласно *теореме о связи спина со статистикой* имеют целый спин ($0\hbar, 1\hbar, 2\hbar\dots$).

Как видно на рис. 6.16, фермионы, согласно принципу исключения Паули, занимают намного больше пространства, чем бозоны. Слева представлен газ из бозонов, а справа из фермионов при температуре, близкой к абсолютному нулю ($-273,16$ градусов Цельсия). Бозонный газ сжимается с образованием *конденсата Бозе — Эйнштейна*. Фермионы не могут поместиться в состояние, которое занимает мало места. Они распределяются так, чтобы занять энергетические состояния растущей энергии вплоть до состояния максимальной энергии, т.н. *энергии Ферми*. Вот почему фермионы являются составляющими материи, а бозоны — это «векторы взаимодействия».

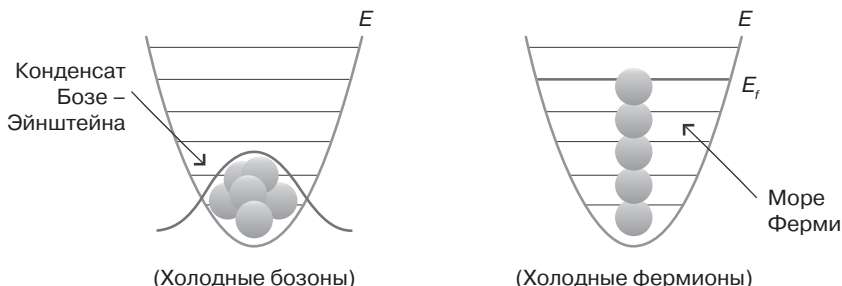


Рис. 6.16. Бозоны и фермионы. *Источник:* Modification of work by Fred Bellaiche

Стандартная модель элементарных частиц

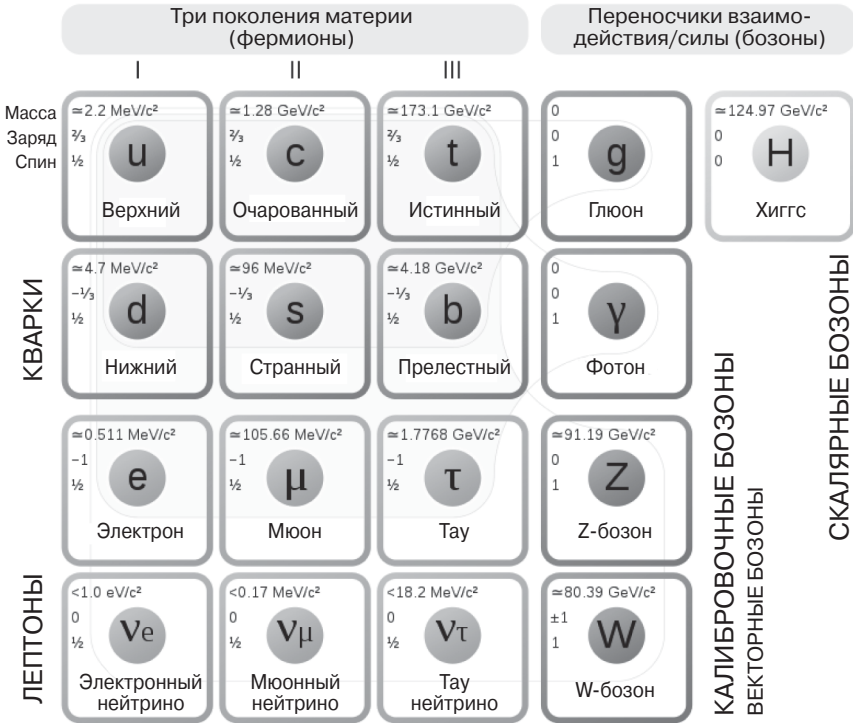


Рис. 6.17. Частицы и взаимодействия в Стандартной модели. С разрешения: Wikipedia

Бозоны разделяются на *калибровочные* (векторы, которые являются переносчиками сил) и на *мезоны*, устойчивые частицы, состоящие из кварка и его античастицы (антикварка). Частицы, состоящие из большого числа частиц, например протоны и нейтроны, и атомные ядра могут вести себя как бозоны или фермионы в зависимости от суммарного спина. Есть еще одна классификация частиц согласно силам, которым они подвергаются, или по их массе, а именно:

1. *Адроны* (от греческого «сильный») – это частицы, подверженные сильному ядерному взаимодействию, и их можно разделить на
 - *Барионы* (от греческого «тяжелый»): это фермионы. Состоят из ядерных частиц, барионов, например протонов, нейтронов, частицы Λ , Σ , Δ , Ξ , Ω (и соответствующих им античастиц) и более тяжелые и неядерные частицы, *гипероны*. Барионы не являются элементарными частицами, но состоят из *кварков*.

Существует шесть типов кварков: *верхний* (u), *нижний* (d), *странный* (s), *очарованный* (c), *прелестный* (b) и *истинный* (t). Кварки соединяются в три пары — (u, d), (c, s), (t, b) — растущей массы, и у каждого одинаковая пара заряда $\frac{2}{3}e^-$, $-\frac{1}{3}e^-$, (где e^- — это заряд электрона). У каждого кварка три *цветных заряда*, поэтому всего 18 кварков. Протоны состоят из двух верхних кварков (u) и одного нижнего (d): (uud). Нейтроны состоят из одного верхнего кварка и двух нижних кварков (udd). Масса протона примерно 938 МэВ, а нейтроны чуть тяжелее — 939 МэВ, размер порядка 10^{-15} м. Вне ядра нейтроны неустойчивы и имеют среднюю продолжительность жизни приблизительно 15 минут. Протоны почти бессмертны: средняя продолжительность жизни 10^{34} лет, намного больше, чем возраст Вселенной. Средняя продолжительность жизни протонов имеет значение, поскольку некоторые теории Великого объединения (GUT) — теории, объединяющей сильное, слабое и электромагнитное ядерное воздействие, — требуют распада барионов. Барионам приписывают т.н. *барионное число*, причем для барионов $B = +1$, для антибарионов $B = -1$. Для других частиц, мезонов и фермионов, $B = 0$. Барионное число почти всегда сохраняется, т.е. одинаково до реакции и после реакции.

- *Мезоны* (от греческого «средний») — это бозоны, подверженные сильному взаимодействию с промежуточными массами между барионами и лептонами. Состоят из кварка и антикварка.
- *Лептоны* (от греческого «светлый»). Они не подвержены сильному взаимодействию, это элементарные частицы, фермионы со спином $\frac{1}{2}$. Примерами этого семейства являются заряженные частицы, например электроны с массой примерно 10^{-30} кг (0,511 МэВ) и размером меньше 10^{-22} м, *мюоны* с массой в 207 раз больше, чем у электрона, *тау-частицы* с массой в 3500 раз больше, чем у электрона, и их античастицы. К этому же семейству относятся нейтральные частицы, *нейтрино*. Масса нейтрино от 10 000 до 1 миллиона раз меньше, чем у электрона. Они бывают трех видов: *электронное*, *мюонное* и *тау-нейтрино*, — могут осциллировать, т.е. преобразуются друг в друга (*нейтринные осцилляции*). Как и у кварков, у лептонов три поколения частиц: (e, ν), (μ , ν_μ), (τ , ν_τ). Как и барионам, лептонам приписывают лептонное число: $L = +1$ для частиц, $L = -1$ для античастиц и $L = 0$ для адронов.

Таким образом, у нас есть три семейства лептонов, шесть частиц, и три семейства барионов, еще шесть частиц. Каждой частице соответствует античастица равной массы с противоположным зарядом.

Интересный факт: материя состоит из фермионов и только из частиц первого семейства, а именно кварков u и d и электронов. И тут возникает закономерный вопрос: зачем тогда два других семейства частиц, если они не составляют материю, и зачем нужна иерархия массы? Этот вопрос, как и многие другие, как мы увидим в конце раздела, свидетельствует об ограничениях *Стандартной модели*.

Еще один недостаток модели состоит в том, что у нейтрино нет массы, хотя явление осцилляций нейтрино, т.е. преобразование одного из трех типов нейтрино в другие, подразумевает, что у них есть масса, какой бы маленькой она ни была. Один из вариантов решения, подробнее описанный в Приложении Г, следующий: есть еще один тип нейтрино, т.н. *стерильный нейтрино*, который взаимодействует с другими частицами только посредством гравитации и может также взаимодействовать с другими нейтрино с помощью механизма осцилляций нейтрино. Благодаря механизму «качели» (рис. 6.18) масса нейтрино обратно пропорциональна массе стерильного нейтрино. Если у последнего масса порядка 10^{16} ГэВ, то у нейтрино масса примерно 10^{-2} эВ, как и ожидаемая масса нейтрино.

Этот механизм основан на существовании новой физики по шкале Теории Великого объединения, 10^{15} – 10^{16} ГэВ.

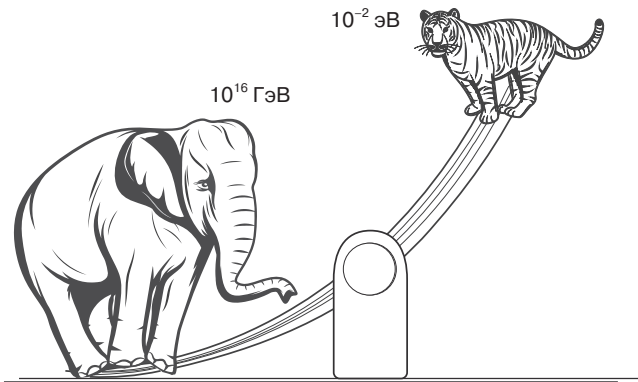


Рис. 6.18. Механизм «качели». Чем больше масса справа, у стерильного нейтрино (см. Приложение Г), тем меньше масса обычного нейтрино

6.9.2. Взаимодействия

В природе есть четыре взаимодействия, или силы: *гравитационная, электромагнитная, сильная ядерная и слабая ядерная сила.*

Стандартная модель описывает только последние три.

- *Электромагнитная сила.* Может притягивать и отталкивать, уменьшается пропорционально квадрату расстояния. Отвечает за электромагнитные явления (излучение и поглощение излучения) и химические реакции. Она удерживает электроны вокруг ядер. Электромагнитная сила переносится *фотонами*.
- *Сильное ядерное взаимодействие.* Наиболее сильное. Отвечает за существование атомного ядра, радиус действия порядка размера протона и растет по мере уменьшения расстояния. Переносится восемью бозонами, *глюонами*.
- *Слабое ядерное воздействие.* Отвечает за радиоактивный распад и вносит вклад в сияние звезд. У него три переносчика: бозоны W^+ , W^- , Z^0 , которые, в отличие от переносчиков других сил, имеют массу, соответственно, в 90 и 100 раз тяжелее массы протона. Их масса проистекает непосредственно из механизма Хиггса. Слабая и электромагнитная силы являются проявлением единой силы — *электрослабой силы*.
- *Гравитационная сила.* Хотя Стандартная модель ее не описывает, она имеет фундаментальное значение. У нее есть невидимый теоретический переносчик, *гравитон*. Это самая слабая сила, в 10^{25} раз менее интенсивная, чем слабая, в 10^{36} раз слабее электромагнитной и в 10^{38} раз слабее сильной, но она преобладает на больших пространствах и во Вселенной. Она всегда притягивает и отвечает за образование структур и вращение планет вокруг звезд, галактик и так далее.

Бозон Хиггса, открытый в 2012 году, обеспечивает массой элементарные частицы, как кварки и бозоны W^+ , W^- , Z^0 . Его масса 125 ГэВ, намного меньше теоретически ожидаемой величины. Эта проблема, которую мы будем обсуждать в следующей главе, обычно указывает на *проблему иерархии*, а ее решение подразумевает существование физики за пределами Стандартной модели.

Двенадцать элементарных частиц (не считая цветового заряда кварка, в результате чего их бы стало 24) ощущают различные силы не одинаково. Все «чувствуют» гравитационную силу, но только заряженные воспринимают электромагнитную силу. Сильное взаимодействие воспринимают только кварки.

Протоны, нейтроны и электроны образуют *атомы*. Самый простой атом, атом водорода, состоит из одного протона и одного электрона. Атом золота состоит из 79 протонов и 118 нейтронов, и для электрической нейтральности 79 электронов. В квантовой механике¹ атом — в основ-

¹ В теории квантового поля это уже не так. Пространство между электронами и протонами содержит виртуальные частицы.

ном пустая структура. Чтобы вы имели представление: если у ядра был бы диаметр теннисного мяча (7 см), то ближайший электрон был бы на расстоянии 3 км.

Хотя Стандартная модель представляет собой очень удачную теорию с невероятной точностью, все же она не является всеобъемлющей, поскольку не в состоянии во всей полноте объяснить природу мира. Остается несколько открытых вопросов. Например, почему мир состоит лишь из одного поколения кварков и лептонов, а в природе их целых три? Являются ли кварки и лептоны на самом деле элементарными частицами? Модель не определяет массу, но можно получить ее экспериментальным путем. Есть ли способ определить массу теоретическим путем? Другими словами, почему Стандартная модель не предусматривает массу частиц? Вселенная содержит только материю, и если так, то почему? Каким способом встроить в модель гравитацию? Можно ли создать теорию, которая объединит все силы? Как решить проблему иерархии? (Об этом будем говорить в главе 7.)

И наконец, Стандартная модель не объясняет существование темной материи и энергии. Предлагаются другие теории, помимо Стандартной модели, которые мы проиллюстрируем позже, где вводятся модели для темной материи и темной энергии. Однако они еще не получили экспериментального подтверждения.

ГЛАВА 7

КАНДИДАТЫ В ТЕМНУЮ МАТЕРИЮ

*«Наше знание — всего лишь капля,
а непознанного — целый океан».*

Исаак Ньютон

7.1. Фоторобот темной материи

Темная материя и ее идентификация во многом похожи на детективный кинофильм. Маловероятно, что следователи окажутся на месте преступления в момент совершения преступления. Однако если им повезет, они обнаружат «ключи»: отпечатки пальцев, вырванные в драке волосы, следы обуви и тому подобное. Каждый ключик дает информацию о преступнике. Собрав все улики, можно составить фоторобот преступника. В результате кропотливой работы преступник может быть найден. Короче, как говорил Шерлок Холмс, «если исключить невозможное, то, что останется, и будет правдой, сколь бы невероятным оно ни казалось».

Итак, если мы хотим обнаружить темную материю, нам надо составить ее фоторобот, а если мы имеем дело с частицами, необходимо понять, что это за частицы, какая у них масса и какого рода взаимодействия они «ощущают».

В самом начале мы говорили, что барионы и нейтрино не могут составлять всю недостающую массу во Вселенной. Следуя методам Шерлока Холмса, мы можем постараться понять, подходят ли нам какие-либо частицы Стандартной модели. Чтобы рассуждать о том, есть ли в Стандартной модели такая частица, необходимо понять, какими свойствами должны обладать частицы темной материи.

- Темная материя нейтральна: в противном случае она бы намного активнее взаимодействовала по сравнению с тем, что предсказывают наблюдения. Однако есть вероятность, что у темной материи очень маленький заряд.
- Темная материя должна иметь слабое взаимодействие с обычной, то есть она ощущает слабое взаимодействие. Уровни взаимодействия с обычной материей известны нам, скажем, благодаря влиянию скоплений галактик, например *скоплению Пуля*.



Она подвержена гравитационной силе. Взаимодействие с другими силами, если они есть, должно быть очень слабым, в противном случае его бы уже обнаружили.

- Темная материя не может быть обычной (барионной) материей, поскольку ее пределы судя по теории *первичного нуклеосинтеза* и по данным анизотропии реликтового излучения, свидетельствуют о том, что обычной материи $< 5\%$, намного меньше, чем ожидаемое количество темной материи. Более того, барионная материя не может формировать крупномасштабные структуры, какие мы сегодня наблюдаем.
- Темная материя должна быть устойчивой. В ранней Вселенной количество темной материи было почти таким же, как и сегодня.
- Темная материя мало взаимодействует сама с собой. Один из многочисленных тестов, которые мы обсуждали, — наблюдения скопления Пуля — позволит примерно оценить степень самодействия.
- Темная материя должна быть холодной, т.е. в момент рождения реликтового излучения разброс скоростей ее частиц намного меньше световой скорости. Будь это не так, первичные возмущения малого масштаба, как и у нейтрино, были бы сглажены или стерты из их движения.
- Количество частиц темной материи должно быть настолько велико, чтобы составлять 26% общей массы, ожидаемой из наблюдений и теорий.
- И наконец, даже если темная материя является фундаментальной для формирования космических структур, она не должна влиять на результаты первичного нуклеосинтеза. Хотя она является фундаментальной для образования и эволюции галактик, она не должна изменить эволюцию звезд.

Теперь мы можем использовать вышеуказанные критерии, чтобы понять, есть ли в Стандартной модели частицы, соответствующие указанным условиям. Все частицы Стандартной модели ощущают гравитацию, так что с этой точки зрения они все подходят. Условие стабильности частиц исключает кварки s , b , c , t , мюон μ , тау-частицу τ , глюоны, частицы Z и W . Например, мюон распадается за 2 миллионные доли секунды в тау-частицу, которая распадается еще быстрее. Условие, что темная материя не является горячей (т.е. не обладает релятивистской скоростью), исключает фотон, γ , и нейтрино ν_e , ν_μ , ν_τ . Условие, что частицы темной материи не являются барионными, исключает кварки u , d , а также электрон, e^- . Больше частиц в Стандартной модели нет, т.е. частицы темной материи должны находиться за пределами этой модели

или не относятся к частицам, показанным на рис. 6.17. Есть всего одно исключение — *аксион*, который является кандидатом в темную материю и имеет отношение к Стандартной модели.

Вопреки этому фиаско, физики не теряют надежды обнаружить новых кандидатов в темную материю. Воображение ученых воистину не знает границ, и за последние десятилетия кандидатов было предложено немало. На самом деле, даже слишком много. Все предложенные частицы, кроме аксиона, не имеют ничего общего со Стандартной моделью. Еще в 1977 году Стивен Вайнберг и Бенджамин Ли опубликовали статью о нейтриноподобных частицах с большей массой, т.н. *тяжелых лептонов*. Это исследование послужило толчком для целого ряда новых, где физики — исследователи частиц начали прикладывать свои знания к космологии. В результате появились теории, расширяющие Стандартную модель. Сейчас мы познакомимся с наиболее известными из них.

7.2. Особая симметрия: суперсимметрия

Интерес физиков был сфокусирован на теории, которая расширяет Стандартную модель, на т.н. *суперсимметрии* (SUSY). Согласно этой теории каждой частице соответствует своя суперсимметричная частица, или *s*-частица.

У бозонов суперсимметричные компаньоны — это фермионы, и наоборот. Приведем примеры: фотону соответствует *фотино*, глюону — *глюино*, частице *Z* — *зи́но*, частице *W* — *ви́но*, гравитону — *гравитино*, а частице Хиггса — *хиггсино*. Суперсимметричные компаньоны фермионов — это бозоны, которые обозначаются названием соответствующего фермиона с буквой *s* в начале слова. Например, электрону соответствует *электрон*, нейтрино — *нейтрино*, кваркам — *скварк*.

У обычных и суперсимметричных частиц разные спины. Например, у электрона спин $1/2$, а у *электрона* — 0.

Зачем ввели суперсимметрию?

Частично по причине нерешенных проблем Стандартной модели, что мы сейчас и обсудим.

Как мы выяснили в предыдущей главе, Стандартная модель, хотя и является успешной теорией, поскольку в некоторых случаях делает на удивление точные прогнозы, имеет свои ограничения. Одним из таких ограничений является *проблема иерархии*, которую можно определить как огромное различие между ожидаемым значением массы бозона

Хиггса (или поля Хиггса) порядка *массы Планка*, 10^{19} ГэВ, и измеренным значением в 125 ГэВ.

Когда мы пытаемся оценить какую-то величину количественно (например, массу частицы) в Стандартной модели, мы осуществляем пошаговый расчет с помощью *теории возмущений*. Чтобы получить высокую точность, необходимо посчитать квантовые поправки более высокого порядка, учитывая разные вклады всевозможных типов виртуальных частиц. В макроскопическом мире мяч — это объект четко определенной формы и размера. Если мы хотим измерить его вес, мы всего лишь используем весы. Если же речь идет об электроны, микроскопической заряженной частице, то он не бывает сам по себе, а постоянно в окружении большой свиты виртуальных частиц. Если мы хотим измерить его массу, мы должны «приправить» его разными типами виртуальных зарядов, которые поочередно вносят вклад в его массу. Другими словами, масса электрона определяется его *голой массой*, если считать его не заряженным, плюс масса окружающих его частиц. Поскольку электрон — это частица точечная, если не учитывать влияния виртуальных частиц, то его энергия бесконечно велика. В случае с электроном его экранирование виртуальными частицами делает своего рода чудо — уничтожает бесконечность. Однако с бозоном Хиггса этого не происходит.

Чтобы посчитать массу бозона Хиггса, сделаем то же самое, т.е. учтем вклад виртуальных частиц.

Как правило, вклад этот очень велик и помогает увеличить массу до верхнего предела массы Планка, 10^{19} ГэВ, что представляет собой энергию, при которой влияние квантовой гравитации становится значимым. Если вдаваться в детали, то вклад виртуальных частиц в массу бозона Хиггса происходит из фермионного и барионного полей (частиц), которые дают конечному результату противоположный знак.

Может возникнуть мысль, что суммарный вклад обнуляется случайно. На самом деле мы знаем, что очень большие положительные или отрицательные суммы величин, как правило, дают большие положительные или отрицательные значения. Может случиться так, что эти суммы сокращаются случайно, но это очень маловероятно.

Когда сумма многих слагаемых (чисел), намного превышающих измеренное значение величины, дает меньший результат, чем эти вклады, мы говорим о *проблеме тонкой настройки*. Для того чтобы эти суммы привели к малым числам, необходимо нечто, что изменит результат. Подобная ситуация бывает на бирже, когда игрок за определенный период покупает и продает акции за миллионы евро, а в конечном ито-

ге остается с несколькими центами в кармане. Чтобы это произошло, оператор должен каким-либо образом вмешаться, регулируя операции, пока они не приведут к желаемому результату. Итак, перед нами дилемма: почему масса бозона Хиггса намного меньше его вкладов? Почему есть *иерархия* между порядком величины массы бозона Хиггса и массой Планка, которая их разделяет?

Чтобы решить эту проблему, необходимо ввести нечто, что работает как биржевой оператор и что помогает свести концы с концами. Это нечто и есть *суперсимметрия*.

Суперсимметрия вводит фермионное и барионное поля, которые точно соответствуют друг другу, и в результате влияния этих сумм и случится «чудесное» сокращение, и появится масса бозона Хиггса намного меньше, чем масса Планка, равная наблюдаемой.

Суперсимметрия решает и еще одну проблему — объединения фундаментальных сил. Интенсивность элементарных взаимодействий не является постоянной, а зависит от энергии. Например, интенсивности электромагнитного взаимодействия на Земле и в центре гигантской звезды различны. То же самое относится к слабому и сильному взаимодействию. В мире, в котором мы живем, электромагнитная и слабая силы — это разные силы. Однако при высоких энергиях они становятся одним взаимодействием, электрослабой силой, с энергиями порядка 246 ГэВ. Продолжая эту мысль, Говард Джорджи и Шелдон Глэшоу пришли к выводу, что при более высоких энергиях электрослабая сила объединяется с сильным взаимодействием в одну силу. Как уже было в истории Вселенной, эта стадия, во время которой электромагнитное, сильное и слабое взаимодействия составляют единую *суперсилу* с помощью переносчиков гипотетических бозонов X и Y, называется *Великое объединение*. *Теория Великого объединения* (GUT) предусматривает, что эти три фундаментальные силы, за исключением гравитации, становятся одной при энергиях порядка 10^{15} – 10^{16} ГэВ. При подсчете моментов последовательного слияния перечисленных сил в терминах энергии или температуры, становится очевидным, что существует зависимость от роста энергии. Похоже, это согласуется с ожиданием, что когда Вселенная была очень молодой и очень горячей, существовало лишь одно взаимодействие.

Однако если делать подсчет в рамках Стандартной модели, вы увидите, что объединения не происходит, как видно на левой панели рис. 7.1: три прямые не встречаются. В 1981 году Савас Димопулос, Стюарт Рэби и Фрэнк Вильчек в процессе пересмотра вычислений с суперсимметричными моделями показали, что объединение есть (рис. 7.1, правая панель).

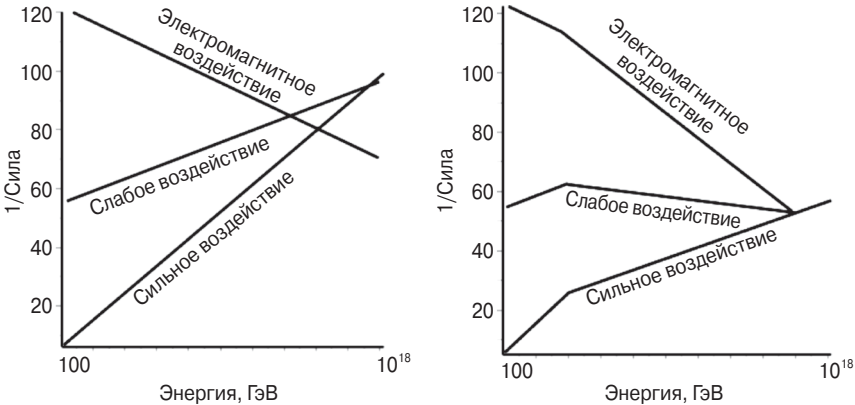


Рис. 7.1. Объединение сил без суперсимметрии (слева) и с суперсимметрией (справа)

Крайне маловероятно, что этот результат случаен. Однако прогнозы теории Великого объединения (GUT) можно проверить, а именно: *несохранение барионного числа и распад протона*. Согласно этой теории средняя продолжительность жизни протона 10^{31} лет. Были проведены эксперименты с целью подтвердить это предположение, но безрезультатно; более того, благодаря усовершенствованию теоретических вычислений средняя продолжительность жизни протона повысилась до 10^{34} – 10^{35} лет (подробнее см. раздел 10.2).

Третий любопытный аспект суперсимметрии состоит в том, что у нее есть бонус: некоторые из частиц обладают правильными свойствами, чтобы быть частицами темной материи.

В Стандартной модели сильное, слабое и электромагнитное взаимодействия переносятся калибровочными бозонами. По аналогии было высказано предположение, что существует бозон – переносчик гравитационного взаимодействия, т.н. *гравитон*. Эту частицу ни разу не наблюдали, более того, и самой теории, которая могла бы ее предсказать, т.н. *квантовой гравитации*, тоже пока еще нет. Суперсимметрия обеспечивает существование компаньона гравитона, фермиона, названного *гравитино*. Суперсимметрия предлагает и других кандидатов для темной материи.

В 1982 году, хотя суперсимметрия была еще только в стадии становления, Хайнц Пейджелс и Джоэл Примак высказали предположение, что эта частица может решить проблему недостающей массы. В 1981 году Савас Димопулос и Говард Джорджи заложили основу для упрощенной модели суперсимметрии, названной *минимальной суперсимметричной*

моделью (MSSM), которая определяет минимальное число частиц и полей, которые достигают суперсимметрии. Даже в упрощенном виде у этой модели 120 новых параметров, вводить которые надо произвольно, давая свободу для построения конкретных суперсимметричных моделей.

Модель MSSM позволила открыть дорогу суперсимметричным частицам. В 1983 году Хаим Голдберг, а в 1983 году и Джон Эллис, вместе с четырьмя коллегами предположили, что темная материя состоит из новой частицы, т.н. *нейтралино*. В модели MSSM «смесь» суперпартнеров¹ фотона, а именно Z -частицы и два нейтральных бозона Хиггса образуют четыре нейтралино, самый легкий из которых устойчив.

Мы упомянули два бозона Хиггса? Да, в суперсимметрии пять бозонов Хиггса, три нейтральных и два с зарядом (H^+ , H^- и три H^0 бозона).

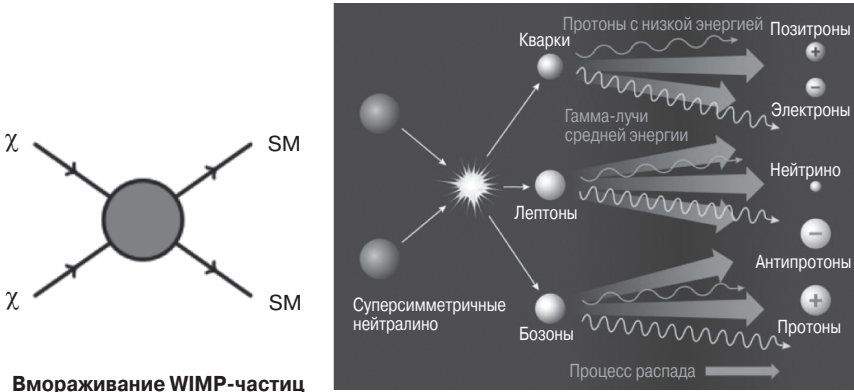
Поскольку нейтралино предлагали десятилетиями, он стал самым популярным и наиболее изученным кандидатом для темной материи. Только подумайте: примерно 50% публикаций на тему кандидатов в темную материю именно про частицы, родственные нейтралино. Эта частица является частью большого семейства, т.н. *слабовзаимодействующих массивных частиц* (WIMP), т.е. частиц, подверженных слабому взаимодействию. Чтобы частица поднялась на уровень кандидата в темную материю, она должна удовлетворять условиям, указанным выше. Нейтралино обладает некоторыми из важных «добродетелей»:

- она нейтральна;
- у нее слабое взаимодействие с обычной материей;
- она не является барионной материей;
- это холодная темная материя с дисперсией скоростей намного ниже, чем у скорости света.

Остается подтвердить два требования: устойчивость и необходимое количество материи для наблюдаемого относительного состава Вселенной.

Нейтралино — это суперсимметричная частица, а в суперсимметрии, как и в теории GUT, есть взаимодействия, которые нарушают сохранение числа барионов и лептонов. Это приводит к стремительному распаду протона, в течение нескольких лет. Поскольку средняя продолжительность жизни протона намного больше, чем у Вселенной, необходимо ввести ограничители на эту теорию, чтобы не было противоречия с данными наблюдений.

¹ Суперпартнер — это суперсимметричная частица, соответствующая частице в Стандартной модели. Например, фотино это суперпартнер фотона.



Вмораживание WIMP-частиц

Рис. 7.2. Слева: каким образом из частиц темной материи получается наблюдаемое изобилие темной материи. Частицы темной материи аннигилируют в частицы Стандартной модели. χ обозначает частицу темной материи, а SM — частицу Стандартной модели. Справа: показаны различные частицы Стандартной модели, на которые могут распадаться частицы темной материи. С разрешения: Sky & Telescope/Gregg Dinderman (<https://universetoday.com/127971/weighing-dark-matter/>)

По этой причине в суперсимметрию ввели новую симметрию — *R-четность*, связанную со спином частиц и с разницей между барионным и лептонным числами, сохраненным количеством. Для частиц Стандартной модели она равна 1, для суперсимметричных частиц она равна -1 . Сохранение *R-четности* необходимо, чтобы суперсимметричные частицы создавались и разрушались парами, оставляя хотя бы одну суперсимметричную частицу (самую легкую) устойчивой с точки зрения космологии. Иными словами, тяжелая суперсимметричная частица может стать более легкой из Стандартной модели (рис. 7.2), но более легкая суперсимметричная частица распаду не подлежит.

Масса нейтрино варьируется от 10 до 10 000 массы протона. Такой диапазон массы важен для удовлетворения еще одной характеристики, необходимой для частиц темной материи: быть в соответствующем наблюдению количестве.

Один вопрос так и не имеет четкого ответа: как получилась темная материя? Как мы увидим, кроме нейтрино и WIMP-частиц, есть много других кандидатов, и формирование [темной материи] меняется в зависимости от типа частицы. Существует несколько теорий, которые пытаются дать ответ на этот вопрос. В случае с WIMP-частицами процесс, который ведет к *вмораживанию*, состоит в следующем:

- Считается, что в очень горячей первичной Вселенной WIMP-частицы находились в состоянии теплового равновесия с обычной материей. Это означает, что WIMP-частицы взаимодействовали, в результате чего появились частицы Стандартной модели; происходил и обратный процесс (рис. 7.2).
- Количество WIMP-частиц в космосе фиксируют два конкурирующих процесса:
 1. *Охлаждение Вселенной.* При высокой температуре процесс аннигиляции WIMP-частиц уравнивался производством этих частиц благодаря аннигиляции частиц обычной [барионной] материи; при более низкой температуре аннигиляция WIMP-частиц была важнее, чем обратный процесс (рис. 7.2). Следовательно, число WIMP-частиц экспоненциально уменьшалось.
 2. *Расширение Вселенной.* Поскольку Вселенная расширяется, со временем WIMP-частице будет все труднее находить себе другую, чтобы с ней аннигилировать.

С достижением условия, при котором WIMP-частицы больше не аннигилируют, их количество *замораживается*. Они выжили по сей день, оставаясь в *реликтовом* количестве.

Конечное изобилие WIMP-частиц контролируется их массой и силой взаимодействия, точнее — *сечением аннигиляции*.

Количество частиц с массой в диапазоне от 10 до 10 000 масс протона и с силой взаимодействия, подобной WIMP-частице (т.е. слабое ядерное взаимодействие) равно измеренному количеству для темной материи. Это «совпадение» называют *чудом WIMP-частиц*.

Десятилетиями WIMP-частицы были самыми модными, но в последние годы ситуация изменилась. Дело в том, что поиски суперсимметрии на Большом адронном коллайдере (БАК) в Женеве не увенчались успехом. Вероятно, суперсимметрию не обнаружили потому, что природа не суперсимметрична, или энергия, в которой проявляется суперсимметрия, больше, чем та, что можно получить на БАК, который в последние годы работал с энергией 14 ТэВ¹.

Так, если в обычном мире низких энергий мы наблюдаем лишь обычные, несуперсимметричные частицы, то это означает, что есть предельная энергия, выше которой мир суперсимметричен, а ниже которой — обычный. Эта шкала энергий называется *шкалой нарушения суперсимметрии*. Поскольку суперсимметрия решает проблему иерархии, ожидается, что эта шкала не намного больше электрослабой шкалы, т.е.

¹ 1 ТэВ равен тысяче миллиардов электронвольт.

несколько сотен ГэВ. К сожалению, судя по экспериментам, это не так. Суперсимметрия высоких энергий теряет многие из своих привлекательных моментов, например, решение проблемы иерархии.

7.3. Затерянные в дополнительных измерениях

Другие кандидаты в темную материю относятся к другим областям физики, например, к сценариям *дополнительных измерений*. В повседневной жизни мы имеем дело с четырьмя измерениями: тремя пространственными и одним временным. По причинам теоретического порядка ученые-физики ввели дополнительные измерения, которые так малы, что их нельзя увидеть.

Одна из главных целей современной физики — это поиск универсальной теории, которая воссоединит все взаимодействия в единую систему. Хотя, возможно, такой системы и не существует, по эстетическим причинам люди стремятся найти единое описание явлений. Поиск этот начал, но так и не завершил Альберт Эйнштейн, и продолжают вот уже несколько поколений ученых-физиков. В 1919 году через четыре года после опубликования общей теории относительности Теодор Калуца предложил теорию для объединения электромагнетизма и общей теории относительности в пятимерном пространстве, где четыре пространственных и одно временное измерение. Калуца отправил свое исследование Эйнштейну, который сначала не понял роли четвертого пространственного измерения, но потом сделал все от него зависящее: в 1918 году представил работу Берлинской академии наук, и в 1921 году работа вышла в свет. В 1926 году Оскар Клейн расширил исследование, введя квантовые понятия. Он сумел объяснить квантование электрического заряда на основании квантования импульса в дополнительном измерении, а также определил порядок величины дополнительного измерения, который должен быть примерно 10^{-22} м. Поначалу *теория Калуцы — Клейна* вызвала интерес, но потом о ней забыли вплоть до 70-х годов прошлого столетия.

На основе теории Калуцы — Клейна возникла *теория суперструн* в десятимерном пространстве, которую предлагают в качестве универсальной теории, где частицы генерируются в результате вибраций крошечных струн. Первоначально теория струн охватывала только бозоны, в 26 измерениях, и это была теория сильных взаимодействий. Позже Пьер Рамон, Андре Невё и Джон Шварц показали, как ввести фермионы. Связь этой теории с суперсимметрией и привела к появлению теории суперструн. В 1974 году Жоэль Шерк и Джон Шварц высказали точку зрения, что

именно эта модель, а не теория сильных взаимодействий является теорией квантовой гравитации и, в более общем смысле, *теорией всего*. Однако у этой теории есть одна проблема: она работает в десятимерном пространстве, а в нашем мире пространственно-временных измерений всего четыре. Так где же измерения, которых мы не видим?

Как объяснял Клейн, дополнительные измерения компактны, замкнуты на себя и чрезвычайно малы. Чтобы дать представление о дополнительном измерении, давайте представим себе длинный цилиндр или канат. Если смотреть на цилиндр с большого расстояния, то мы увидим его как одномерную нить. Для того чтобы увидеть дополнительный размер, необходимо смотреть на него с малого расстояния.

Канатоходец движется лишь в одном измерении, назад и вперед, а муравей может оползти вокруг каната, т.е. по окружности (рис. 7.3).

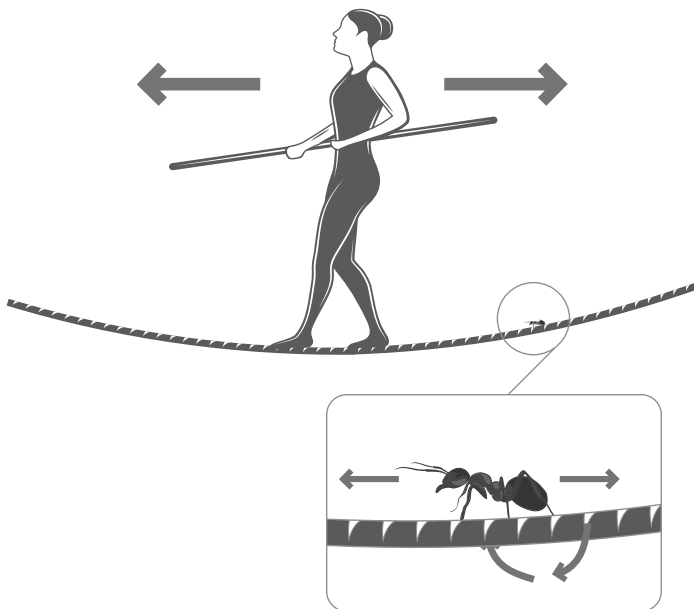


Рис. 7.3. Пример представления дополнительных измерений. Для канатоходца у каната есть только одно измерение, а для муравья два, поскольку он может оползти канат по окружности

Можно представить себе одно дополнительное измерение или несколько, и у этого измерения есть периодические свойства. Реальность мира с дополнительными измерениями может быть любопытной, абсурдной и забавной. По мере увеличения измерений «возможности» живого

существа растут. Одномерный мир населяют линейные нитевидные предметы. Если один из них встретит другого лицом к лицу, то он не может продолжить движение, если не сумеет убедить другого двигаться в противоположном направлении. Если мы перейдем в двумерное пространство, эта проблема исчезнет. Одно живое существо может обогнать другое, а при переходе в трехмерное может обойти, перепрыгнув через другого. С увеличением числа измерений растут и возможности, и способности. В четырех измерениях существо может «телепортировать себя» из одного места в другое на большие расстояния, что делает его в наших глазах неким супергероем. В нашем мире отражение правой руки делает ее левой, а в четырехмерном пространстве отражение заменяет вращение. Таким образом, перчатку с правой руки, побывавшую в четвертом измерении, можно носить на левой руке. Есть литература на тему путешествий в миры с большим числом измерений, например, сборник рассказов Герберта Уэллса «История Платтнера», где школьный учитель, вернувшись из путешествия в параллельный мир, ощущает свои части тела как в зеркальном отражении. Приведу еще один пример: научно-фантастический роман Эдвина Эббота «Флатландия: роман во многих измерениях», в котором обитатель двухмерного мира контактирует с жителем трехмерного мира.

Физика в пространстве зависит также от числа измерений. В нашем мире предмет может вращаться вокруг оси, а, скажем, в четырехмерном он может вращаться вокруг двух осей. Сила гравитации уменьшается пропорционально кубу расстояния, а не площади, как в нашем случае. Это самые простые примеры. Их очень много. Вкратце: дополнительные размеры влияют на то, как мы видим реальность, влияют на физику, а также на массу и заряд частиц.

Возвращаясь к теории суперструн, отметим, что дополнительные измерения свернуты в сложные фигуры, т.н. *пространства Калаби – Яу* (рис. 7.4) (шестимерные пространства, названные по имени американского математика итальянского происхождения Эудженио Калаби и китайского математика Шинтун Яу), которые связаны с каждой точкой четырехмерного пространства. На рис. 7.4 показано примерное, искаженное представление этого пространства, поскольку мы видим шестимерное пространство на двухмерном листе бумаги.

Число возможных компактных многообразий дополнительных измерений огромно: порядка 10^{500} , если верить оценке 2004 года Майкла Дулласа, а по мнению других авторов, и того больше. Если мы не знаем, как упаковать (компактифицировать) дополнительные измерения, то мы не можем делать прогнозы для реального мира на основании теории суперструн.

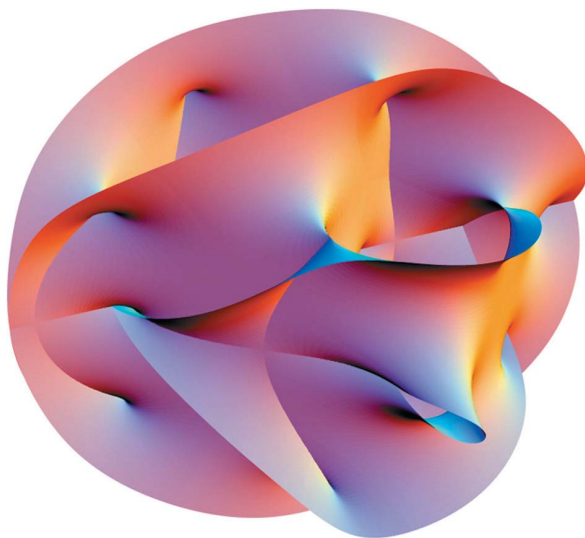


Рис. 7.4. Пространства Калаби – Яу. Источник: Wikipedia

Таким образом, поскольку число способов компактифицировать измерения огромно, теория струн, которая позиционирует себя как теория всего, на самом деле становится теорией ничего, поскольку не объясняет нашу Вселенную. На начальных этапах у теории струн было много последователей. Она внушала нам надежду, что мы близки к решению вековой проблемы объединения гравитации и квантовой механики. Время показало, что все не так просто. Нет доказательств тому (или их слишком мало), что теория струн является надежной научной теорией. Она обеспечивает суперсимметрию, однако суперсимметрию не обнаружили на БАК. Она согласуется с излучением Хокинга, которое также ни разу не было обнаружено, хотя и считается установленным физическим явлением. Если протон распадется, то это говорит в пользу суперсимметрии, однако, как упоминалось ранее, протон не распадается, во всяком случае в течение 10^{34} лет. Суперсимметрия подтверждает темную материю, но и она не была обнаружена. Среди других предсказаний теории – существование новых слабых взаимодействий дальнего диапазона, которые также еще не наблюдали. Была надежда, что эта теория может решить огромное расхождение между наблюдаемой и подсчитанной величиной космологической постоянной, порядка 10^{120} . Суперсимметрия смогла уменьшить расхождение величин только до порядка 10^{50} , но решить проблему не может. Однако люди, работающие в этой области, не теряют надежды, и поиск продолжается.

Вернемся к дополнительным измерениям: потребуйся нам войти в какое-либо измерение, для достижения цели было бы недостаточно стать маленького размера. В результате явлений квантовой механики нам бы понадобилась энергия, обратно пропорциональная радиусу дополнительного измерения. Поскольку он очень невелик, нам бы понадобилась огромная энергия. Поэтому две частицы с энергией, недостаточной для проникновения в дополнительное измерение, будут всего лишь двигаться по поверхности цилиндра, т.е. это будет одномерное движение. Будь у нас две частицы с достаточной энергией для попадания в дополнительное измерение и столкновения, после столкновения они бы двигались в дополнительное измерение u , к основанию цилиндра, в противоположных направлениях. Наблюдатель, который не видит это измерение, увидел бы, что частицы столкнулись и остались неподвижными. Следовательно, было бы неправильно делать вывод о том, что принцип сохранения энергии неприменим. На самом деле, две частицы двигаются в дополнительном измерении, и энергия сохраняется (рис. 7.5).

Следовательно, ключи к существованию дополнительных измерений можно обнаружить в ускорителях частиц, исследуя очевидную потерю энергии в результате движения в самом дополнительном измерении.

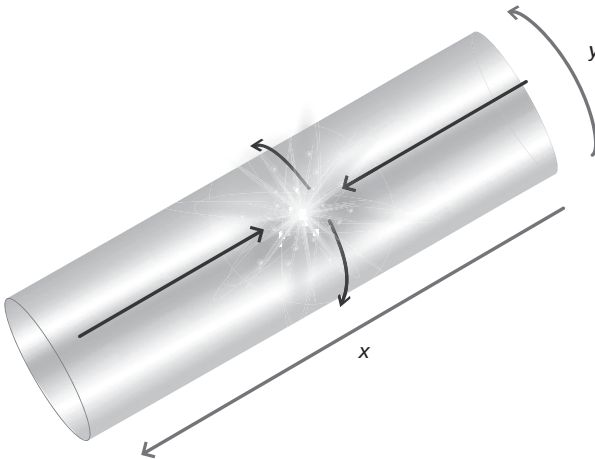


Рис. 7.5. На изображении цилиндр представляет пространство. Обычные измерения, как те, с которыми мы встречаемся в повседневной жизни, представлены прямым измерением x , вдоль цилиндра. Дополнительный размер, обозначенный y , соответствует окружности (компактное циклическое измерение). Мы не воспринимаем это дополнительное измерение y , если его размер намного меньше, чем x , т.е. микроскопический

Еще одна любопытная деталь: для наблюдателя, который не знает о дополнительном измерении, две частицы, которые оказываются на окружности u , в основании цилиндра, будут восприниматься как неподвижная частица, но со значительной массой. На самом деле, если вспомнить уравнение массы – энергии ($E = mc^2$): масса частиц была бы кинетической энергией. Итак, согласно теории Калуцы – Клейна высокоскоростное движение в дополнительных измерениях генерирует то, что есть масса покоя. Другими словами, у массы есть две различные интерпретации: энергия частицы в состоянии покоя, в соответствии со специальной теорией относительности, или энергия в результате движения в невидимом измерении. Еще один важный момент состоит в следующем: частица будет восприниматься нами не как одна частица, а как набор частиц разной массы. В дополнительных измерениях масса каждой частицы связана с массой частицы в состоянии покоя.

Итак, любая частица Стандартной модели в дополнительных измерениях может генерировать более тяжелые частицы, еще не обнаруженные: эти частицы составляют «башни частиц»¹ растущей массы. Поэтому если у нас есть электрон в движении в дополнительных измерениях, это создаст *башню Калуцы – Клейна (КК)* из более тяжелых электронов.

Подобным образом в теории суперструн масса элементарных частиц объясняется их движением в невидимых дополнительных измерениях.

Существует пять различных теорий суперструн, и их можно рассматривать как пять разных аспектов единой теории, т.н. *М-теории* в 11-мерном пространстве. М-теорию ввел Эдвард Уиттен во время т.н. «второй струнной революции». Забавный факт: так и неизвестно, что стоит за буквой М, Уиттен об этом ни разу не обмолвился. Решение Уиттена проблемы пяти теорий вместо одной подобно старинной буддистской притче о слепых, которым царь предложил потрогать разные части тела слона. Нетрудно догадаться, что возникли самые противоречивые гипотезы. Уиттен объяснил недоумевающим физикам, что каждая из пяти теорий есть проявление единой теории, М-теории.

Еще один интересный момент подметил Джозеф Полчински: струнная теория является последовательной при наличии бóльших объектов, например *D-бран*, и предсказывает их. Например, 2-брана это мембрана, 0-брана это частица, а 1-брана это струна. Расширение теории струн на

¹ То есть наименее массивная частица с массой m – это частица из Стандартной модели, а у других масса $mn = \sqrt{(m^2 + n^2/R^2)}$, где $n = 0$ соответствует частице Стандартной модели, а $n = 1, 2, \dots$, соответствует другим, более массивным частицам. Как видно, масса m зависит от измерения R из дополнительных измерений.

браны лишь усложнило проблему компактификации, поскольку привело к обнаружению других способов компактификации дополнительных измерений.

По мнению некоторых исследователей, наша Вселенная могла быть расположена на 3-бране, у которой $3 + 1$ измерение, которая колеблется, словно простыня на ветру, среди дополнительных измерений.

Существуют другие, очень специфические модели дополнительных измерений.

В 1998 году Нима Аркани-Хамед, Савас Димопулос и Джорджи Двали (ADD) ввели *теорию супербольших измерений*. Они показали, что на четырехмерной бране, содержащей нашу Вселенную, встроенную в дополнительные измерения, можно решить проблему иерархии и понять экстремальную слабость гравитации по сравнению с другими фундаментальными взаимодействиями. В этой модели дополнительные измерения свернуты (компактифицированы) таким образом, что образуют круг с микроскопическим радиусом. Фундаментальные взаимодействия Стандартной модели соотносятся с четырехмерным пространством и сгенерированы открытыми струнами с их экстремальными точками на бране (рис. 7.6). Это четырехмерное пространство встроено в большее пространство, т.н. *балк* (англ. bulk — объем, пространство между бранами) (рис. 7.6). Для ясности приведу аналогию: двухмерное пространство поверхности Земли, локализованное внутри трехмерного пространства. В этой аналогии брана — это поверхность Земли.

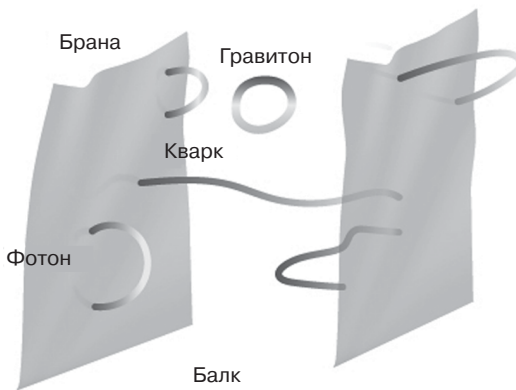


Рис. 7.6. Мир бран. Открытые струны прикреплены к бранам, соответствующим материальным частицам и электрослабому и сильному взаимодействиям. Закрытые струны — это переносчики гравитационного взаимодействия, которые могут перемещаться в объеме (балке) между бранами

Гравитация, переносимая закрытыми струнами, может двигаться во внешнем пространстве, что и объясняет, почему она такая слабая.

Предположение о том, что гравитация «живет» в большем пространстве–времени, приводит к отклонениям от теории Ньютона или общей теории относительности на малых расстояниях. Окажись возможным испытать гравитацию на малой шкале, это можно было бы использовать как тест на существование дополнительных измерений.

Другую модель с дополнительными измерениями, которые деформируются между двумя бранами, предложили в 1999 году Лиза Рэндалл и Раман Сандрам. Эта модель известна также как *модель Рэндалл – Сандрама* или *теория искаженной $5D^1$ геометрии*².

Теория Рэндалл – Сандрама допускает, что реальный мир представляет собой вселенную дополнительных измерений, которую описывает особая искаженная геометрия, где вселенная состоит из пятимерного пространства, т.н. *пространство анти-де Ситтера*. Частицы Стандартной модели локализованы на $(3 + 1)$ -мерной бране. Эта теория показала новые способы решения проблемы иерархии, но заставила расстаться с надеждой найти способ правильной компактификации. Напомним, что есть по меньшей мере 10^{500} различных способов компактифицировать дополнительные измерения.

Характерной чертой теорий дополнительных измерений является то, что в результате компактификации дополнительных измерений поля, которые распространяются в балке, порождают серию осцилляций, которые называются *башня состояний Калуцы – Клейна*. Другими словами, частицы, которые движутся в дополнительных измерениях (4-браны), появляются как тяжелые частицы, своего рода копии нормальных частиц (состояния Калуцы – Клейна). Эти частицы, как мы знаем, представляют собой самый низкий уровень башни. В варианте *универсального дополнительного измерения* (universal extra dimension – UED), предложенного в 2001 году Томасом Appelquistом, Синь-Чиа Ченгом и Богданом Добреску, все частицы Стандартной модели могут двигаться в дополнительных измерениях, и опять каждой частице соответствует своя собственная башня Калуцы – Клейна. Сценарий UED, как и сценарий ADD, даст видимые эффекты в ускорителях частиц типа БАК, таких как получение двух частиц Стандартной модели или более

¹ $5D$ обозначает «пятимерный».

² Простейшая модель такого типа с локализованными фермионами и с одним дополнительным измерением в виде доменной стенки была построена в работе Рубакова и Шапошникова еще в 1983 году. – *Прим. науч. ред.*

сложные сигналы. На БАК проводились такие эксперименты, однако подобные частицы не обнаружили.

7.4. «Разыскиваются особо опасные»

Кандидаты в темную материю – это самый настоящий зоопарк. Мы сосредоточили внимание на образчиках WIMP-частиц, поскольку за последние годы они пользуются особым вниманием ученых-физиков. Как уже говорилось ранее, такие суперсимметричные частицы имеют свои достоинства. К сожалению, у них есть и серьезная проблема. После того как эксперименты на ускорителе БАК не обнаружили суперсимметрию, появились сомнения в существовании суперсимметрии вообще, и суперсимметрии частиц в частности.

Даже если суперсимметрии и ее частиц не существует, всегда есть огромное число кандидатов в темную материю, таких как *аксионы, стерильные нейтрино, вимпзиллы, темный фотон, нечеткая темная материя, Q-шары* и др. Существуют сценарии, альтернативные WIMP и холодной темной материи, например *самовзаимодействующая темная материя, асимметричная темная материя, нечеткая темная материя* и тому подобное.

Аксион предложили Стивен Вайнберг и Фрэнк Вильчек, который дал частице название по торговой марке популярного американского стирального порошка. Ввели эту частицу для решения одной проблемы ядерной физики. Масса аксиона меньше одной миллиардной массы электрона, между 10^{-6} и 10^{-3} эВ. Спина у него нет, и он очень слабо взаимодействует с обычной материей. По этой причине его еще называют «невидимым аксионом».

Важным свойством для обнаружения аксионов является то, что они могут превращаться в фотоны в присутствии интенсивных магнитных полей. Аксионы были получены в первичной Вселенной с помощью теплового механизма, как и WIMP-частицы, или с помощью совершенно другого нетеплового механизма.

Стерильные нейтрино взаимодействуют с другими частицами только с помощью гравитации. Их ввели для того, чтобы найти решение проблемы массы нейтрино (см. главу 6). Масса правосторонних (см. Приложение Г) или стерильных нейтрино неизвестна и варьирует от менее 1 эВ до 10^{15} ГэВ, и они могли бы стать решением проблемы недостающей массы.

Еще одна форма темной материи — это *вимпзиллы*, название образовано сращением WIMP и последней части слова Годзилла. Очевидно, что это имя частица получила за свою огромную массу: 10^{12} – 10^{19} ГэВ. Эти частицы ввели для объяснения существования космического излучения с очень высокими энергиями.

Q-шары, где *Q* обозначает электрический заряд, представляют собой локализованные сферические конфигурации поля.

Скрытый, или темный сектор — это разновидность гипотетических наборов еще не наблюдаемых квантовых полей и частиц. Взаимодействие между частицами темного сектора и частицами Стандартной модели слабое, с помощью гравитации или т.н. *темного фотона*, аксионов или стерильных нейтрино. Даже бозон Хиггса может взаимодействовать с частицами темного сектора и действовать как коммуникационный портал, называемый *порталом Хиггса*, между Стандартной моделью и темным сектором.

Что касается сценария *самовзаимодействующей темной материи*, то он связан с проблемами модели WIMP-частиц. На малой шкале (1 кпк) у WIMP-частиц существуют проблемы воспроизведения структуры галактик. Есть целый ряд проблем: например, т.н. *проблема касп-ядра*. Распределение плотности темной материи, особенно в карликовых галактиках, в центре плоское, а с использованием WIMP-частиц возникают очень крутые профили плотности распределения, т.н. *острые профили*. И это не единственная проблема: есть еще *проблема пропавших спутников*, т.е. в нашей Галактике и в Андромеде наблюдается меньше спутников галактик, чем предсказывает WIMP-модель.

Проблема «слишком большой, чтобы потерпеть неудачу» относится к расхождению между плотностью в центре галактик, предсказанной WIMP-моделью, и наблюдениями. Еще одна проблема относится к наблюдению распределения спутников галактик на плоской структуре, например, в Андромеде, которое несопоставимо с WIMP-моделью. Возможные решения этих проблем относятся к роли взаимодействия между темной и видимой материей, что изменило бы распределение темной материи на малых шкалах. Еще одна возможность — это допустить, что темная материя обладает *самоделиствием* или является *нечеткой*. Последняя состоит из очень легких скалярных частиц (бозоны с равным нулю спином) с массой порядка 10^{-22} эВ.

Предлагается и еще один сценарий — *асимметричная темная материя*. Основная идея состоит в следующем: поскольку количество обычной материи и темной материи подобно (темной материи больше всего в пять раз), плотность темной материи сегодня могла образоваться в результате

процесса, подобного процессу асимметрии антиматерии — материи. Поэтому темная материя могла образоваться в некоем процессе с *антисимметрией между темной материей и антитемной материей*.

Из числа кандидатов в темную материю вполне бы получился настоящий зоопарк. Поиск в основном сосредоточен на WIMP-частицах, но также и на аксионах и стерильных нейтрино. Как мы узнаем в следующей главе, до настоящего дня ни один из кандидатов в этом зоопарке не проявил явных признаков своего существования.

ГЛАВА 8

ОБНАРУЖЕНИЕ ТЕМНОЙ МАТЕРИИ

Наука развивается лучше всего, когда наблюдения вынуждают нас менять свои прежние представления.

Вера Рубин

8.1. Как найти темную материю

В 2012 году Кэтрин Фриз и Кристофер Сэвидж опубликовали статью о столкновениях темной материи с телом человека, показав, что каждую секунду сквозь нас проходят миллиарды частиц темной материи, WIMP-частица может столкнуться с одним из кварков, из которых мы состоим, в результате появится бозон Хиггса, и так за год примерно 10 WIMP-частиц будут взаимодействовать с нашими атомами. Другими словами, хотя взаимодействия частиц темной материи с обычной материей очень слабы, они все же есть.

Очевидно, что эти частицы могут проходить через все объекты и взаимодействовать с ними. Таким образом, мы можем выстроить эксперимент, чтобы попытаться подтвердить, взаимодействуют ли WIMP-частицы с ядрами. Этот метод поиска темной материи, предложенный еще в 80-е годы прошлого века, называется *прямым обнаружением*. Вероятность взаимодействия частицы темной материи с детектором зависит не только от ее массы, но и от количества таких частиц. Темная материя есть повсюду в пространстве. Ее плотность увеличивается по мере приближения к центру нашей Галактики. В окрестностях Земли, примерно в 8 кпс от центра Галактики, большая часть массы барионная (т.е. обычная). В любом случае, в чашке кофе есть некое число частиц темной материи, которые не стоят на месте, а двигаются на высокой скорости порядка 300 км/с.

Кроме этого метода, есть два других метода обнаружения темной материи: один из них основан на распаде частиц темной материи на всевозможные частицы, т.н. *косвенное обнаружение*, а другой – на возможности создать темную материю и наблюдать ее косвенно в *ускорителях частиц*.

8.2. Встречи лицом к лицу

В Институте Макса Планка в Мюнхене Анджей Друкер и Лео Стодольски исследовали методы, позволяющие обнаружить упругое рассеяние нейтрино на ядрах. В 1984 году они опубликовали статью, где предложили для этой цели использовать *сверхпроводящий материал*¹. В следующем году Марк Гудман и Эд Уиттен предложили ту же технологию для обнаружения темной материи, обсуждая рассеяние, независимое от спина нуклона, и другие, зависящие от спина взаимодействия. *Независимое от спина рассеяние* представляет особый интерес, поскольку поперечное сечение, т.е. вероятность взаимодействия, увеличивается пропорционально квадрату числа массы, то есть суммы числа протонов и нейтронов в ядре. Согласно теоретическим подсчетам, для взаимодействия такого типа в день и на каждый килограмм детектора число событий должно быть до тысячи.

Итак, прямое обнаружение основано на представлении о том, что частица темной материи взаимодействует с ядром определенного материала, что приводит к отскоку ядра, отдающего энергию материалу, которую потом измеряют разными способами (рис. 8.1, 8.2).

Первая возможность — это измерение колебательных движений кристаллической решетки, *фононов*², кванта осцилляции, подобного «фотону», который является квантом света. Фононы — это не мистические сущности. Явление, подобное явлению фононов, случается, если постучать по бруску какого-либо материала (предпочтительно такого, как железо) каким-либо предметом. Если коснуться бруска рукой, то можно почувствовать колебания — они и являются своеобразной усиленной версией фононов. Второй способ обнаружения подразумевает использование *ионизации*, т.е. получая или теряя электроны, в результате чего атом получает заряд.

Третий использует *сцинтилляцию*, т.е. генерацию световых импульсов, исходящих после столкновения. Существуют десятки экспериментов прямого обнаружения, как видно на рис. 8.2, которые измеряют один или более одного из указанных эффектов, т.н. *каналов обнаружения*.

Если вернуться к истории, то первое испытание этой теории провели в 1986 году в подземном золотом руднике Хоумстейк в Южной Дакоте, где начали проводить исследования, чтобы получить представление о поперечном сечении рассеяния темной материи на ядрах, используя германиевый ионизационный детектор.

¹ Тип материала, способного проводить электричество, сопротивление которого при понижении температуры до определенного уровня падает до нуля.

² Фононы — это осцилляции внутренней структуры материала.

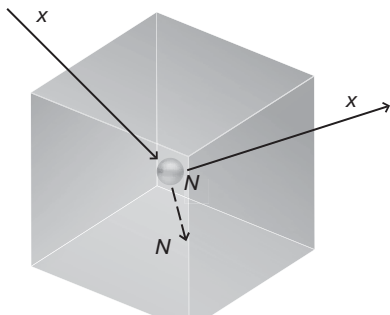


Рис. 8.1. Прямое обнаружение. Частица темной материи, X , ударяет ядро, N , которое отскакивает и высвобождает энергию



Рис. 8.2. Эксперименты и методы прямого обнаружения

Одна из основных проблем экспериментов такого типа — это наличие других источников взаимодействия с сердцевиной детектора, например природная радиоактивность окружения детектора (распад α -, β - и γ -излучения, нейтроны) и космические лучи. Космические лучи — это релятивистские частицы высоких энергий и атомные ядра, исходящие из космоса, которые постоянно сталкиваются с Землей. Следовательно, они также влияют на детектор.

Из-за этой разновидности фонового шума, если бы мы попытались провести один из этих экспериментов на поверхности Земли, события столкновений темной материи с ядрами были бы приглушены. Необходимо попытаться заблокировать или снизить бомбардировку частицами из космоса. Для этого детектор должен быть экранирован километрами скальной породы, как подземная лаборатория итальянского Института ядерной физики — Национальная лаборатория Гран-Сассо. Чтобы контролировать фоновый шум, который приводит к «ложным сигналам», надо поменять метод обнаружения на тот, что предложили в 1986 году Анджей Друкер, Кэтрин Фриз и Дэвид Шпергель. Земля вращается вокруг Солнца с изменяющейся скоростью и направлением, а Солнце движется по Млечному Пути в направлении созвездия Лебедя. Следовательно, наблюдатель на Земле «видит» ветер частиц, исходящий с этого направления. Значит, детектор будет наблюдать больший поток по мере того, как увеличится соосность скорости Земли и движения Солнца (рис. 8.3). Следовательно, максимальный поток ожидается в июне. Именно это и было зафиксировано во время одного из экспериментов по изучению темной материи: DAMA/NaI, второе поколение эксперимента DAMA/LIBRA.

Эксперимент проводится в подземной лаборатории Гран-Сассо. Метод обнаружения (или канал обнаружения) — это *сцинтилляция кристаллов йодида натрия*. С 1998 года, когда начался сбор данных эксперимента DAMA, и по сегодняшний день сезонное изменение сигнала достигло очень высокого уровня значимости (более 9σ). Физики используют σ для определения того, в какой мере результат является случайным. Например, 3σ соответствует вероятности 1 из 740, а 5σ соответствует вероятности 1 из 3,5 миллионов¹. Как видите, чем выше σ , тем меньше вероятность, что результат случаен. Если $\sigma = 9$, то это примерно $8,9 \times 10^{18}$, т.е. вероятность того, что результат случаен, практически равна нулю. Эксперты скептически относятся к результатам, полученным коллаборацией DAMA/LIBRA, несмотря на всю их значимость.

¹ В случае данных, имеющих гауссово распределение. — Прим. ред.

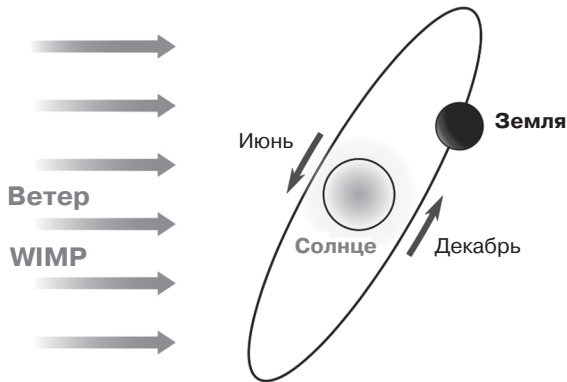


Рис. 8.3. Движение солнечной системы по направлению к созвездию Лебедь против ветра WIMP-частиц. С разрешения: K. Freese, M. Lisanti, and C. Savage, *Annual Modulation of Dark Matter: A Review*

Скептицизм объясняется тем, что другие эксперименты, например XENON, как мы увидим, оказались намного более чувствительными по сравнению с DAMA/LIBRA, однако не обнаружили ни единого сигнала темной материи. Коллаборация провела детальные исследования, чтобы исключить вероятность того, что сигнал пришел от других источников, но с негативным результатом. Согласно независимым исследованиям, сезонное изменение может быть результатом сезонных изменений фона мюонов или нейтронов.

В конечном итоге так и неочевидно, имеет ли отношение к темной материи сигнал, измеренный коллаборацией DAMA/LIBRA. Будь это на самом деле так, расхождение с другими экспериментами могло бы говорить о наших скудных знаниях того, как темная материя взаимодействует с обычной. Пытаясь получить ответы на вопросы, поднятые коллаборацией DAMA/LIBRA, в южном полушарии начали готовить эксперимент DMICE, с использованием тех же кристаллов и метода сезонных отклонений. Таким образом, станет возможным определить, связан ли этот сигнал с инструментарием или с окружающими явлениями.

Пока разрабатывался эксперимент DAMA, были предложены новые технологии, способные отличить сигналы темной материи от различных типов фонового шума. В 1985 году Блас Кабрера, Лоуренс Краусс и Фрэнк Вильчек предложили эксперимент, в котором путем измерения температурных вариаций, происходящих из-за взаимодействия нейтрино с экспериментальной установкой, можно отождествить эти частицы. Кабрера и Бернар Садуле расширили эту идею на поиск темной материи. В результате

появился эксперимент, который назвали CDMS¹ (Cryogenic Dark Matter Search – криогенный поиск темной материи), основанный на кристаллах германия, охлажденных до температуры абсолютного нуля ($-273,16$ °C). Этот эксперимент задуман как часть серии экспериментов, названных *криогенными экспериментами*, например COGENT, CRESST и EDELWEISS.

Энергия, полученная кристаллом после взаимодействия, измеряется с помощью одного или двух методов. COGENT действует в *ионизационном канале*. CDMS измеряет *ионизацию и фононы*. Как уже было сказано, фононы – это осцилляции кристаллической решетки очень низкой энергии. Эту энергию можно измерить, доведя кристалл до температуры нескольких тысячных Кельвина и используя сверхпроводник на поверхности. Помимо фононов и ионизации, измеряют также сигналы сцинтилляции. Сочетая эти каналы, возможно отличить сигналы, произведенные темной материей, от сигналов обычной материи.

Некоторые из криогенных экспериментов, такие как COGENT, CDMS и CRESST, которые измеряют сцинтилляцию и высвобожденное тепло, первоначально получили больше событий, чем ожидалось от фонового шума. Последующие проверки опровергли первые результаты.

Вероятность обнаружения темной материи преимущественно определяется произведением следующих величин: количества использованного материала (*мишени*), продолжительности эксперимента (время *экспозиции*) и количественной возможности понизить фон.

Эксперименты, которые мы с вами обсуждали, такие как CDMS, CRESST и COGENT, использовали количество материала порядка одного килограмма. Чтобы увеличить вероятность взаимодействия, надо достичь порядка сотен или тысяч килограммов. Делать это с экспериментами на основе кристаллов очень дорого, поэтому технология изменилась в пользу использования благородных жидкостей или газов.

8.3. Благородные газы

Метод с использованием благородных газов в жидком состоянии предложили в конце 90-х годов прошлого века Пио Пикки, Хангуо Ван и Дэвид Клайн.

Благородные газы неактивны, не имеют запаха и цвета. Название объясняется исключительно тем, что газы эти не являются реактивными, и значит, как и знать, не стремятся смешиваться с обычными людьми. Са-

¹ У CDMS есть несколько «наследников»: CDMSI, II, SuperCDMS и SuperCDMS SNOWLAB, последний еще в процессе подготовки.

мый распространенный из благородных газов в атмосфере — это *аргон*, его содержание составляет 0,932%. Атмосферный аргон содержит аргон-40, с сорока протонами, и следы аргона-39, который является радиоактивным и, следовательно, вводит тревожные сигналы, если его использовать для поиска темной материи. Если вы хотите использовать этот газ для поиска темной материи, то следует ограничиться аргоном-40. Это первое, что сделала коллаборация DARKSIDE, которая использует аргон как детектор. Его извлекают из недр Колорадо, потом отвозят в лабораторию Фермилаб в Иллинойсе, где его очищают, и, наконец, отправляют в Национальную лабораторию Гран-Сассо. В 2012 году испытали опытный вариант DARKSIDE10, а в 2013 году приступил к работе DARKSIDE50. В настоящее время строится DARKSIDE-20к, содержащий 20 тонн аргона, и на него возлагают надежды по поиску темной материи в виде WIMP-частиц.

Одним из благородных газов, позволяющих значительно увеличить чувствительность детекторов, является *ксенон* (от греческого слова «чужой»). Его заметили в 1898 году Уильям Рэмсей и Моррис Траверс в Англии. Следы этого газа есть в атмосфере, у него 54 протона, и он используется для производства ламп и осветительных приборов, в медицине для наркоза и как обезболивающее, а также в магнитно-резонансной диагностике, и в ионных реактивных двигателях. Особенно эффективными оказались эксперименты LUX и XENON: XENON10 с использованием 15 кг жидкого ксенона, XENON100 (165 кг жидкого ксенона) и HEXON1T (3,2 тонны жидкого ксенона). В качестве каналов обнаружения — сцинтилляция и ионизация. Когда частица темной материи взаимодействует с ядром ксенона, возникает вспышка света. Она измеряется приборами, т.н. *фотоэлектронными умножителями*. Одновременно электроны отрываются от ядра ксенона и двигаются к верхней части детектора, управляемые магнитным полем. Над жидким ксеноном находится ксенон в газообразном состоянии, в котором электрическое поле выше, чем в жидком состоянии, и электроны ускоряются до наступления дальнейшего события сцинтилляции. Таким образом, детектор позволяет реконструировать трехмерное положение взаимодействия частицы. Корреляции сцинтилляционных сигналов позволяют установить, есть ли события взаимодействия между темной материей и ядрами ксенона, или между обычными частицами и ядром или электронами ксенона. Снижение фона XENON1T возросло по сравнению с XENON10 благодаря выбору конкретных материалов и экранированию детектора большим резервуаром с водой. Благодаря этим мерам XENON1T смог бы обнаружить темную материю, будь хотя бы одно событие в год на тонну ксенона. Для компьютеров закон Мура определяет рост вычислитель-



ной мощности каждые полтора – два года. Детекторы темной материи следуют подобному закону: чувствительность растет в 10 раз примерно в два года, как видно на рис. 8.4.

В последних измерениях XENON1T поперечное сечение (чувствительность взаимодействия) WIMP-частиц с массой примерно 30 ГэВ составляет около 10^{-47} см². Следующие ксеноновые детекторы XENONnT и DARWIN еще больше повысят чувствительность.

Несмотря на все усилия и высокую чувствительность, которой удалось добиться, пока еще невозможно обнаружить какую-либо частицу темной материи. Однако отсутствие обнаружения не менее важно, поскольку дает знаки о том, что темной материей не является. Результаты вышеуказанных экспериментов обычно представляют на плоскости, где на горизонтальной оси масса частиц темной материи, а на вертикальной – интенсивность взаимодействия, как видно на рис. 8.5.

Кривые на рис. 8.5, т.н. *кривые исключения*, относятся к разным экспериментам и существенным образом исключают верхнюю часть плоскости. Частицы темной материи могут быть обнаружены только под ними. На этом графике *замкнутые кривые* обозначают «заявления» о наблюдении темной материи, как в случае эксперимента DAMA/LIBRA. Показаны несколько экспериментов с растущей чувствительностью сверху вниз. Некоторые, как LZ, пока еще только строятся. Эксперименты продолжают наращивать чувствительность, но это улучшение не может продолжаться вечно. Для экспериментов, размер которых в несколько сотен раз больше, чем у XENON1T, рассеяние нейтрино на ядре, представленное оранжевой линией, начнет создавать проблемы. Придется найти способ отличать нейтрино от сигналов темной материи. Кроме того, в результате недостатка обнаружений темной материи в экспериментах прямого обнаружения и в ускорителях, вероятно, придется выйти из парадигмы WIMP-частиц. На данный момент остается надежда, что темная материя состоит из других частиц, например аксионов. Недавно коллаборация XENON1T наблюдала избыток электронной отдачи, что было истолковано как связывание солнечных аксионов с электронами.

Один из способов обнаружить аксионы – это их трансформация в фотоны при наличии сильных магнитных полей, известная как *эффект Примакова*. На БАК проводится эксперимент под названием CAST (CERN Solar Axis Telescope) с целью обнаружения аксионов, исходящих от Солнца. Еще один способ обнаружить аксионы – это использовать микроволновые резонансные полости в сверхпроводящих магнитах. Этот метод используют в эксперименте ADMX (Axion Dark Matter Experiment) в Университете Вашингтона в Сиэтле.

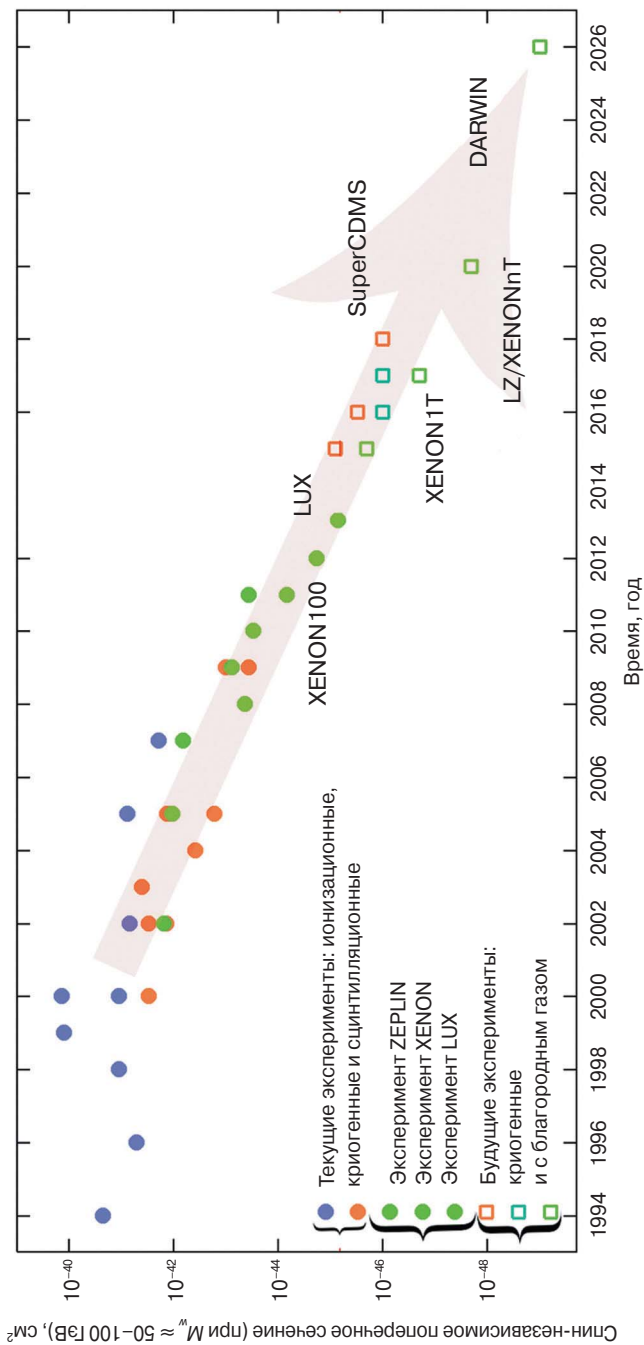


Рис. 8.4. Увеличение чувствительности измерений со временем. Представлены некоторые текущие эксперименты и те, которые еще предстоит провести. С разрешения: Modification of work by Laura Baudis (WIMP Dark Matter Direct-Detection Searches in Noble Gases)

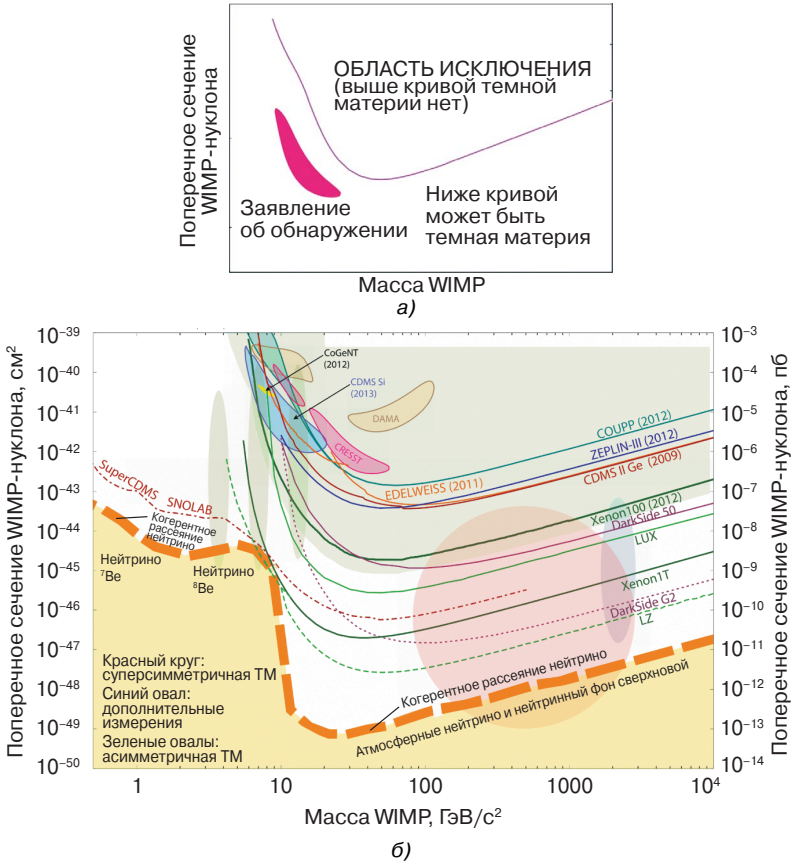


Рис. 8.5. Чувствительность ряда экспериментов. Незамкнутая линия — это *кривая исключения*, названная так, поскольку исключает часть плоскости над собой. Замкнутые кривые относятся к экспериментам, которые претендуют на обнаружение темной материи, например DAMA (а). Чувствительность планируемых и текущих экспериментов прямого обнаружения. Сплошные кривые — это проведенные или проводимые эксперименты. Пунктирные линии — это будущие эксперименты. Закрытые участки представляют разрешенные сигналы: DAMA (коричневые), CREST (розовые), CDMS (синие) и COGENT (желтые). Красный круг — это область, которую предпочитают модели SUSY. Синий овал (между Xenon100 и LZ) представляет темную материю на основании дополнительных измерений, а зеленые овалы слева представляют асимметричную темную материю. Линия «когерентного рассеяния нейтрино» представляет (неснижаемый) фон нейтрино. С разрешения: T. Saab, E. Figueroa-Feliciano, and SuperCDMS Collaboration, Dark Matter Limit Plotter, <https://supercdms.slac.stanford.edu/dark-matter-limit-plotter> (б)

Еще один способ обнаружить аксионы — это исследовать вращение *поляризованного света*¹, проходящего сквозь мощные магнитные поля. В 2006 году коллаборация PAVLAS, работающая по этому методу, заявила, что наблюдала такое вращение. Будь это на самом деле так, то это бы подтвердило существование аксионов массой $1-1,5 \times 10^{-3}$ эВ. К сожалению, последующие эксперименты опровергли этот результат. Есть астрофизические явления, в которых аксионы могли бы оставить свою «подпись». В звездах с сильными магнитными полями, таких как магнетар (магнитные звезды), превращение фотонов в аксионы могло бы быть намного эффективнее, чем в условиях лаборатории.

8.4. Косвенное обнаружение: темная материя и фотоны

Помимо метода прямого обнаружения, есть и другая возможность — *косвенное обнаружение*. Основы этого метода были описаны в двух публикациях в 1978 году: Джеймса Ганна и его коллег и Флойда Стекера. Обе группы сосредоточились на тяжелых лептонах (тяжелых нейтрино), показывая, как в результате аннигиляции пар этих частиц может возникнуть поток гамма-лучей. Исследование расширили на кандидатов в темную материю различных типов, например WIMP-частиц. Эти частицы аннигилируют, производя энергию в диапазоне 1–1000 ГэВ (в 1–1000 раз больше массы протона) в форме очень энергичных протонов, которые потом взаимодействуют с ядрами, которые есть в атмосфере, порождая каскады частиц (рис. 8.6). Наблюдать подобное гамма-излучение можно двумя способами.

Первый способ — использовать спутники, которые находятся над атмосферой, а второй — использовать наземные телескопы, полагаясь на конкретный эффект, который мы сейчас обсудим. Особенно важен для этого исследования *спутник Ферми*, предназначенный для изучения электромагнитного излучения в диапазоне 8 КэВ — 300 ГэВ. Спутник запустили в 2008 году, и состоит он из детектора вспышек гамма-лучей и *телескопа большой площади* (LAT — large-area telescope), чувствительного к гамма-излучению в диапазоне от 20 МэВ до 300 ГэВ. Во втором детекторе гамма-фотоны превращаются в пары электрон — позитрон, энергия которых измеряется, а направление происхождения фотонов реконструируется.

¹ Свет возникает в результате осцилляций электрического и магнитного поля. Если вектор, представляющий электрическое поле, осциллирует только в одной плоскости, свет является поляризованным.

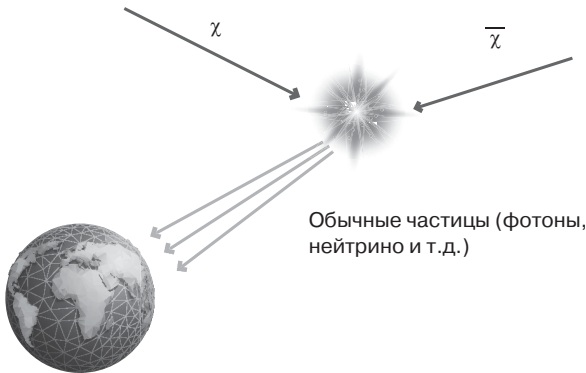


Рис. 8.6. Аннигиляция частиц темной материи, χ , которые можно обнаружить на Земле

Изучение темной материи, начиная с гамма-излучения, имеет преимущество: в отличие от заряженных частиц, эти лучи не искажаются магнитными полями, что позволяет проследить их источник.

Наземные телескопы работают совсем по-другому. Когда фотоны высокой энергии взаимодействуют с ядрами в атмосфере, генерируется огромное количество частиц, таких как электроны и позитроны, которые двигаются в воздухе со скоростью выше скорости света, производя голубое свечение в форме конуса, известное под названием *излучение Черенкова*. Это свечение аккумулируется телескопами с большими зеркалами. Например, телескоп HESS состоит из четырех телескопов, и поверхность каждого из зеркал 10^7 м². Зеркала представляют собой пиксельные камеры, позволяющие различать резкие срезы на изображениях. *Стереоскопическая техника* (т.е. комплекс телескопов наблюдает одно и то же событие с разных углов) отслеживает энергию и точную геометрию события и улучшает угловое разрешение. Эта техника комбинирует изображения, позволяя определить траекторию огромного количества частиц, а также энергию и направление появления фотонов.

Энергию подсчитывают исходя из интенсивности изображения, а направление — исходя из ориентации изображения. Тип частицы определяют по форме изображения. Сегодня работают несколько таких телескопов: уже упомянутый HESS (High Energy Stereoscopic System) в Намибии, VERITAS (Very Energetic Radiation Imaging Telescope Array System) в Аризоне, MAGIC (Major Atmospheric Gamma Imaging Cherenkov Telescope) на Канарских островах, Whipple в Аризоне, CANGAROO-III в Южной Австралии и HAWC (High-Altitude Water Cherenkov Observatory) в Мексике.

Будущее обнаружения темной материи, которая аннигилирует в фотонах, — это СТА (массив черенковских телескопов, англ. — Cherenkov Telescope Array), который состоит из нескольких сот телескопов трех разных размеров, 4, 12 и 23 м, с целью обнаружения фотонов разных энергий. Ожидается, что этот проект будет завершен к 2025 году.

Не все области одинаково подходят для обнаружения темной материи. Поток гамма-фотонов в результате распада WIMP-частиц зависит в основном от квадрата плотности WIMP-частиц и от расстояния. Это значит, что хотя такие структуры, как скопления, содержат огромное количество темной материи, поток уменьшается в результате их большой удаленности. И наоборот, скопления темной материи в нашей Галактике, которые обычно называют *субструктурами*, намного ближе, чем скопления, хотя и слабее. Таким образом, выбирая участки звездного неба для изучения, необходимо учитывать эти особенности. Также необходимо иметь в виду, что гамма-излучение может быть произведено такими астрофизическими источниками, как пульсары, которые усложняют поиск, действуя как генераторы фонового шума. В случае нашей Галактики мы знаем, что значительная часть темной энергии сконцентрирована в ее центре, и значит, это одна из важнейших областей для изучения. В результате изучения этой области с помощью нескольких телескопов узнали о превышении гамма-излучения в соответствии с аннигиляцией частиц массой порядка 50 ГэВ. Однако в той же области есть много астрофизических источников, гамма-излучение которых можно перепутать с теми, что образуются в результате аннигиляции WIMP-частиц. Есть и еще одна проблема: моделирования и наблюдения не дают возможности установить, какова реальная плотность темной материи в центральной части Галактики. Распределение темной материи в Галактике не является равномерным: есть своего рода комки, или субструктуры разных размеров, чье местоположение неизвестно. Среди субструктур можно назвать *карликовые галактики*, такие как Магеллановы Облака, которые вращаются вокруг нашей Галактики. Карликовые галактики и галактический центр изучает спутник Fermi, ограничиваясь аннигиляцией WIMP-частиц с массой менее 100 ГэВ, а более массивные частицы темной материи изучают наземные телескопы.

8.5. Темная материя и антиматерия

Еще один метод исследования темной материи на основе изучения антиматерии (позитроны и антипозитроны) в космических лучах предложили Джозеф Силк и Марк Средницкий. Как мы знаем, анти-

материя — это обычная материя с некоторыми другими свойствами. Например, частица антиматерии, соответствующая электрону, т.е. позитрон, имеет ту же массу, что и электрон, но противоположный заряд. Таким образом, антиматерия не столь экзотична, как ее любят преподносить в фантастических фильмах. В нашей Вселенной она встречается крайне редко, однако в ничтожном количестве есть даже в человеческом организме.

В бананах в малых количествах есть калий-40, в результате распада которого каждые 75 минут образуется позитрон. Когда мы едим банан, то в малой дозе поглощаем антиматерию, настолько малой, что она не приносит вреда нашему организму. Антиматерия постоянно попадает на Землю в виде космического излучения и производится над грозовыми облаками.

Какова связь между антиматерией и темной материей? Как известно, антиматерия есть в космическом излучении, причем соотношение между позитронами и электронами уменьшается с увеличением энергии. Однако при аннигиляции темной материи связь между позитронами и электронами растет с энергией. Итак, ища признаки существования темной материи, можно увидеть, растет ли связь между позитронами и электронами в космическом излучении с ростом энергии. С этой целью группа итальянских, шведских и немецких ученых приступила к программе исследования космоса совместно с российскими учеными. Несколько итальянских институтов предоставили сложные детекторы, которые после сборки нарекли PAMELA (Payload for Antimatter Matter Exploration and Light-nuclei Astrophysics) и 15 июня 2006 года запустили в космос с помощью космического корабля «Союз». Через пару лет, в 2008 году заметили рост связи позитронов и электронов с энергией, о чем в 2009 году была публикация в научном журнале *Nature*. Через несколько лет полученный результат подтвердили с помощью информации, полученной спутником Fermi. Однако возникли некоторые проблемы. Для объяснения данных было необходимо, чтобы скорость аннигиляции WIMP-частиц была в 100–1000 раз больше, чем та, что характерна для распада WIMP-частиц, в результате чего должен был обнаружиться связанный поток антипротонов, однако его не было. Проблему скорости аннигиляции можно решить, сославшись на локальные неоднородности в темной материи, которые могли бы привести к усилению скорости аннигиляции. Однако было показано, что обнаруженный детектором PAMELA сигнал можно объяснить и такими астрофизическими источниками, как пульсары. В этом и состоит основная проблема косвенного обнаружения: трудность от-

личить астрофизические сигналы от сигналов темной материи. После детектора PAMELA появились новые технические средства, такие как телескоп Fermi, альфа-магнитный спектрометр AMS-02, установленные в 2011 году на Международной космической станции, телескопы CALET (Calometric Electron Telescope) и DAMPE (Dark Matter Explorer), запущенные в 2015 году, которые продолжили и продолжают исследовать темную материю, однако положительных результатов пока нет.

8.6. Темная материя и нейтрино

Для того чтобы преодолеть проблему различения астрофизических сигналов от сигналов темной материи, можно использовать нейтрино. Темная материя пронизывает всю Вселенную, и на нее действует сила гравитации. Объекты, создающие сильное гравитационное поле, например нейтронные звезды, и в меньшей степени наше Солнце могут притягивать частицы темной материи, которые захватывает в ловушку гравитационное поле и, потеряв при столкновении с солнечными ядрами энергию, они остаются в центральной части звезды.

Нейтрино, рожденные в результате аннигиляции WIMP-частиц, могут покинуть Солнце, и их можно обнаружить на Земле. Этот метод в 1985 году предложил Лоуренс Краусс и его коллеги, и для его практического использования провели несколько экспериментов: телескоп BDUNT (Baikal Deep Underwater Neutrino Telescope) установили на глубине российского озера Байкал, телескоп ANTARES (Astronomy with a Neutrino Telescope and Abyss environmental Research Project) на юге Франции, сооружается нейтринный телескоп KM3NET в 80 км к юго-востоку от мыса Пассеро, на юго-восточном побережье Сицилии на глубине 3500 м. Были проведены эксперименты во льдах Южного полюса: нейтрино-мюонный детектор AMANDA и нейтринная обсерватория IceCube, сооруженные в кубическом километре льда на глубине 1500 и 2500 м (рис. 8.7). Все эксперименты объединяет один принцип. Когда ультра-энергичные нейтрино с Солнца порождают электроны и мюоны в воде или во льду, которые двигаются со скоростью выше скорости света, появляется свечение Черенкова. Это излучение обнаруживают оптические модули с фотоумножителями, прикрепленные к тросам, опущенным в воду или лед.

К сожалению, пока даже эти эксперименты не дали никаких результатов.

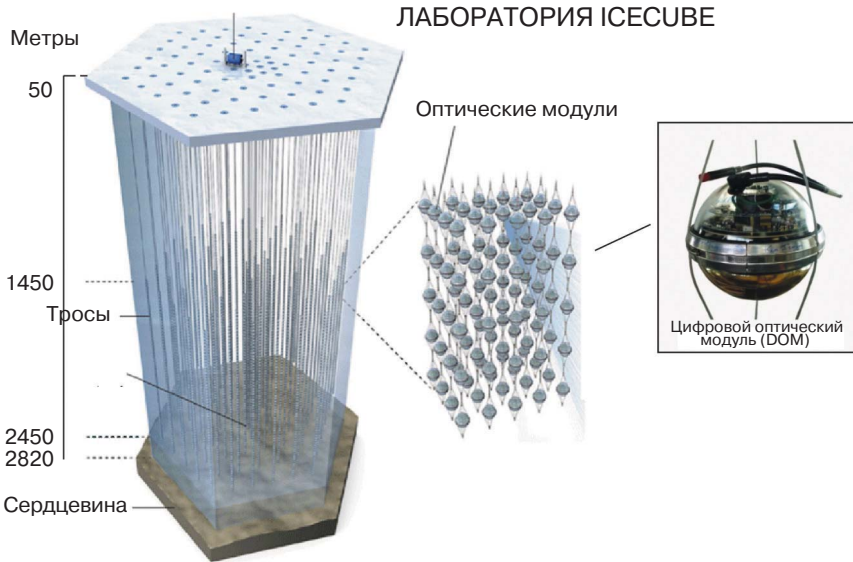


Рис. 8.7. Схема IceCube. Состоит из 86 тросов во льду. К каждому из них привязан оптический модуль, состоящий из фотоумножителей, наблюдающих за свечением Черенкова. С разрешения: Adapted from the IceCube website (<https://icecube.wisc.edu/science/icecube/detector>)

8.7. Рецепт приготовления темной материи

Есть и третий способ обнаружения темной материи: создать ее на ускорителях частиц, например на БАК, при столкновении обычных частиц при очень высоких энергиях. БАК — это самый большой и самый мощный адронный ускоритель в мире с энергией примерно 14 ТэВ. Расположен внутри 27-километрового туннеля на глубине 100 м под Женевой, между территорией Швейцарии и Франции. Хотя темная материя очень слабо взаимодействует с обычной, есть вероятность создать частицы темной материи в результате столкновения обычных частиц, например двух протонов. Важная часть программы БАК — обнаружить необычные частицы. Мы уже говорили о суперсимметричных частицах и, как мы знаем, WIMP-частицы суперсимметричны. Их обнаружение было бы не менее, а может, и более значимо, чем открытие бозона Хиггса. Столкновение двух протонов на высоких энергиях привело бы к созданию частицы антиматерии и ее античастицы. О присутствии частицы антиматерии можно было бы заключить на основании того, что в конечных событиях

возникли бы проблемы с сохранением энергии и импульса. Это объясняется слабым взаимодействием частицы темной материи с обычной материей: она возникает и тут же незамеченной улечучивается, но уносит с собой свою массу — энергию. А это нарушает закон сохранения энергии.

Говоря более детально, интересные события получаются в результате реакций. Например, такой:

$$pp \rightarrow \chi\bar{\chi} + x,$$

где два протона при столкновении создают частицу темной материи, χ , и ее античастицу плюс кое-что еще (обозначенное x), что может быть фотоном, W - и Z -бозоном в результате распада лептона или адронной струей, которая представляет собой конус частиц, созданных образованием адронов из кварков и свободных глюонов. Во время экспериментов на БАК (CMS и ATLAS) искали признаки существования новых частиц, имеющих отношение к разным суперсимметричным моделям и моделям с дополнительными измерениями. Все результаты полностью соответствовали результатам Стандартной модели.

Точности ради: в 2015 году на БАК наблюдали сигнал, который можно интерпретировать как распад гипотетической частицы массой 750 ГэВ на два фотона. Позже оказалось, что это статистическое отклонение.

8.8. Экспериментальное свидетельство существования темной материи

Из предыдущего обсуждения мы знаем, что у нас есть отличный инструмент для обнаружения темной материи. В последние десятилетия было сделано несколько заявлений о ее существовании, но в конечном итоге все они не получили подтверждения. Мы уже видели парочку. Свидетельство из данных детектора PAMELA оказалось совместимым с астрофизическими сигналами. Обнаружение гипотетической частицы массой 750 ГэВ оказалось статистическим отклонением. Кроме этих примеров, есть несколько других, о которых мы хотим здесь напомнить. В 1994–1995-х годах на аэростате HEAT наблюдали избыток позитронов в диапазоне 7–30 ГэВ, позже подтвержденных PAMELA и расширенных до 200 ГэВ с помощью FERMI. В 1997 году с помощью космического телескопа EGRET обнаружили избыток гамма-лучей более 1 ГэВ по сравнению с ожиданиями моделей галактического космического излучения, что соответствует WIMP-частице массой 50–100 ГэВ. В 2003 году космический телескоп INTEGRAL обнаружил яркое свечение 511 кэВ,

исходящее из балджа нашей Галактики. Спутники WMAP и Planck наблюдали «дымку» по плоскости нашей Галактики, истолкованную как результат WIMP-частиц 100 ГэВ. Спутник Fermi обнаружил выброс перпендикулярно плоскости Галактики в виде двух симметричных шаров, т.н. *пузырей Ферми*. В 2014 году тот же спутник наблюдал избыток гамма-излучения в одной части этой области. В публикации 2015 года сообщалось, что на самом деле это не признак темной материи.

Все эти результаты не дают никакой уверенности в существовании темной материи. Как видно, заявления об обнаружении темной материи не являются убедительными иногда из-за ограничений техники, иногда из-за трудности различения астрофизических явлений, которые порой мимикрируют под явления темной материи (например, случай с PAMELA), иногда в эксперименте обнаруживают всего лишь статистические отклонения (например, случай с частицей массой 750 ГэВ).

Неопровержимым доказательством существования темной материи могла бы быть *линия гамма-излучения*, поскольку ни один астрофизический процесс не производит *линию* при энергиях выше 1 ГэВ. В 2013 году Fermi обнаружил линию 133 ГэВ, но последующие исследования показали низкую статистическую значимость сигнала. В 2014 году спутники XMM-Newton и Chandra обнаружили линию 3,5 кэВ, истолкованную как вероятный распад стерильных нейтрино или аксионов. К сожалению, сигнал может быть вызван астрофизическими процессами, либо линией, произведенной плазмой.

Хотя эксперименты не принесли положительных результатов, они внесли весомый вклад в исключение моделей темной материи и сужение поля возможностей.

8.9. Будущее исследований темной материи

Итак, у нас есть несколько типов экспериментов, которые теоретически позволяют обнаружить частицы темной материи. Может возникнуть вопрос: достаточно ли, если один из них даст нам положительный сигнал, для того, чтобы мы обнаружили темную материю? Ответ на этот вопрос нетривиален.

Например, если на БАК можно производить новые частицы, необходимо сделать так, чтобы все они обладали свойствами темной материи. Например, они должны быть устойчивыми. Проверить это на БАК не так просто, поскольку мы можем определить устойчивость за очень короткие периоды времени, в соответствии со временем, в течение которого частицы образуются и обнаруживаются. Есть и еще одна проблема: мы

не можем знать, достаточно ли много новых частиц для того, чтобы образовать всю темную энергию во Вселенной. Другими словами, одни только эксперименты на БАК не могут со всей уверенностью сказать нам, что новые частицы образуют темную материю.

Подобным образом, если бы один из экспериментов прямого обнаружения выявил сигнал сильнее фонового шума, мы бы не знали наверняка, является ли этот сигнал результатом темной материи или какого-либо неизвестного нам фонового шума. Мы даже не могли бы знать, есть ли в достаточном количестве частицы, породившие сигнал, для того, чтобы образовать темную материю. И наконец, сигналы в экспериментах косвенного обнаружения, интерпретируемые как темная материя, могли исходить от астрофизических источников, как уже было с несколькими результатами, полученными в прошлом, например с PAMELA.

Подытоживая, можно сказать, что для обнаружения темной материи нам должна сопутствовать очень большая удача и нужно, чтобы более чем одна из используемых техник обнаружения дала положительный результат. Только тогда мы могли бы сопоставить полученные разными инструментами «фотороботы» и надеяться, что они совпадут.

Поиск темной материи похож на притчу про слепых и слона, которую мы уже рассказывали. Как и слепым, чтобы понять природу темной материи, необходимо собрать информацию с разных точек зрения (используя разные инструменты). В отличие от слепых, которые закончили жаркими спорами по поводу свойств слона, для составления пазла полученную разными методами информацию придется должным образом объединить.

Однако при современном уровне знаний у нас остается сомнение: а что если темной материи вообще не существует? Поговорим об этом в разделе 9.6.

ГЛАВА 9

ТЕМНАЯ ЭНЕРГИЯ

Правда невероятнее вымысла: вымысел должен быть похож на возможное, а правда — нет.

Марк Твен

9.1. Новый сюрприз от космологии

В отличие от концепции статической вселенной, благодаря которой Альберт Эйнштейн внес изменения в уравнения общей теории относительности, Александр Фридман, а позже Жорж Леметр показали, что уравнение Эйнштейна предсказывает расширяющуюся вселенную. Однако идею о расширяющейся вселенной восприняли лишь в 1929 году, после публикации результатов наблюдений Эдвина Хаббла. Согласно знаменитому закону Хаббла Земля и наша Галактика не занимают привилегированного положения в нашей Вселенной. Это великое открытие изменило парадигму статической природы Вселенной, которую ранее никто не ставил под сомнение. Однако это был не последний сюрприз, уготованный нам космологией. Через 69 лет после открытия Хаббла обнаружили особый тип звезды, с которой мы скоро познакомимся, и была низвергнута еще одна истина. В первую очередь возникает вопрос: скорость расширения Вселенной остается постоянной или изменяется со временем? Интуитивно можно дать следующий ответ. Давайте рассмотрим конкретную область Вселенной, содержащую галактики. Благодаря расширению эта область имеет тенденцию к увеличению, но расширение замедляется в результате гравитационной силы. Очевидно, что чем крупнее галактики в этой области, тем слабее тенденция к расширению. Следовательно, скорость расширения связана с «поединком» между гравитационной силой, замедляющей движение галактик, и расширением. С точки зрения теории ответ на поставленный нами вопрос связан с уравнениями общей теории относительности, которые определяют, как развивается система в пространстве и времени. Эти уравнения говорят о том, что геометрия пространства–времени определяется массой и энергией, которые в нем содержатся. Чем больше

содержание, тем больше тенденция к замедлению расширения. Как мы узнали в главе 1, существует три варианта. В первом случае массы—энергии достаточно, и гравитация постепенно замедлит систему, пока она не достигнет максимального расширения и затем снова сожмется. Галактики начнут сближаться, пока система не рухнет вовнутрь, что приведет к т.н. *Большому сжатию*, которое, по сути, есть противоположность Большому взрыву. Это можно представить с помощью параметра расширения¹ в виде неравенства $\Omega > 1$. Так, Вселенная снова сожмется, если ее плотность выше, чем 5 атомов на кубический метр.

Если же плотность меньше или равна критической, 5 атомов на кубический метр ($\Omega \leq 1$), то материи—энергии будет недостаточно для того, чтобы остановить расширение и привести систему к повторному сжатию. Расширение замедлится, но Вселенная в любом случае будет расширяться вечно.

С точки зрения наблюдений, возможно определить скорость расширения от первичной эры до сегодняшнего дня. Для этого необходимо вспомнить, что когда мы наблюдаем удаленный объект, мы наблюдаем его в момент излучения света, а не таким, какой он есть сегодня.

Измеряя скорость разбегания галактик, расположенных на различном расстоянии, мы можем определить скорость расширения Вселенной в различные эпохи.

Для этого необходимо определить как расстояние до объекта, так и скорость его удаления независимыми способами. Постоянная пропорциональности между скоростью и расстоянием — это постоянная Хаббла, которая и есть скорость расширения Вселенной. Основная проблема состоит в том, чтобы определить расстояние до объекта. Как мы это делаем? Можно использовать *стандартные свечи*, объекты с известной яркостью. Можно использовать *цефеиды*, но они для нашей цели не подходят, поскольку они видны до нескольких десятых мегапарсека. Этого расстояния недостаточно для того, чтобы установить, какого рода геометрия у нашей Вселенной.

Более того, на расстояниях больше 10 мегапарсеков скорость расширения меняется со временем, и расстояние зависит не только от закона Хаббла, но и от плотности и давления материи.

Чтобы определить геометрию Вселенной, необходимо достичь расстояний 1000 мегапарсеков или еще больше. На таких расстояниях длины волн сдвигаются примерно на 30% от космологического красного смещения, z , а в то время Вселенной было примерно 10 миллиардов лет.

¹ Параметр плотности, равный отношению реальной плотности Вселенной к так называемой критической плотности. — *Прим. науч. ред.*



Особенно важны для нас такие стандартные свечи, как *сверхновые типа Ia*. Они зародились в результате взрыва углеродно-кислородных белых карликов (см. раздел 5.5). У белых карликов низкого вращения есть максимальный предел массы, т.н. *предел Чандрасекара*, эквивалентный примерно 1,44 солнечной массы. Если белый карлик находится в двойной системе, то его масса может увеличиться, когда на него аккрецирует его звезда-компаньон. Когда масса белого карлика приближается к пределу Чандрасекара, температура в его сердцевине может приблизиться к значениям, необходимым для синтеза углерода. Через несколько секунд после начала синтеза большая часть массы звезды подвергается термоядерной реакции, которая высвобождает большое количество энергии, способной привести к мощному взрыву. При взрыве сверхновой типа Ia (SnIa) стремительно растет яркость, достигая внутренней яркости, эквивалентной яркости нескольких миллиардов солнц. Более того, внутренняя яркость во всех взрывах этого типа очень похожа, благодаря равномерности масс взрывающихся белых карликов. Потом яркость снижается и через несколько сотен дней большинство звезд SnIa исчезают в свечении домашней галактики. Таким образом, масса белых карликов в момент взрыва одинакова во всех звездах, и физика взрыва, порождающего сверхновую, похожа в разных белых карликах. Следовательно, высвобождаемая энергия, характеристики взрыва и явление сверхновой очень похожи в разных сверхновых, которые могут служить стандартными свечами. Ради точности следует заметить, что есть различия в пиках яркости звезд SnIa, но эти расхождения можно корректировать с помощью эмпирической связи между пиком яркости и скоростью падения яркости со временем, которую открыл в 1993 году Марк Филлипс¹. Чем быстрее снижается яркость, тем слабее сверхновая. Таким образом, SnIa ведут себя как идеальные стандартные свечи.

У них преимущество по сравнению с цефеидами: они намного ярче и, следовательно, наблюдать их можно с больших расстояний. К тому же, нам важна скорость их разбегания, которую можно определить, изучая красное смещение испускаемого ими света. Учитывая расстояния и скорости сверхновых, мы можем оценить скорость расширения Вселенной в разные эпохи. Однако есть одна проблема. SnIa — это редкие звезды. Вселенная типа нашей производит одну SnIa за сто лет, а после взрыва их яркость заметна в течение всего лишь нескольких недель. Значит, нет смысла наблюдать далекую галактику и ждать взрыва SnIa, необходимо одновременно наблюдать много галактик, чтобы увеличить вероятность

¹ Этот эффект открыл советский ученый Псковский, и эффект сейчас носит название Псковского — Филлипса. — *Прим. науч. ред.*

обнаружения одной или более одной сверхновой. Необходимо наблюдать одновременно тысячи или миллионы галактик.

В 90-е годы прошлого столетия для поиска сверхновых создали два проекта: High-z Supernova Search Team (HZSNS) под руководством Брайана Шмидта и Supernova Cosmology Project (SCP) под руководством Сола Перлмуттера. Проект Перлмуттера появился на основе проекта массовых вымираний по астрономическим причинам. В 1984 году палеонтологи Дэвид Рауп и Джек Сепкоски опубликовали статью, где заявили о существовании периодичности массовых вымираний в 26 миллионов лет. В том же году две группы астрономов, Дэниэл Вайтмаэр и Альберт Джексон, а также Дэвис, Хат и Р. Мюллер, опубликовали гипотезы, схожие с заявлением палеонтологов. По их мнению, массовые вымирания вызывала некая звезда Немезида, по имени греческой богини возмездия. Эта гипотетическая звезда, по-видимому, красный или коричневый карлик, влияет на объекты, которые присутствуют в огромной сфере вокруг Солнечной системы, называемой *Облако Оорта*, т.н. фабрике комет. В результате она увеличивает число комет, несущихся к Солнечной системе, что увеличивает вероятность их столкновения с Землей. Руководителем Перлмуттера был Ричард Мюллер. Перлмуттер создал автоматический поиск слабых звезд. Этот проект не дал каких-либо результатов, но чтобы работа не пропала зря, решили использовать ее для автоматического поиска сверхновых. История другой группы достаточно ординарна. Наблюдая 1 миллион галактик за ночь, две команды обнаружили несколько SNIa, расположенных на разных расстояниях. Сопоставив эти расстояния с относительными скоростями разбегания, два проекта смогли оценить изменение скорости расширения Вселенной от древних эпох по сегодняшний день. Любопытная деталь: цель обеих команд была измерить замедление расширения — в соответствии с главенствующими в тот момент представлениями.

По этому поводу есть забавная история, которую рассказал Лоуренс Краусс в своей книге *The Universe from Nothing* («Вселенная из ничего»). Когда они с Перлмуттером работали в обсерватории Лоуренса Беркли и обсуждали среди всего прочего гипотезу о том, что Вселенная плоская и 70% материи — это материя из вакуума, Перлмуттер сказал ему: «Мы докажем, что вы ошибаетесь». То, что они обнаружили, оказалось полной противоположностью: в течение четырех-пяти миллиардов лет Вселенная расширялась с растущей скоростью — в 2011 году Перлмуттер, Шмидт и Адам Райс получили за это Нобелевскую премию.

Первой проблемой, с которой столкнулись ученые, определяя скорость расширения Вселенной, был каталог сверхновых на различных рас-

стояниях до нескольких тысяч парсеков. Сверхновые Филлипса были слишком близко, поэтому двум группам пришлось заняться кропотливой работой по составлению необходимого каталога. Четыре года они каталогизировали сверхновые на расстоянии 4000 мегапарсеков.

Определившись с необходимыми сверхновыми, они смогли понять, насколько расширилась Вселенная с данного момента в прошлом, по их расстоянию и красному смещению светового спектра дальних галактик, что среди всего прочего дает их скорость.

Для определения скорости расширения необходимо знать расстояние до галактик и их красное смещение. Если скорость, с которой Вселенная расширяется, со временем уменьшается, это значит, что в прошлом расширение было быстрее и, следовательно, Вселенной понадобилось меньше времени для достижения настоящего состояния. В результате наша Вселенная моложе, чем вселенная с ускоренным расширением. Значит, свет должен пройти меньшее расстояние, чтобы достичь нас. Если скорость расширения снижается, поскольку стандартная свеча ярче, когда она к нам ближе, у нас будут более яркие сверхновые, чем те, что есть в нашей Вселенной, где расширение происходит с постоянной скоростью. Однако то, что *наблюдали астрономы, оказалось полной противоположностью: сверхновые были менее яркими*. Другими словами, для данного красного смещения z сверхновые были более удалены, чем были бы, если бы Вселенная расширялась с постоянной скоростью. Итак, Вселенная ускорялась.

Еще один важный момент: вселенная, состоящая только из материи, не может произвести ускоренное расширение. На самом деле, гравитация имеет тенденцию замедлять расширение вселенной, и, следовательно, должен быть новый компонент, который приводит к гравитационному отталкиванию. Для этого необходима жидкость с *отрицательным давлением*. Обе группы пришли к заключению, что для объяснения собранных ими данных необходим новый компонент нашей Вселенной. Во время анализа две группы рассматривали три разные модели: две модели, состоящие только из материи, барионной и темной — одна с гиперболической геометрией $\Omega_m = 0,3$ и одна с плоской геометрией $\Omega_m = 1$. Астрономы видели, что сверхновые были менее яркими, чем это предсказывали модели, в которых расширение Вселенной замедляется. Чтобы объяснить эти данные, они ввели третью модель, которая, помимо материального компонента, учитывала наличие космологической постоянной, за которую можно принять жидкость с отрицательным давлением с $\Omega_m = 0,3$ и $\Omega_\Lambda = 0,7$. В космологии такого типа в настоящее время расширение ускорено, а в прошлом расширение было медленнее. Следовательно,

Вселенная дольше достигала настоящего состояния, и она старше, чем в других космологиях.

Второй важный момент: свет должен пройти большее расстояние, чтобы достичь нас и, следовательно, сверхновые, как другие источники, менее яркие, чем во вселенной с замедленным расширением. Результаты работы двух групп показаны на рис. 9.1 (верхняя панель), где расстояние (по отношению к яркости) есть функция красного смещения.

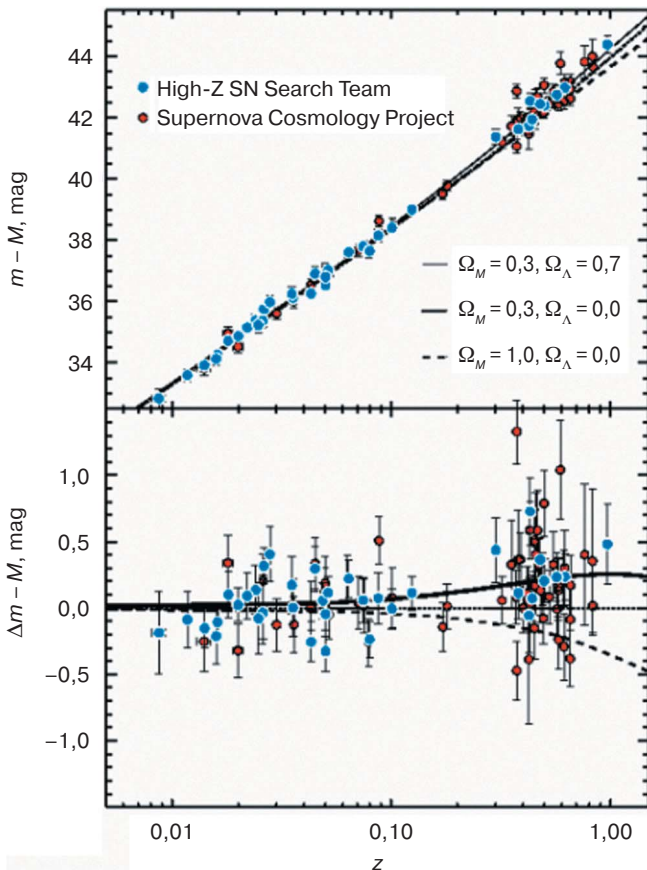


Рис. 9.1. Результаты двух проектов поиска сверхновых. Верхний график — это отношение величины красного смещения (диаграмма Хаббла) для сверхновых с большими красными смещениями проектов HZSNS и SCP. Нижний график представляет верхний, без кривой для $\Omega_m = 0,3$ и $\Omega_\Lambda = 0$. С разрешения: Perlmutter and Schmidt, *Supernovae and Gamma-Ray Bursters*, edited by K. Weiler, Lecture Notes in Physics, vol. 598, pp. 195–217

На первый взгляд, нет большой разницы между космологиями вселенной, которая замедляется (кривая со штриховой линией и пунктирной), а именно первые две линии снизу, и вселенной, которая ускоряется, а именно верхняя сплошная линия. Если же приглядеться, то видно, что больше звезд SnIa распределено на верхней линии, соответствующей ускоряющейся вселенной. На рис. 9.1 (нижняя панель) отчетливо видны различия между моделями. Верхняя линия лучше описывает данные и соответствует ускоренно расширяющейся вселенной.

Простейшая форма сущности, которая ускоряет Вселенную, — это космологическая постоянная Λ .

Другие подтверждения ускоренного расширения еще раз получили с помощью данных по анизотропии реликтового излучения. Космическая обсерватория Planck также измерила эффект линзирования реликтовых фотонов. На малых угловых масштабах изображение реликтового фона слегка искажено из-за отклонения реликтового света материей между нами и поверхностью последнего рассеяния. Сигнал подавляют структуры, образованные за последние три миллиарда лет. Соединив эти данные со спектром анизотропии реликтового излучения, получают информацию об ускоренном расширении Вселенной, предоставляя дополнительное свидетельство к свидетельству, полученному с помощью сверхновых.

9.2. Космологическая постоянная и темная энергия

Итак, нам необходим компонент, отличный от обычного вещества, который называется *темной энергией*, и мы знаем, что $\Omega_\Lambda = 0,69$. Этот термин используют по историческим соображениям. Как мы уже говорили, в 1917 году Альберт Эйнштейн в статье, которую можно считать началом современной космологии, «Космологические соображения к общей теории относительности»¹, ввел эту постоянную, определяющую Вселенную как статическую. Как показал Виллем Де Ситтер, космологическая постоянная не принуждает Вселенную быть статической. На самом деле, пустая вселенная с космологической постоянной расширяется экспоненциально. Космологическая постоянная во вселенной де Ситтера вела себя как источник гравитации отталкивания, независимо от массы, которая в этой работе не присутствует. Эта гравитационная сила равномерна во времени и постоянна в пространстве, и, как мы сейчас

¹ Оригинальное название: Kosmologische Betrachtungen zur allgemeinen Relativitätstheorie.

увидим, еще одна странность космологической постоянной в том, что она порождает отрицательное давление.

Интересный момент: устаревшая космологическая постоянная способна объяснить ускоренное расширение Вселенной.

Как же это происходит?

Уравнения общей теории относительности¹ состоят из левой части, которая описывает геометрию пространства–времени, и из правой части, связанной с содержащейся в ней массой и энергией. Для объяснения ускоренного расширения к правой части уравнения добавляют космологическую постоянную Λ , которую можно рассматривать как постоянный вклад в плотность энергии Вселенной. Это энергия, которая равномерно наполняет всю Вселенную. Мы не знаем, является ли она на самом деле постоянной, как не знаем ее происхождения, поэтому обычно ее обозначают термином «темная энергия». Эффект этой энергии состоит в том, что она производит ускоренное расширение Вселенной. Космологическая постоянная Λ производит гравитационное отталкивание, что противоречит интуиции: ведь мы знаем, что гравитация всегда притягивает. Чтобы понять, почему это происходит, необходимо помнить, что в общей теории относительности гравитационные силы порождают не только материя и энергия, но и давление, которое они производят. Если давление отрицательное, получается отталкивание.

Предположим, у нас есть контейнер с идеальным газом, у которого положительное давление, и мы его сжимаем. Чтобы уменьшить объем и сжать его, необходимо сделать усилие, и газ будет аккумулировать энергию. Предположим, у нас тот же контейнер, полный темной энергии. Следует подчеркнуть, что это не реальная ситуация, поскольку темная энергия распространяется повсюду, и ее нельзя поместить в контейнер. Поскольку плотность темной энергии (состоящей из космологической постоянной) по определению постоянна, энергия в контейнере пропорциональна занимаемому ей объему. Когда поршень опускается, по мере уменьшения объема энергия также уменьшается. Темная энергия ведет себя как типичная система с отрицательным давлением или отрицательной плотностью. В системе с отрицательным давлением гравитация ведет себя не так, как обычно, а противоположным образом. Она действует как антигравитация и производит гравитационное отталкивание. Следовательно, темная энергия может объяснить ускоренное расширение. Если темная энергия – это космологическая постоянная для объяснения расширения на языке нашей трехмерно-плоской Вселенной, то необходимо, чтобы $\Omega_\Lambda = 0,69$.

¹ Уравнения общей теории относительности $R_{\mu\nu} - \frac{1}{2}Rg_{\mu\nu} + \Lambda g_{\mu\nu} = \frac{8\pi G}{c^2}T_{\mu\nu}$.

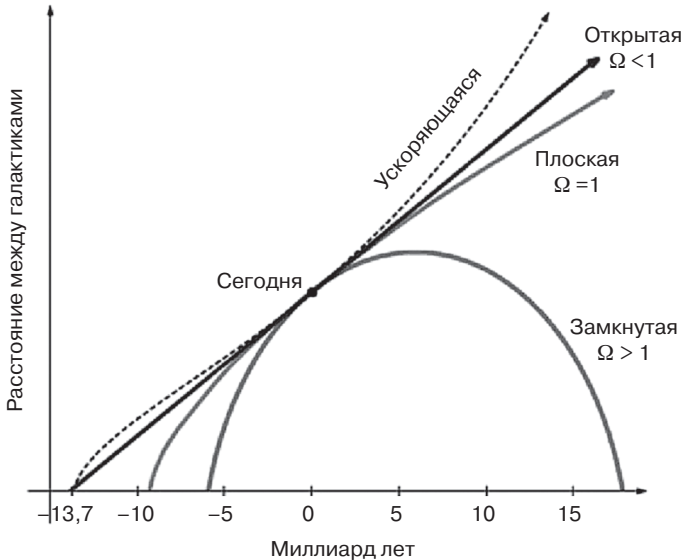


Рис. 9.2. Модели Вселенной. Пунктирная линия обозначает модель ускоренного расширения, которая описывает нашу Вселенную

Это меняет эволюцию Вселенной. Вид решений уравнений общей теории относительности, как показано на рис. 9.2, тоже меняется. С момента Большого Взрыва Вселенная была подвержена замедленному расширению в течение примерно пяти миллиардов лет назад, после чего расширение ускорилось (штриховая кривая).

В общей теории относительности космологическая постоянная — это просто термин, который добавили к уравнениям поля. Может возникнуть вопрос: каков физический смысл этой величины? Один ответ — в квантовой механике и в *физике квантовых полей*.

Космологическая постоянная сегодня интерпретируется как энергия квантового вакуума. Однако в этой интерпретации есть проблема, крупнейшая проблема теоретической физики. В сущности, вакуум заполнен всеми возможными полями: электрослабым, КХД, полем Хиггса и, как правило, бозонным и фермионным полями. В процессе вычислений с теорией квантовых полей возникает та же самая проблема, которую мы уже обсуждали — проблема иерархии, в которой виртуальные частицы внесли большой вклад в массу бозона Хиггса. Еще раз, каждое поле дает очень большие (положительный и отрицательный) вклады, и определенно больше, чем величина темной энергии, следующая из наблюдений. Эта проблема была известна еще до 1998 года, а темную энергию считали

нулевой, подразумевая своего рода магическое сокращение среди образующих ее гигантских вкладов, подобно тому, что случается с полем Хиггса. После определения в 1998 году величины космологической постоянной и открытия, что она не равна нулю, обнаружили несоответствие между наблюдаемыми и вычисляемыми значениями энергии вакуума порядка 10^{120} . Это огромное расхождение и представляет собой *проблему космологической постоянной*.

Это расхождение сокращается в теории струн до коэффициента $\approx 10^{50}$, что тоже слишком много. Физики надеются, что будущая теория квантовой гравитации, которая сочетает гравитацию с квантовой механикой, сможет решить эту проблему. Обратите внимание: проблема космологической постоянной существует, если Λ можно идентифицировать как энергию вакуума, но это не точно.

Она может иметь отношение (даже если это маловероятно) к полю Хиггса или к другим полям. Хотя Эйнштейн в 1931 году удалил космологическую постоянную из своих уравнений, она осталась в теоретической физике. История — длинная и сложная, как написал о ней в статье 2017 года Лохлайнн О’Райфертайг¹. Ее не экзсумировали в 1998 году, потому что после того, как ее извлек из цилиндра маг Эйнштейн, она не захотела вернуться.

9.3. Геометрия пространства

Помимо сверхновых, есть и другие способы показать, что нашей Вселенной нужен дополнительный компонент для объяснения наблюдений. Геометрия пространства—времени определяется количеством материи и энергии, которые в нем содержатся. Когда мы говорили о реликтовом излучении (глава 4), мы показали, что его типичные неоднородности (анизотропия) имеют угловые размеры примерно в 1 градус, а значит, наша Вселенная плоская. Тот же результат получен при сравнении изображений карты анизотропии реликтового излучения с моделями. На рис. 9.3 представлено сравнение карты анизотропии реликтового излучения, полученной с помощью проекта BOOMERanG, о котором шла речь в главе 2, с моделями, тремя врезками под картой BOOMERanG. В результате сравнения становится очевидно, что у нашей Вселенной плоская геометрия.

На самом деле больше всего похож на карту BOOMERanG центральный фрагмент, который точно соответствует плоской Вселенной.

¹ <https://arxiv.org/ftp/arxiv/papers/1711/1711.06890.pdf>.

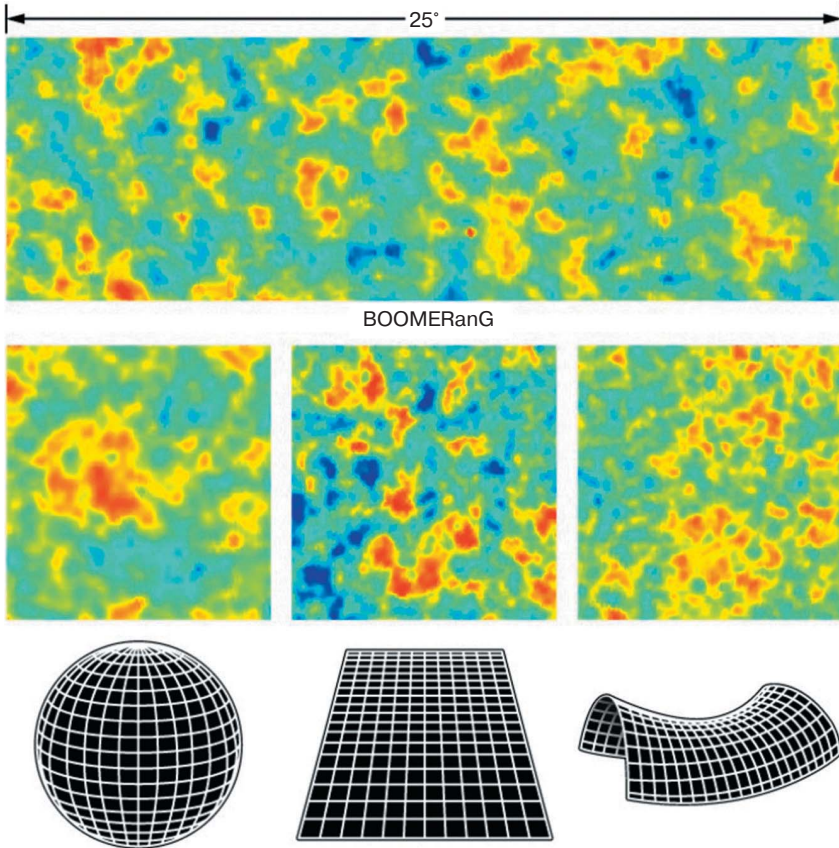


Рис. 9.3. Сравнение данных BOOMERanG (верхняя панель) с моделями (центральная модель) замкнутой (слева), плоской (в центре) и открытой (справа) вселенной. С разрешения: Modification of work by NASA

Согласно решениям Фридмана на рис. 9.2, наша Вселенная представлена черной пунктирной линией.

Как мы уже знаем, существует параметр, который обозначает материальное содержание Вселенной с точки зрения критической плотности и, следовательно, определяет геометрическую структуру и будущее Вселенной: параметр плотности, $\Omega = \rho/\rho_c$. Существует значение параметра плотности для каждого материального компонента Вселенной. Например, для темной материи это $\Omega_{\text{ТМ}} = \rho_{\text{ТМ}}/\rho_c$. Мы уже знаем, что если $\Omega = 1$, то Вселенная плоская. Чтобы получить значение Ω , нужно учитывать различные формы материи во Вселенной.

Согласно данным, полученным с помощью спутника Planck в 2015 году, вклад барионной материи $\Omega_{\text{бар}}$ равен 0,0486 (4,86%), темной материи, $\Omega_{\text{тм}}$, равен 0,2589 (25,89%), и (пренебрежимо малый) вклад излучения, $\Omega_{\text{рад}}$, 0,00005 (0,005%) и 0,004 (0,4%) вклад нейтрино. Сложив указанные вклады, получаем: $\Omega = \rho/\rho_c = \Omega_{\text{тм}} + \Omega_{\text{бар}} + \Omega_{\text{рад}} + \Omega_{\nu} \approx 0,31$. Как мы уже знаем, наша Вселенная плоская, поэтому $\Omega \approx 1$. А значит, компоненту материя – энергия не хватает 0,69 (69%). Как мы знаем, это темная энергия. Сумма всех вкладов, включая темную энергию, $\Omega = \rho/\rho_c = \Omega_{\text{тм}} + \Omega_{\text{бар}} + \Omega_{\text{рад}} + \Omega_{\nu} + \Omega_{\Lambda} = 1,0023 \pm 0,0054$. Этот результат говорит о том, что

- Вселенная плоская и бесконечная в соответствии с теорией инфляции, и мы можем видеть лишь ее часть, у наблюдаемой части радиус примерно 46 миллиардов световых лет;
- суммарная энергия Вселенной равна нулю, поскольку количество положительной энергии в форме материи (кинетическая энергия) компенсируется отрицательной энергией, связанной с гравитацией. Это одно из свойств инфляции: отрицательная энергия гравитации в подверженных инфляционному расширению областях уравнивается инфляционным полем. Другими словами, в космологических масштабах в соответствии с наблюдениями за взаимную компенсацию энергии материи и гравитационной энергии отвечает инфляция. Однако идея о том, энергия вакуума равна нулю, появилась раньше идеи об инфляции. Паскуаль Джордан был первым, кто высказал мысль о взаимной компенсации отрицательной энергии гравитационного поля и положительной энергии массы. Следовательно, по его мнению, звезда может возникнуть в результате квантовых переходов, не нарушая сохранения энергии. Георгий Гамов тоже обсуждал эту идею с Эйнштейном;
- Вселенная зародилась в результате квантовой флуктуации энергии квантового вакуума. Впервые эту мысль высказал в 1973 году Эдвард Трайон, опубликовав статью в *Nature*, и у него было много последователей. Таким образом, вопреки тому, что многие философы утверждали, что ничто не создается из ничего, согласно теории инфляции Вселенная это, как сказал Алан Гут, «лучший бесплатный обед». Все может появиться из ниоткуда;
- существование компонента Вселенной с отрицательным давлением имело серьезные последствия для эволюции и будущего Вселенной, что мы скоро и обсудим.

Необходимо быть уверенным в том, что темная энергия существует, и параметры, которые определяют нашу Вселенную, именно те, что

получены методом наблюдения сверхновых и с помощью анизотропии реликтового излучения. Получение более глубокого понимания темной энергии стало одной из насущных проблем современной космологии. Для понимания природы темной энергии необходимо использовать разные способы измерения ускорения.

Первый метод, независимый от наблюдения сверхновых, связан с изучением *барионных акустических осцилляций* (Baryonic acoustic oscillations, BAO). В чем же он состоит?

Как мы говорили в главе 2, до рекомбинации Вселенная состояла из плазмы барионной материи и фотонов. Области с плотностью выше средней притягивали материю и фотоны, производя давление, в противовес гравитации.

Это перетягивание каната между гравитацией и давлением создавало осцилляции, подобные звуковым волнам. Области с плотностью выше средней состояли из барионов, фотонов и темной материи. Давление порождало сферические звуковые волны фотонов и барионов, которые двигались наружу от центра с более высокой плотностью, состоящей из темной материи, со скоростью 170 000 км/с. Акустические волны проходили сквозь первичную плазму, она охлаждалась и в результате рекомбинации образовывала нейтральные атомы. Фотоны могли перемещаться свободно, и они удалялись со скоростью света, а барионы «вмораживались» в сферической области. Таким образом, прежде чем исчезнуть, сферические звуковые волны оставляли отпечаток своего существования на материи Вселенной (рис. 9.4).

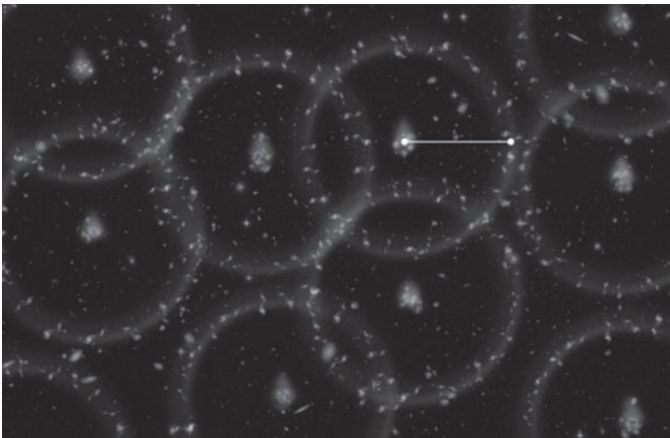


Рис. 9.4. Представление барионных областей вокруг «комков» темной материи (центральные точки). С разрешения: BOSS collaboration

Барионы, расположенные в сферических областях, и темная материя в центре областей составили области неоднородности, которые притягивали материю, образуя галактики. Звуковые волны прошли от Большого взрыва до рекомбинации за 380 000 лет. Расстояние, которое звук проходил за этот период, обозначают термином *звуковой горизонт*. Учитывая расширение Вселенной, размер сферических областей при рекомбинации составлял 450 000 световых лет. В настоящий момент ее размер 490 миллионов световых лет. Следовательно, мы ожидаем увидеть больше пар галактик, разделенных 490 миллионами световых лет, по сравнению со случайным распределением. Это можно увидеть, изучая крупномасштабные структуры Вселенной с помощью наблюдений, таких как BOSS (Baryon Oscillation Spectroscopic Survey – спектроскопическое наблюдение барионных осцилляций).

В то время как сверхновые типа SnIa представляют собой стандартные свечи, ВАО – это *стандартная линейка* в 490 миллионов световых лет для длин шкал в космологии (рис. 9.5), благодаря которой можно определить расстояние.

ВАО могут углубить наше знание об ускорении, если наблюдения *звукового горизонта* сегодня, используя информацию о распределении галактик в современный момент времени, сравнить с наблюдениями звукового горизонта в момент рекомбинации, используя данные по анизотропии реликтового излучения. Следовательно, ВАО – это своего рода известная линейка стандартного размера, с помощью которой мы лучше разберемся с природой ускорения, полностью независимо от сверхновых (рис. 9.5).

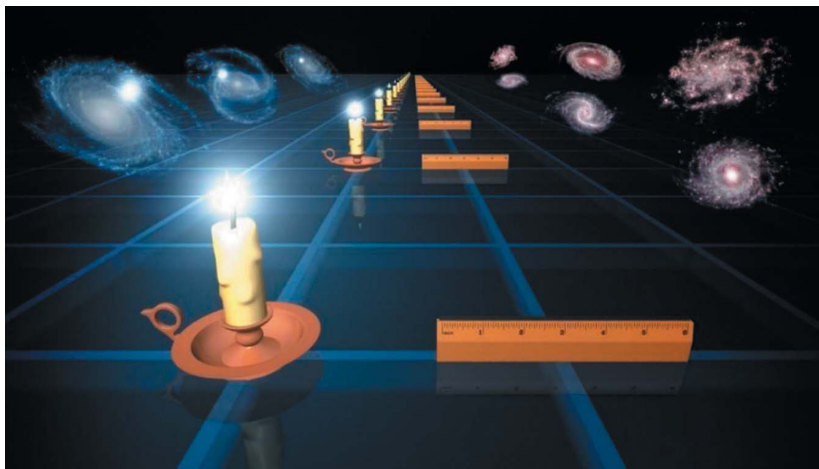


Рис. 9.5. Стандартные свечи и стандартные линейки

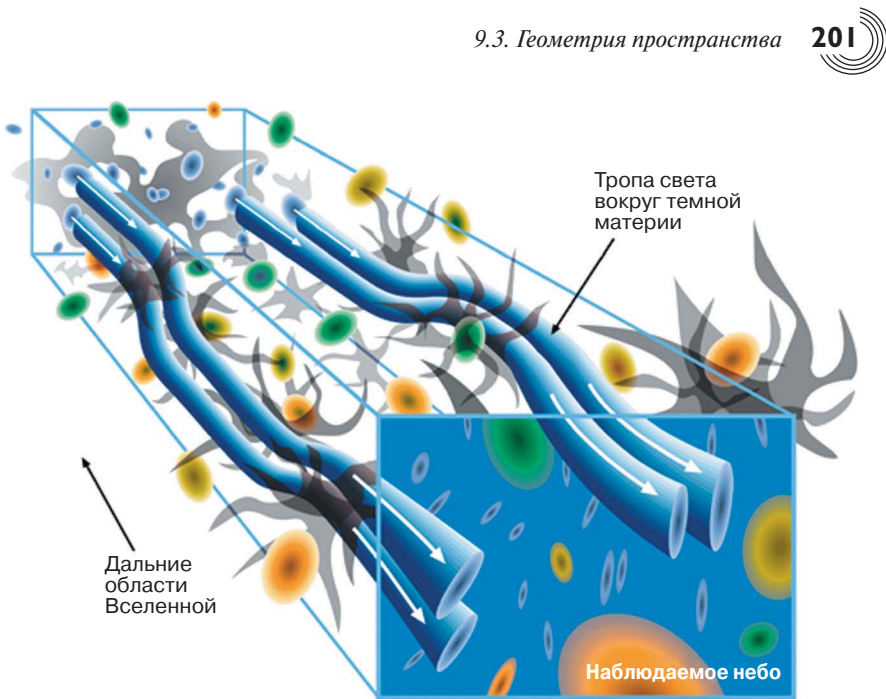


Рис. 9.6. Искажение света от далеких галактик в результате темной материи между нами и этими галактиками. С разрешения: Bell Labs-Lucent Technologies

Другой метод изучения ускорения и темной материи имеет отношение к слабому гравитационному линзированию крупномасштабных структур, его называют также *космическим смещением*¹ (рис. 9.6).

Прежде чем достичь нас, свет от удаленных объектов отклоняется, их изображения усиливаются и искажаются из-за присутствия массы между этими объектами и нами. Корреляции между искажениями эллиптичностей галактик можно использовать для реконструкции массы, проектируемой вдоль линии наблюдения.

Этот метод дополняет метод изучения анизотропии реликтового излучения. В сущности, поскольку темная энергия производит изменения в объектах наблюдения с точки зрения красного смещения, только анизотропия реликтового излучения нечувствительна к параметрам моделей темной энергии. Измерение космического смещения с точки зрения красного смещения можно использовать для проверки влияния темной энергии на рост структур, а также проверки различных объяснений и (гравитационных) моделей космического ускорения. Другими словами,

¹ Его смысл — это квадрупольное искажение сферического изображения далеких источников. — *Прим. науч. ред.*

этот метод чувствителен к эволюции темной энергии. Галактические источники на разных расстояниях подвержены эффекту линзирования только от масс на переднем плане, что и делает возможной *томографическую реконструкцию*.

Есть и другие методы определения космологических параметров и изучения темной материи, но мы не будем их обсуждать. На данный момент каждый из методов сопрягается с данными по анизотропии реликтового излучения, то есть для объяснения устройства Вселенной необходимы темная материя и темная энергия.

Модель CDM, или Стандартная космологическая модель проверена в тысячах научных статей и, за исключением проблемы космологической постоянной и мелких недостатков, верно прогнозирует наблюдения. Может возникнуть сомнение: согласованность, т.е. внутренняя полнота может и не быть признаком ее точности. Например, модель Птолемея с ее многочисленными допущениями, даже если она и не была точна, приблизительно верно предсказала планетарные орбиты.

9.4. Антропный принцип, Мультимир и величина космологической постоянной

Мы уже говорили о том, что у космологической постоянной имеются некоторые проблемы, например, огромное расхождение между наблюдаемыми величинами и теми, что предсказаны теорией. Есть также *проблема совпадения*. До момента ранее 5 миллиардов лет назад Вселенная не ускорялась, поскольку темной энергии было намного меньше, чем сегодня. С тех пор она увеличилась настолько, что ее величина стала сопоставимой с величиной темной материи, а в будущем, если темная энергия на самом деле представлена космологической постоянной, ее будет больше, чем темной материи. Проблему совпадения можно сформулировать следующим образом: почему сегодня плотность темной энергии и плотность темной материи сопоставимы? Это либо совпадение, либо на это есть серьезные причины. Несколько авторов пытались предсказать существование темной энергии и оценить величину космологической постоянной. Некоторым это удалось, наряду со Стивеном Вайнбергом, известным благодаря совместному с Абдусом Саламом и Шелдоном Ли Глэшоу открытию *электрослабой теории* и вкладу в создание Стандартной модели. За эти результаты он в 1979 году получил Нобелевскую премию. В известной статье он сумел определить диапазон величин, в котором можно найти космологическую постоянную.

Для этого он воспользовался методом, который часто критикуют, т.н. *антропным принципом*. Термин этот ввел в 1973 году Брендон Картер. Суть принципа состоит в том, что характеристики Вселенной увязаны с существованием наблюдателей. Живые существа могут существовать в конкретных физических условиях. Есть две формы принципа: *сильный* и *слабый*. Последний Картер описал таким образом:

Мы должны быть готовы к тому, чтобы принять к сведению следующий факт: наше местоположение во Вселенной *обязательно* должно быть привилегированным в такой мере, чтобы оно было сопоставимо с нашим существованием в роли наблюдателей.

По поводу сильной версии Картер высказался так:

Вселенная (а значит, и фундаментальные параметры, от которых она зависит) должна быть такой, чтобы на определенной стадии допустить создание наблюдателей. Перефразируя Декарта, *cogito ergo mundus talis est*¹.

Этот принцип приобретает определенную значимость, если его прилагают к множеству физических систем с различными характеристиками. Например, если речь идет об *экзопланетах* (внесолнечных планетах). Если бы во Вселенной была только наша планетная система, то было бы трудно объяснить, почему она обладает всеми характеристиками, необходимыми для жизни. Это бы привело нас к мысли о том, что «некто» управляет системой таким образом, чтобы она соответствовала характеристикам, необходимым для зарождения и эволюции жизни. После 1995 года мы узнали, что в одной лишь нашей Галактике есть миллиарды планетных систем, отличных друг от друга — у некоторых из них звезды больше нашего Солнца и планеты крупнее планет Солнечной системы. Существует бесчисленное множество комбинаций параметров. Среди различных статистических комбинаций есть те, что делают Землю пригодной для жизни. Существуют миллиарды планет, где жизни быть не может, и, пожалуй, совсем немного тех, где есть жизнь. Раз мы существуем, значит, мы находимся на одной из редких, пригодных для жизни планет. Для того чтобы жизнь могла быть во всей Вселенной, космологическая постоянная Λ должна иметь определенные значения. Например, будь величина темной энергии слишком велика, ускоренное расширение Вселенной началось бы слишком рано и протекало бы слишком интенсивно. Это бы не позволило действовать гравитации, не

¹ Я мыслю, значит мир таков, какой он есть.

образовались бы структуры, звезды, планеты и, следовательно, жизнь. Будь величина темной энергии отрицательной, Вселенная бы сжалась еще до образования звезд, планет и жизни. На основании этих аргументов Стивен Вайнберг определил диапазон приемлемых значений для плотности темной энергии ρ_Λ : $-10\rho_m < \rho_\Lambda < 100\rho_m$, где ρ_m есть плотность обычной и темной материи. Поскольку темная и обычная материя составляют 31% от общей массы, то мы получим: $\rho_\Lambda \approx 2,23\rho_m$, что входит в диапазон, предсказанный Вайнбергом.

Необходимо помнить: для того, чтобы использовать космологический принцип, должно быть много вселенных с разными физическими характеристиками. Как мы уже говорили, есть огромные вклады в темную энергию — как положительные, так и отрицательные — что, как правило, приводит к избыточно большой величине. Таким образом, в большинстве вселенных энергия слишком велика для появления жизни. Лишь в небольшом числе из них эти вклады компенсируются и попадают в диапазон Вайнберга, что сделает жизнь возможной. Для того чтобы стала возможной жизнь на Земле, недостаточно определенных значений космологической постоянной: необходимы конкретные значения фундаментальных постоянных и характеристик сил. Даже незначительные отклонения от них не привели бы к образованию Вселенной, в которой мы существуем. Как сказал Фриман Дайсон:

Чем больше я исследую Вселенную и изучаю подробности ее архитектуры, тем больше доказательств нахожу тому, что Вселенная в некотором смысле знала, что мы появимся.

Будь гравитация более интенсивной, Вселенная сжалась бы сразу после Большого взрыва. Будь гравитация слабее, Вселенная бы стремительно расширялась. В результате не образовались бы ни звезды, ни планеты, ни что-либо еще. Даже незначительные отклонения от постоянных сильного или слабого взаимодействия сделали бы формирование химических элементов, а значит, и атомов невозможным.

Итак, вкратце: существование жизни приводит нас к мысли о том, что либо есть некий великий «архитектор», который продумал все до малейших деталей, либо существует огромное число вселенных. Некоторые из них, по статистическим причинам, обладают характеристиками, необходимыми для жизни.

В конечном итоге, для того, чтобы работал антропный принцип, должно быть большое число вселенных, т.е. *Мультимир*, как часто обозначают эту возможность.

Как правило, слово «вселенная» обозначает все, что существует, поэтому термин «мультимир» («мультиленная») может показаться противоречивым. Мы могли бы сказать, что говоря о мультимире, подразумеваем, что во Вселенной есть отдельные области, которые не контактируют между собой. Для живущих в какой-либо вселенной не представляется возможным наблюдать другие, но возможно наблюдать только свою собственную. Простой способ понять, что такое мультимир, это рассмотреть плоскую вселенную. Она бесконечна. Однако из-за ограниченной скорости света и расширения мы можем видеть лишь определенную область, доступную для наблюдения вселенную. Есть и другие возможности существования мультимира.

Например, во *многوميровой интерпретации квантовой механики*, предложенной в 1957 году Хью Эвереттом III, Вселенная делится на две разные вселенные в каждом квантовом измерении. Это подразумевает существование огромного числа вселенных.

Есть еще одна теория, которая приводит к концепции мультимира, *вечная хаотическая инфляция*. Сейчас мы лишь упомянем ее, а подробнее познакомимся с ней в Приложении А.

В первичной вселенной энергия вакуума была намного больше, чем сейчас, и приводила к экспоненциальному расширению, вызывая стремительный рост. Энергию, которая порождала расширение, давало поле, подобное полю Хиггса, чей энергетический профиль напоминает мексиканскую шляпу (рис. 9.7).

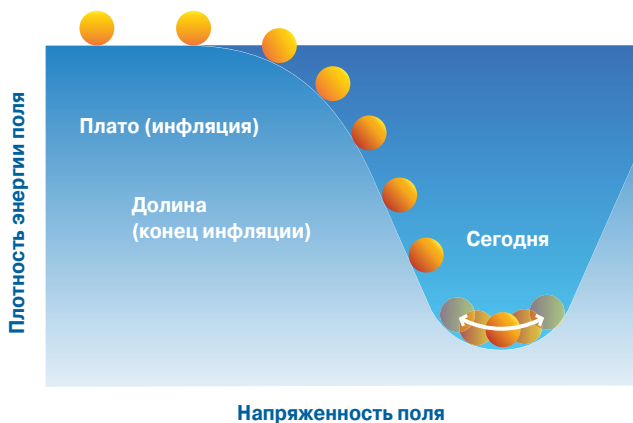


Рис. 9.7. Инфляция. Шарики представляют эволюцию инфляционного поля. Эволюция инфляционного поля начинается с плоского участка (плато), где начинается инфляция, медленно скатываясь по долине к финальным осцилляциям

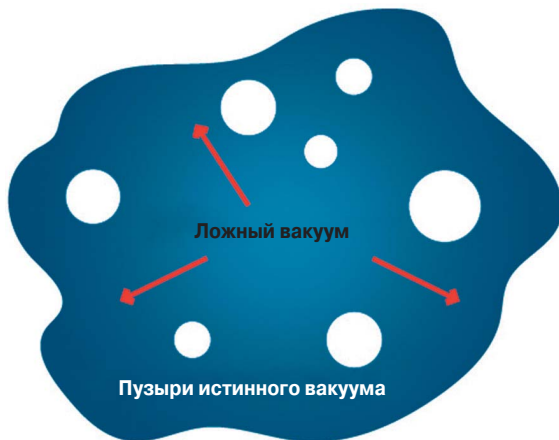


Рис. 9.8. Вечная инфляция. Голубым отмечена расширяющаяся часть Вселенной. Белые островки – это пузыри истинного вакуума и те вселенные, что не контактируют и обладают другими физическими характеристиками

Допустим, что изначально у этого поля была энергия выше минимальной. Поле, т.н. *инфлатон*, было в состоянии ложного, а не истинного вакуума. На рис. 9.8 показан потенциал поля, состоящий из плоского участка наверху и своего рода долины, которая приводит к минимуму. Обычно этот потенциал называют *потенциалом мексиканской шляпы*, как тот, что показан на рис. 9.7. Положение шариков отражает, как поле развивается во времени. Поле, как и все физические системы, имеет тенденцию к возвращению в свое естественное, минимальное состояние.

Когда шарик начинает двигаться, потенциальная энергия поля превращается в кинетическую энергию, и вселенная претерпевает стремительное расширение. Области, которые изначально были близкими и контактировали, быстро отодвигаются, теряя связь. Когда поле (шарик) опускается к основанию мексиканской шляпы, высвобождается энергия, которая была у поля наверху, и создаются частицы материи и излучение. Конечная плотность материи, которая производит инфляцию, точно равна ρ_c , т.е. $\Omega \approx 1$, равную наблюдаемой. Во время снижения поля в переходе от ложного вакуума к истинному, в ложном вакууме (помечено голубым) образуется «пузырь» истинного вакуума (белая зона) (рис. 9.8). Однако во время спуска шарик может случайно оказаться в общей точке минимума мексиканской шляпы. Следовательно, в каждой области значение энергии вакуума будет разным. Образуется много пузырей

истинного вакуума, а не только один (рис. 9.8), инфляция закончится в разных точках в разное время и, возможно, в некоторых областях повторится, создавая множество вселенных, мультимир. Такой тип инфляции называется *вечной инфляцией*.

Как уже было сказано, каждый пузырь – это условная вселенная, а набор пузырей – мультимир. Образовавшиеся пузыри стремительно расширяются, со скоростью света. Несмотря на это, они никогда не заполняют все пространство, поскольку оно расширяется значительно быстрее. По версии Андрея Линде, хаотическая инфляция создает бесконечное число вселенных с разными физическими законами. Этот тип мультимира наряду с антропным принципом можно использовать для решения проблемы космологической постоянной и существования жизни. В сущности, если есть бесконечное число вселенных с разными законами и постоянными, одна из них будет обладать такими же характеристиками, как и наша.

Многие ученые, несмотря на то, что антропный принцип интересен и полезен, предпочитают им не пользоваться. Даже Стивен Вайнберг его критикует, хотя, как мы уже говорили, сумел с его помощью предсказать количественно космологическую постоянную. Антропный принцип не объясняет, почему Вселенная такая, какая она есть, почему мы существуем, напротив: он утверждает, что на основании того, что мы существуем, Вселенная должна быть такой, какая она есть. Ненаучная точка зрения. Принимая ее, мы отказываемся углублять исследование и поиск – если такая возможность существует – чтобы понять природу вещей.

Есть и другие формы мультимира. В своей книге «Скрытая реальность: Параллельные вселенные и глубинные законы космоса» Брайан Грин называет девять разных типов мультимира. Существует *ландшафтный мультимир*, основанный на пространствах Калаби – Яу, о которых мы говорили в главе 7; *квантовый мультимир*, связанный с интерпретацией квантовой механики Хью Эверетта III (мы упоминали его чуть выше); *мультимир бран*, основанный, как мы уже обсуждали, на М-теории, где каждая брана представляет собой вселенную; *смоделированный мультимир*, существующий в супермощных компьютерах, которые могут моделировать целые вселенные – вспомните фильм «Матрица»; *голографический мультимир*, основанный на *голографическом принципе*, согласно которому наша трехмерная Вселенная – это разновидность проекции двумерной реальности, типа голограммы. Расширив эту идею до мультимира, получаем *голографический мультимир*. Динамика инфляционного мультимира заключается в его поверхности. Список этот можно продолжить.

Классификацию мультивмиров приводит Макс Тегмарк. Согласно вечной инфляции есть четыре разных типа мультивмира:

- I тип: к нему относятся похожие друг на друга вселенные, которые нельзя обнаружить.
- II тип: похож на тип I, но с разными постоянными физических законов и пространственных размеров.
- III тип: с такими же характеристиками, как и у типа II, имеющими отношение к многомировой интерпретации квантовой механики.
- IV тип: мультивмиры с разными формами законов физики. Каждая математическая структура имеет соответствие в физическом мире.

На тему мультивмиров или, как еще иногда говорят, *параллельных вселенных*, написано огромное количество научных статей, но доказать их существование весьма маловероятно.

9.5. Квинтэссенция, новый эфир

Космологическая постоянная, отличная от нуля, подтверждает ускоренное расширение Вселенной, однако есть несколько проблем. Если это связано с энергией вакуума, мы знаем, что есть огромное расхождение между наблюдаемыми и вычисленными значениями. Мы не знаем, является ли тот факт, что плотность темной энергии и плотность темной материи сегодня сопоставимы, совпадением или же признаком чего-то фундаментального. Учитывая эти и другие проблемы, были предложены альтернативы космологической постоянной. Особенно интересной представляется *квинтэссенция*, или *пятый элемент*, из которого с точки зрения миропонимания Аристотеля состоят сферы и небесные тела, от лунного неба до неподвижных звезд. История эфира началась еще с древних греков: Платона, считавшего, что Бог создал мир из эфира, и Аристотеля, давшего ему название «эфир». В отличие от четырех стихий подлунного мира (земля, вода, воздух, огонь) эфир был сущностью небесного мира, а именно пятым элементом. В Средние века термин «эфир» заменили «квинтэссенцией», которая была составляющей *философского камня*, обладавшего, согласно средневековым верованиям, феноменальными свойствами, среди которых, как мы помним, была и способность даровать бессмертие. Про «светоносный» эфир вспомнили и в XIX веке, когда сторонники волновой теории света с его помощью пытались объяснить его распространение в безвоздушном пространстве. Однако в 1887 году благодаря опыту Альберта Михельсона и Эдварда Морли было доказано, что эфира не существует, что открыло дорогу Эйнштейну с его специальной теорией относительности. Сегодня

эфир — это *поле скалярного типа*, это понятие ввели в 1988 году Бхарат Ратра и Джеймс Пиблс, и развили Роберт Колдуэлл и его коллеги. Современное название объясняется тем, что Вселенная состоит из темной материи, барионов, фотонов и нейтрино, и, следовательно, темная энергия и составляет пятый элемент. Профиль потенциальной энергии эфира подобен профилю поля Хиггса и поля инфлатона. В отличие от космологической постоянной, которая со временем не меняется, квинтэссенция меняется во времени и, вероятно, еще и в пространстве. Квинтэссенцию обычно представляют как идеальную жидкость с отрицательным давлением, P , и плотностью, ρ , которые следуют закону $P = w\rho$, называемому *уравнением состояния*, а w — *параметр уравнения состояния*. Как правило, он отрицателен, поскольку формирует отрицательное давление. Если $w = -1$, то мы имеем дело с космологической постоянной¹. Есть модели, где $w < -1$, *кинетическая квинтэссенция* (*k-эссенция*), с нетипичной формой кинетической энергии, и *модель фантомной энергии*, в которой кинетическая энергия отрицательная, а расширение быстрее, чем то, что связано с космологической постоянной. Вселенная, где преобладает фантомная энергия, приведет к *Большому разрыву* (об этом поговорим позже), к концу Вселенной, подобному смерти, уготованной своим жертвам Джеком-Потрошителем². Как уже говорилось, механизм, производящий расширение в случае темной энергии, и механизм инфляции имеют много общего. Были попытки, но не слишком успешные, связать квинтэссенцию с инфлатоном. Однако в обоих случаях эволюция поля одна и та же: начинается с максимального потенциала, затем фаза скатывания к минимуму потенциала энергии, истинный вакуум, с последующим ускорением и производством излучения и материи. У инфляционного поля и квинтэссенции есть и другие общие свойства. Например, они не связываются с частицами обычной материи — такого никогда не наблюдалось. Форма потенциала фундаментальна, поскольку он должен воспроизводить космологические наблюдения. Несколько ученых предложили квинтэссенцию в качестве *пятой силы*. Эта сила изменила бы эволюцию космоса. До настоящего момента мы знаем четыре силы (взаимодействия), и для объяснения того, что происходит вокруг нас или в Солнечной системе, пятая сила нам не нужна. Следовательно,

¹ Более точно: Если $w = -1$, то мы имеем дело с темной энергией, которая в современный момент времени проявляет себя аналогично космологической постоянной. — *Прим. науч. ред.*

² Игра слов: Большой разрыв (Big Rip) и Джек-Потрошитель (Jack the Ripper). — *Прим. науч. ред.*

должен быть механизм-«хамелеон», который показывает последствия этой силы только в определенных условиях и скрывает в других. Например, он должен скрывать их в лабораториях и в Солнечной системе, где наблюдения прекрасно описываются уравнениями Ньютона. Это гипотетическое явление называют *скринингом*, и он бывает нескольких типов (*скрининг-хамелеон*, *скрининг Вайнштейна* и так далее). Однако все эти теории не имеют экспериментального подтверждения, и старая «избитая» космологическая постоянная продолжает оставаться наиболее вероятной причиной расширения Вселенной ускоренным образом.

9.6. Существуют ли на самом деле темная материя и темная энергия?

В одной русской сказке¹ в один ненастный день красавица встречает чудовище. В конце рассказчик задается вопросом: «А может быть, все было наоборот?» Может, героиня не была красавицей, а погода, напротив, была прекрасной, и так далее. Другими словами, вещи могут быть отличными от того, как мы их себе представляем. То же самое можно сказать и про темную материю и темную энергию. Учитывая, что десятилетия исследования темной материи дали отрицательные результаты, возникает вопрос: может, есть какие-либо другие возможности, кроме темной материи? Нет ли других возможностей для ускоренного расширения, помимо темной энергии? Многие ученые посвятили жизнь поискам ответа на эти вопросы. В случае с темной материей мы понимаем, что классические доказательства ее существования, такие как кривые вращения галактик, несоответствие массы в скоплениях, эффект линзирования, все основаны на представлении, что известная физика, в частности механика Ньютона и теория относительности Эйнштейна, верна.

На самом деле, последнюю проверили на некоторых масштабах, например, в Солнечной системе, но ведь не на всех. За последние десятилетия были предложены различные теории *модифицированной гравитации* с целью объяснения Вселенной без темной материи и темной энергии. Хотя модифицированные теории гравитации в физике не новость, открытие ускорения Вселенной вновь вызвало к ним интерес. Основная идея заключается в следующем: хотя эксперименты местами

¹ Речь идет о стихотворении Генриха Сапгира «Людоед и принцесса, или Все наоборот». — *Прим. науч. ред.*

согласуются с общей теорией относительности, как во времени, так и в пространстве, в первичной Вселенной или в больших масштабах гравитация может быть другой. Одним из первых, кто еще в 1963 году предложил отказаться от темной материи в пользу изменения гравитации, был Арриго Финци. Его работу забыли, но двадцать лет спустя подобную мысль высказал Мордехай Милгром, опубликовав известную теорию модифицированной ньютоновой динамики (МОНД), согласно которой при малых ускорениях законы Ньютона меняются на порядок 10^{-8} см/с². Таким образом можно объяснить кривые вращения галактик без темной материи. МОНД также объясняет некоторые другие явления, но когда дело доходит до масштабов уровня скоплений галактик или выше, начинаются проблемы. Чтобы теория МОНД работала и дальше, необходимо снова ввести некоторую темную материю в форме стерильных нейтрино. Ситуация подобна той, когда собака кусает себя за хвост. После открытия ускоренного расширения Вселенной, помимо космологической постоянной и квинтэссенции, был предложен целый ряд теорий модифицированной гравитации. Это лишний раз указывает на то, что особенно в случае с темной энергией, у нас много неясных идей. Помимо теорий модифицированной гравитации, есть и другая возможность: в больших масштабах Вселенная не является ни однородной, ни изотропной, а Земля находится в огромной пустой области, и скорость расширения меняется в зависимости от местоположения, что можно интерпретировать как изменение во времени. Продолжим использовать аналогию с резиновым шаром и космическим расширением: если резина, из которой шар сделан, в разных точках разная, для изменения эластичности шара, то равномерно он не надуется. В результате, у нас будет разная скорость расширения, в зависимости от того, где именно мы находимся на шаре.

Говоря о количественных оценках, несмотря на то, что Вселенную считают однородной и изотропной, на самом деле, в масштабах менее 100 Мпс это не соответствует действительности. Следовательно, эта неоднородность может повлиять на то, как распространяется свет. Исследования конкретной модели Вселенной (модель Леметра — Толмана — Бонди) показали, что неоднородность копирует ускорение, т.е. неоднородность истолковывается нами как ускоренное расширение. Это воздействие маломасштабных структур на поведение Вселенной в большем масштабе называется *обратной реакцией*. Недавно Жак Колин и его коллеги высказали и другие сомнения относительно ускоренного расширения Вселенной: они доказали, что ускорение не одинаково во всех направлениях, а ускорение, выводимое из сверхновых, не соответствует

действительности, а объясняется тем, что мы некеперниканские наблюдатели. Некоторые ученые не согласились с подобной точкой зрения.

Большинство ученых согласны с тем, что для объяснения нашей Вселенной нам необходимы темная материя и темная энергия. Пока прямого доказательства существования темной материи нет, и мы не достигли более глубокого понимания темной энергии, мы должны оставаться открытыми для всех возможностей. На ближайшее будущее наша единственная надежда — это *обсерватория Евклид*, которая может пролить свет на темную сторону Вселенной.

ГЛАВА 10

КОНЕЦ ВСЕЛЕННОЙ

*Вот как кончится мир —
Не взрыв, но всхлип.*

Томас Стернз Элиот

10.1. Древняя диковина

Пожалуй, вопросы о происхождении и конце Вселенной возникли одновременно с возникновением цивилизации. Разумеется, ответы на эти вопросы с развитием человечества претерпевают изменения. Вопросы эти неразрывно связаны с рождением и смертью человека. Тысячелетиями ответы на них искали в мистицизме и религии. С развитием общества вопросы все больше и больше приобретают философский и рациональный смысл. Существует большое число эсхатологий, доктрин, направленных на исследование судьбы человека, человечества и Вселенной. Приведем в качестве примера мифологию викингов и других скандинавских народов, которая завершалась *Фимбульветром*, трехлетней суровой зимой, после которой наступали *сумерки богов* — последний поединок между силами порядка и хаоса. Это приводило к концу мира, который потом возрождался и заполнялся людьми. В индуистской космологии создателем мира является Брахма, а день Брахмы, или калпа, длится 4,32 миллиарда лет — мера космических циклов эволюции и инволюции Вселенной. В конце каждого дня Брахмы наступает ночь Брахмы, во время которой мир разрушают огонь, вода и ветер. После ста лет Брахмы он умирает, а Вселенная полностью разрушается и не существует следующие 100 лет Брахмы. Потом Брахма возрождается, а вместе с ним и весь мир в непрерывном цикле. Эта эсхатология, так же, как и у викингов, похожа на современные теории Вселенной.

Конец времени может также быть и концом цивилизации, как в эсхатологии *индейцев хопи*, согласно которой конец времени совпадает с появлением бледнолицых. В конце времени Землю покроет обширная сеть (вероятно, телеграф), железные змеи (железные дороги с поездами) и каменные реки (шоссе) опояшут всю Землю. В предсказаниях индей-

цев говорится и о «большом потопе» и большом сжатии, после которого взойдет голубая звезда, а Земля превратится в пустыню из песка, камней и льда.

В отличие от красочных эсхатологий народов, населявших Землю, современная космология дает нам возможность ответить на вопрос о конце Вселенной научным образом, хотя и не совсем определенным и однозначным. На самом деле, есть несколько вариантов, и все они главным образом зависят от геометрии Вселенной и ее эволюции в будущем, зависящих от пропорций темной материи и темной энергии, природа которых еще неизвестна.

В целом, теории относительно Вселенной и ее конца сводятся к следующим:

- Вселенная бесконечна во времени, как в теории стационарной¹ Вселенной, которую опровергают многочисленные экспериментальные данные;



Рис. 10.1. Смерть Солнца и Луны и падение звезд. С разрешения: Cristoforo de Predis, 15th century

¹ Стационарная теория Вселенной (т.н. «steady-state»-теория) была предложена Бонди, Голдом, Хойлом и др. Согласно этой теории Вселенная всегда существовала и будет существовать всегда. — *Прим. науч. ред.*

- у Вселенной есть начало и конец;
- Вселенная циклична: она рождается, развивается и умирает, а потом снова возрождается;
- существует Мультимир: Вселенная – это часть пространства, в которое входят другие вселенные.

А теперь рассмотрим эти возможности подробнее.

10.2. Тепловая смерть

Конец Вселенной зависит от геометрии пространства, а значит, и от содержания темной материи и темной энергии. Знание природы темной энергии могло бы дать конкретный ответ по поводу будущего Вселенной. На сегодняшний день мы знаем, что темная энергия ускоряет Вселенную, и, если все будет продолжаться таким же образом, в будущем наступит *тепловая смерть*. Однако если поведение темной энергии изменится, например, она станет притягивать, будущее Вселенной будет совершенно иным (см. раздел 10.4 о Большом сжатии).

В случае тепловой смерти Вселенная расширится, из галактик уйдут звезды, черные дыры испарятся, а протоны, если некоторые теории верны, распадутся. Вселенная превратится в огромное, почти пустое и холодное пространство, населенное фотонами и с равномерно распределенной энергией. На сегодняшний день это наиболее приемлемое представление о конце Вселенной, даже если и есть противоположные точки зрения относительно этой модели, применимости энтропии и термодинамики ко всей Вселенной, а также по поводу предсказаний, основанных на плохом знании энтропии, гравитационных полей и роли квантовых явлений.

Первые представления о тепловой смерти Вселенной связывают с Уильямом Томсоном, который высказал предположения о ней в 1851 году. Такой конец Вселенной связан со вторым началом термодинамики, поскольку в изолированной системе необратимо растет энтропия, а именно беспорядок. Если Вселенная проживет достаточно долго, она достигнет состояния с равномерно распределенной энергией, в результате чего существование процессов, связанных с энергией, станет невозможным, в том числе и жизнь. Можно построить временную шкалу конца Вселенной. Примерно через три миллиарда лет Большое Магелланово Облако (одна из наших малых галактик-спутников) столкнется с нашей Галактикой, а через миллиард лет будет столкновение с Андромедой. Если допустить, что Солнечная система переживет эти

события, примерно через пять миллиардов лет Солнце выработает весь водород и превратится в *красного гиганта*, расширившись в сто раз. В результате испарятся океаны, расплавятся камни и так далее. Однако жизнь, за исключением бактерий, уже исчезнет. Через 600 миллионов лет уровень углекислого газа упадет ниже уровня, необходимого для производства фотосинтеза. Погибнут все растения, за исключением тех, что потребляют для фотосинтеза оксид углерода (IV). Однако даже эти растения долго не выдержат, а вместе с ними погибнут животные. Примерно через миллиард лет яркость солнца вырастет на 10%, и Земля будет значительно больше подвержена *парниковому эффекту*, чем это имеет место сегодня. Медленно испарятся океаны. Примерно через 5×10^{10} лет закончится образование звезд, а спустя 10^{12} – 10^{14} лет звезды погаснут. В результате прекращения формирования звезд изменится только цвет галактик. Через несколько десятков миллионов лет с момента формирования последних звезд звезды с массой больше восьми масс Солнца взорвутся, образуя сверхновые. Исчезновение этих звезд, которые преимущественно имеют голубой цвет, приведет к тому, что галактика приобретет цвет, близкий к желтому. Больше не будут образовываться тяжелые элементы. Поскольку яркость звезды возрастает по мере ее существования, в течение нескольких миллионов лет после прекращения образования звезд их яркость будет постоянной. Потом все звезды превратятся в *окаменелости*, как белые карлики, нейтронные звезды и черные дыры, а галактика будет состоять из этих объектов, коричневых карликов и планет. Температура объектов упадет по мере их вращения по своим орбитам. Вращение по орбите не будет вечным: два объекта, которые вращаются вокруг друг друга, порождают *гравитационные волны*. По подсчетам, из-за гравитационного излучения большинство звездных орбит в галактике разрушится, и их поглотит центральная черная дыра. В это время останутся лишь звездные окаменелости: белые карлики, нейтронные звезды, черные дыры. Со временем эти объекты также поглотит центральная черная дыра, кроме некоторых счастливых, которые от взаимодействия с другими обретут достаточно энергии, чтобы избежать центральных областей галактики. Звезды отделятся от галактик через 10^{19} лет, а через 10^{20} лет гравитационные волны приведут к разрушению орбит. В случае системы Земля – Солнце это случится через 10^{23} лет. Галактики буквально испарятся. Даже обычная материя не вечна. Лептоны (например, электроны) – это устойчивые частицы, нейтроны разрушатся через 15 минут, а как поведут себя протоны, неизвестно. Будущее Вселенной зависит от устойчивости протонов. Будь они неустойчивыми, материал Вселенной превратился бы в железо, а

потом в нейтроны. Даже протоны, присоединяющие электроны, образовали бы нейтроны. Через невообразимо длительный период времени всю материю поглотили бы черные дыры, которые испаряются благодаря излучению Хокинга. Однако некоторые теории Великого объединения (GUT/ТВО), например модель Джорджи – Глэшоу, прогнозируют распад протона. Одна из вероятностей распада протона – на позитрон, нейтральный пион и два фотона. Для изучения этой проблемы провели эксперимент с использованием нейтринного детектора «Супер-Камиоканде», который содержит 50 000 тонн ультрачистой воды из 10^{34} протонов и более 11 000 фотоумножителей, которые обнаруживают голубой свет эффекта Черенкова. Согласно результатам этого эксперимента период полураспада¹ протона должен быть больше 10^{33} лет. Результаты «Супер-Камиоканде» не говорят о том, что протон не разрушится, но дают нижний предел его периоду полураспада. Может быть, протоны разрушатся через 10^{34} лет, а может, они не разрушатся. Продукты распада, такие как позитроны, аннигилируют вместе с электронами. Даже черные дыры не будут жить вечно, а будут медленно терять массу из-за излучения Хокинга и исчезнут в виде своего рода вспышечного излучения.

Звездная черная дыра массой в 10 солнечных масс испаряется за 10^{70} лет, а сверхмассивные черные дыры, в центре галактик, с массой в 1 миллион солнечных масс, – за 10^{85} лет; черная дыра с массой 10^{11} солнечных масс испарится за 10^{100} лет. Итак, вся энергия и масса Вселенной будет поглощена черными дырами, которые в конечном итоге испарятся, образуя фотоны.

Последний вывод справедлив, если излучение Хокинга, которое ни разу не наблюдали, на самом деле существует. Как и большинство физиков, мы допускаем, что оно действительно существует в нашем мире. Черные дыры поглотят массу и энергию Вселенной и, когда они испарятся, останутся только фотоны и, может быть, электроны, которые не распались при встрече с позитронами, образованными при распаде протона.

В классическом сценарии Большого мороза (Big Freeze) Вселенная превратится в холодное и пустое пространство, где бродят фотоны и, может быть, электроны.

К этой базовой схеме добавили другие сценарии, которые могут произойти после Большого мороза или до него, что изменит судьбу Вселенной. Одно из событий, связанное с Большим морозом, это *конец*

¹ Период полураспада – это время, необходимое для данного количества протонов или любого другого радиоактивного элемента для сокращения вдвое.

времени. Чтобы понять, что это значит, нам необходимо более точное представление о том, что есть время, но, если откровенно, то у нас такого представления нет. Это чрезвычайно сложное понятие не одно тысячелетие было предметом философских и научных исследований. Широко известно высказывание Блаженного Августина: «Что же такое время? Если меня никто не спрашивает, я знаю, что такое время; если бы я захотел объяснить это тому, кто спрашивает, — нет, не знаю». Даже современная наука не обладает единым представлением о том, что такое время. Есть разные точки зрения: начиная от представления о времени как о сущности, которая толкает системы к развитию по направлению к состояниям максимальной энтропии, т.е. максимального беспорядка, до представлений Брайса Де Витта, Карло Ровелли и других, для кого время не обязательно должно быть частью фундаментальной теории. Это утверждение основано на том, что время не входит в уравнения *теории петлевой квантовой гравитации*, которая пытается объединить общую теорию относительности и теорию квантового поля. На более тривиальном уровне, если вспомнить историю про Галилео, который измеряет время колебаний маятника с помощью пульса на запястье (глава 6), мы понимаем, что в реальности никогда не измеряем время непосредственно. Мы измеряем время между колебаниями, сравнивая его с биением сердца, но чтобы определить, регулярный ли пульс, мы сравниваем его с часами, другим маятником. Ситуация похожа на ту, где собака кусает свой хвост.

Пытаясь дать рабочее определение времени, можно рассматривать его как величину, измеряемую соответствующими приборами, такими как наручные часы, задуманными не только как механические инструменты, но и как общие циклические системы, например Земля — Солнце. Другими словами, инструменты для измерения времени, например часы, основаны на сравнении движения в пространстве, например вращения Земли, и движениями образца (механического, гидравлического, электронного) с достаточной точностью и воспроизводимостью.

Время можно идентифицировать с движением. Такой точки зрения придерживался и Аристотель, который высказал предположение, что время — это движение, поскольку его можно измерять по движению Солнца на небе или песка в песочных часах.

Если же инструменты Вселенной, пригодные для измерения времени, исчезнут, то исчезнет и само время, вместе с размерами и расстояниями, как считает Алексей Филиппенко и космолог Кембриджского университета Гари Гиббонс. В конечном итоге, у времени есть начало, как и у Большого взрыва, а значит, есть и конец, когда все, из чего

состоит Вселенная, придет в замерзшее состояние и замрет, как на стоп-кадре.

У физиков очень богатое воображение, а значит, есть и другие возможности для того, чтобы избежать *тепловой смерти*, или идеи, которые позволят Вселенной пойти дальше тепловой смерти. Если бы вакуум, из которого состоит Вселенная, был ложным, то по прошествии невероятно долгих (10^{2500}) лет ложный вакуум мог бы распасться в истинный, и Вселенная еще раз пережила бы Большой взрыв. Этот сценарий такой же, как и сценарий вселенных, где преобладает ложный вакуум, что может привести к внезапному исчезновению Вселенной в результате *Большого хлюпа (Big Slurp)*, с которым мы познакомимся в следующем разделе. Суммируя, скажем, что для классической тепловой смерти необходимо, чтобы мы оказались в холодной Вселенной, содержащей одни лишь фотоны, но некоторые представления допускают, что из нее может возникнуть новая вселенная, даже циклическая, или Мультимиры.

10.3. Большой хлюп

Мы знаем, что квантовый вакуум — это состояние минимальной энергии системы. Однако система может попасть в состояние, где энергия выше минимальной, т.е. она может оказаться в ложном вакууме. Следовательно, система неустойчива. Если потенциал поля Хиггса такой, как на рис. 10.2 (левая панель), поле разовьется до минимального состояния и остановится. Если же ситуация такая, как на рис. 10.2 (правая панель), желтая линия показывает, что есть второй минимум с более низкой энергией. Тогда поле может развиваться каким-либо образом (например, через *квантовое туннелирование*¹) и достичь этого минимума. Переход от вакуума с более высокой энергией к вакууму с более низкой энергией называется *распадом вакуума*. Если такое происходит в любой точке Вселенной, пузырь нового (истинного) вакуума расширяется со скоростью света, меняя характеристики нашей Вселенной или все разрушая. Случится такое вряд ли: для этого необходимо огромное количество энергии. Более того, времени на это уйдет чрезвычайно много. Согласно исследованию 2018 года, проведенному О. Андреассеном и его коллегами, на это потребуется более 10^{58} лет.

Такой способ завершения новой вселенной называют *Большим хлюпом*.

¹ Туннельный эффект — это явление квантовой механики, которое позволяет микроскопическому предмету квантового мира находиться в состоянии, которое классическая механика не допускает. Например, в классическом мире пуля, если у нее нет достаточной энергии, не сможет пробить стену, а частица в квантовом мире сможет.

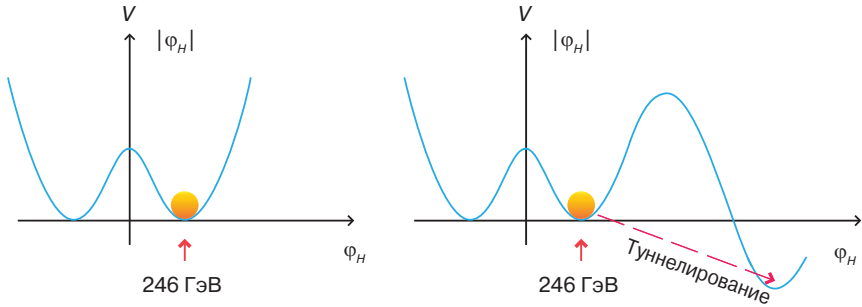


Рис. 10.2. Слева: поле Хиггса в минимальном потенциале. Справа: если существует другой минимум в потенциале поля Хиггса, поле Хиггса может перейти в состояние более низкой энергии

После определения массы Хиггса стало очевидно, что наша Вселенная пребывает в *метаустойчивом состоянии* (рис. 10.3), т.е. где-то между устойчивым и неустойчивым.

Значит, сценарий Большого хлюпа — один из возможных сценариев конца нашей Вселенной.

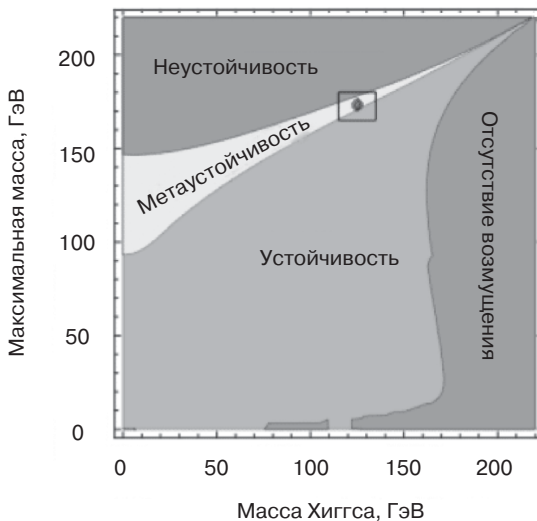


Рис. 10.3. Схема устойчивости Вселенной на основе массы t -кварка (вертикальная ось) и бозона Хиггса (горизонтальная ось). Значения массы двух частиц говорят о том, что Вселенная находится в метаустойчивом состоянии, т.е. в состоянии шаткого равновесия. С разрешения: Degrassi *et al.*, *J. High Energ. Phys.* 98 (2012). [https://doi.org/10.1007/JHEP08\(2012\)098](https://doi.org/10.1007/JHEP08(2012)098)

Что случится после Большого хлюпа — вопрос чисто умозрительный. Одна из возможностей (если расширить результаты исследования Шона Кэрролла 2004 года) такова: если поле, которое сгенерировало инфляцию, существует в вакууме, то оно может себя воспроизвести.

10.4. Большой разрыв или Большое сжатие?

Еще один сценарий с концовкой, подобной концовке Большого мороза, это Большой разрыв. Конец Вселенной главным образом зависит от неизвестной нам природы темной энергии. Если это не космологическая постоянная, но поле с динамичной природой, т.е. она меняется со временем, как в моделях с квинтэссенциями, возможны несколько вариантов.

В 1993 году Роберт Р. Колдуэлл, Марк Камиионковски и Нэвин Н. Вайнберг высказали предположение о том, что конец Вселенной, где преобладает темная энергия, — это Большое сжатие. Это произойдет в случае конкретной формы темной энергии, т.н. *фантомной энергии*, которую характеризует *параметр состояния*, w , т.е. отношение между давлением и плотностью, меньше -1 ($w = P/\rho < -1$). В этом случае произойдет намного более ускоренное расширение, чем в случае с космологической постоянной, как показано на рис. 10.4.

Расширение пространства будет столь стремительным, благодаря отталкиванию, которое производит темная энергия, что ни одна сила в мире, ни даже сильное взаимодействие не смогут ему противостоять. В результате все структуры, составляющие Вселенную, начиная с галактик, звезд, планет до молекул, атомов, адронов и так далее, разобьются на элементарные частицы: фотоны, лептоны и протоны (если последние не были подвержены распаду). Согласно некоторым теоретикам, это событие произойдет через 20 миллиардов лет.

Заключительный результат Большого разрыва будет похож на результат Большого мороза, но случится он намного быстрее, т.е. структуры разрушатся за более короткие периоды времени, чем в случае тепловой смерти. Последующие события будут похожи на то, что описано для Большого мороза с концом времени и пространства. Однако современные исследования темной энергии приводят нас к мысли, что, вероятно, она не обладает свойствами фантомной энергии. По этим причинам вероятнее, что во Вселенной будет доминировать темная космологическая или квинтэссенциальная постоянная энергия. А если так, то Вселенная закончится Большим морозом. Конец Вселенной будет напоминать нечто подобное тому, о чем пишет в стихо-

творении «Полые люди» Т.С. Элиот: «Вот как кончится мир / Не взрыв, но всхлип»¹.

Случай с $w = -1$ соответствует случаю, в котором темная энергия ведет себя как космологическая постоянная. И снова расширение будет бесконечным. Возможность, противоположная Большому разрыву, это расширение Вселенной до максимума, а потом повторное сжатие — Большое сжатие. Это может случиться, например, если пространственная геометрия замкнута: $\Omega > 1$. Однако необходимо учитывать существование темной энергии.

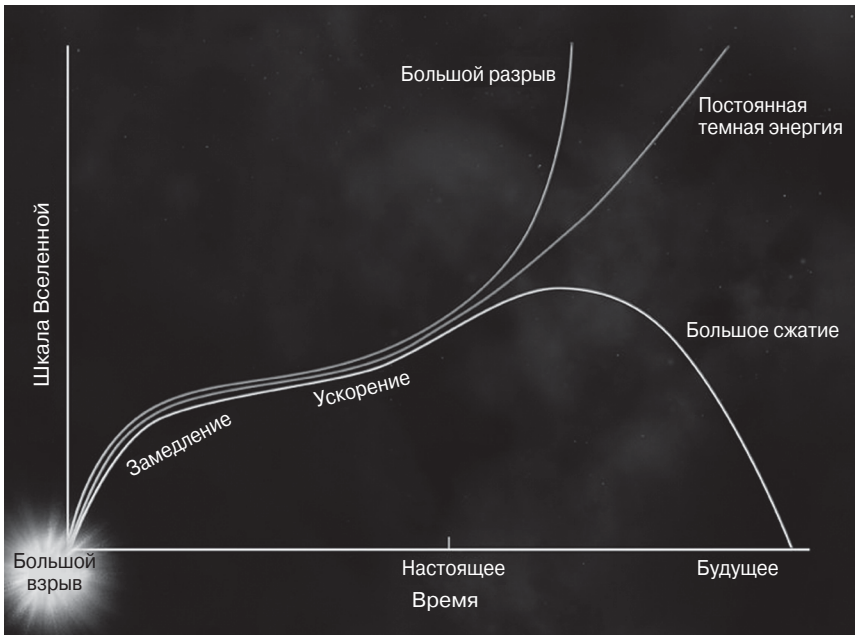


Рис. 10.4. Возможные судьбы Вселенной. Если темная энергия постоянна, то продолжится ускоренное расширение, как и сегодня, либо из-за роста темной энергии расширение будет еще более ускоренным, что приведет к Большому разрыву. Последняя возможность — это сжатие и повторное коллапсирование (Большое сжатие). С разрешения: NASA/CXC/M. Weiss

¹ Модель, связанная с Большим разрывом, это модель Лориса Баума и Пола Х. Фрэмптона. Согласно ей, в момент перед Большим разрывом (10^{-27} с), пространство разделится на большое число подпространств, независимых объемов, связанных с наблюдаемыми вселенными. Такие мини-вселенные, которые не содержат ни материи, ни энергии, ни энтропии, будут сжиматься, и каждая породит Большой взрыв и новую вселенную. Таким образом, будет создано множество вселенных, или Мультимир, как в сценарии хаотической инфляции и теории струн.

В случае если природа темной энергии полностью изменится и станет притягивающей ($w > 0$), Вселенная будет подвержена Большому сжатию, как показано на рис. 10.4. Одна из возможностей состоит в том, что за Большим сжатием последует Большой взрыв, создающий циклическую вселенную, у которой в стандартной космологии есть проблемы, как мы узнаем в следующем разделе.

10.5. Большой отскок

Решив уравнения общей теории относительности, Александр Фридман в 1922 году нашел три решения, одно из которых описывает Вселенную как циклическую, т.е. состоящую из последовательности Больших взрывов и Больших сжатий, подобно мячу, который поднимается вверх от земли на максимальную высоту, а потом падает на землю и отскакивает (Большой отскок).

Такую же, по сути, модель предложил Ричард Толман. Каждый отскок создавал бы сингулярность, которую общая теория относительности описать не может. Одна из проблем модели состоит в том, чтобы объяснить, что происходит с энтропией, т.е. степень беспорядка на различных стадиях.

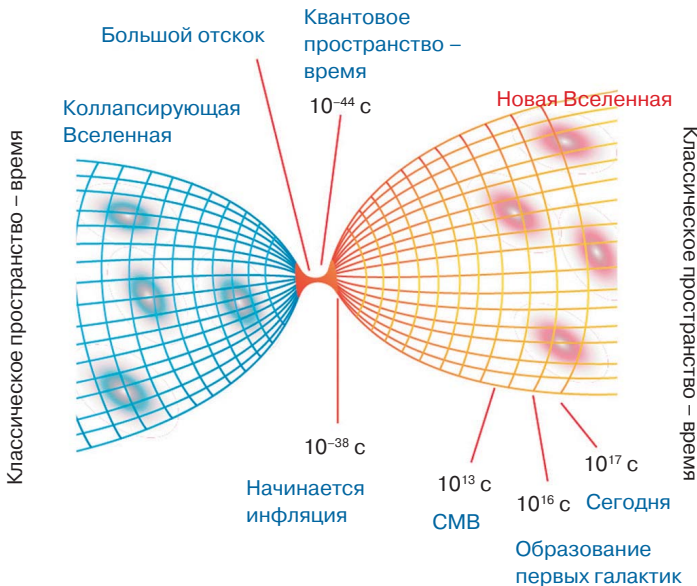


Рис. 10.5. Большой отскок. Сужающаяся Вселенная слева достигает минимума, за которым следует новое расширение

Первоначальная энтропия Вселенной, при первом Большом взрыве, была низкой и росла по мере увеличения ее размера. В стадии повторного сжатия энтропия не меняет курс, а продолжает расти, как и указывал в своей статье Толман в 1931 году. После каждого цикла будет увеличение энтропии с последующим увеличением максимального размера и времени между последовательными циклами (рис. 10.6).

С открытием расширения Вселенной от модели Толмана отказались. Добавив космологическую постоянную, которая описывает ускоренное расширение в соответствии с уравнениями общей теории относительности, цикличность отменяется, как видно на рис. 10.7.

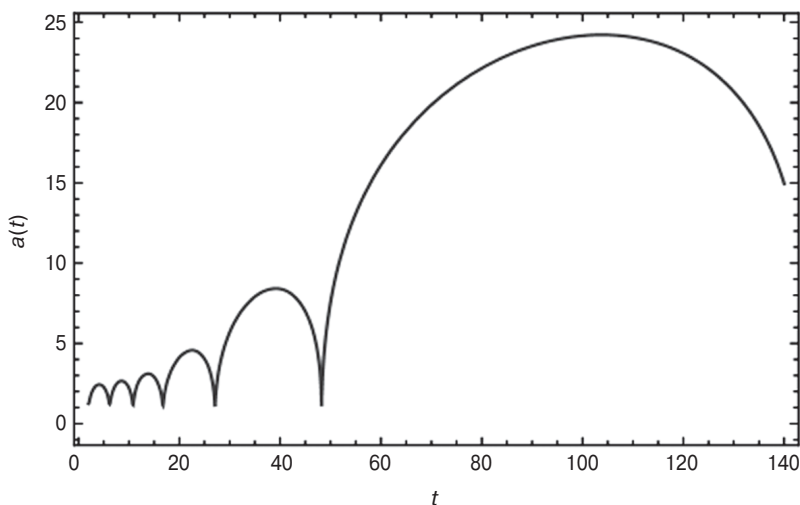


Рис. 10.6. Эволюция замкнутой вселенной благодаря увеличению энтропии. С разрешения: Barrow and Ganguly, «The Shape of Bouncing Universes» (<https://arxiv.org/pdf/1705.06647.pdf>)

Однако остаются взаимоисключающие положения. В 2015 году Фрэмpton показал, что от цикла к циклу можно удалить энтропию. Эта точка зрения похожа на другие исследования, связанные с теорией струн. Если нам нужна циклическая Вселенная, необходимо найти способ уменьшить энтропию. Вдохновившись теорией струн¹, в 1999 году Пол Стейнхардт и Нейл Турок решили, что, вероятно, нашли решение. Стейнхардт, главный автор инфляционной теории, был противником представления о непрерывном рождении вселенных, предсказанном теорией.

¹ Точнее, М-теорией, объединяющей пять теорий струн в одну.

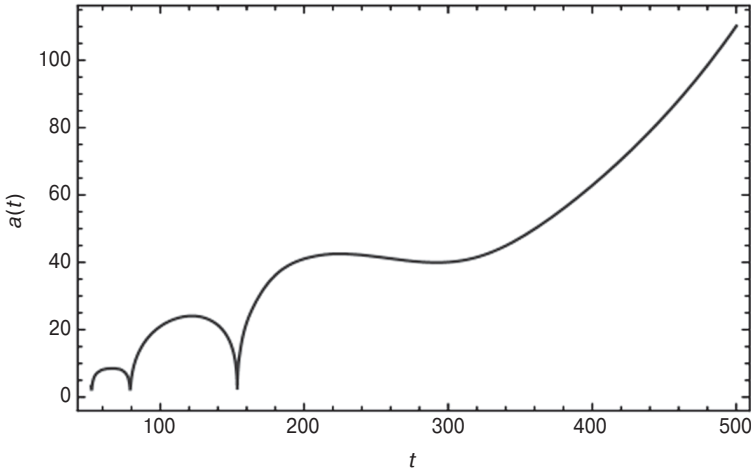


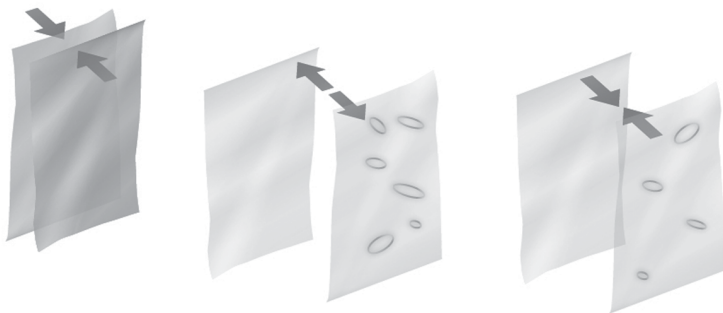
Рис. 10.7. Эволюция вселенной с космологической постоянной благодаря увеличению энтропии. С разрешения: Barrow and Ganguly, «The Shape of Bouncing Universes» (<https://arxiv.org/pdf/1705.06647.pdf>)

Вот почему он хотел найти альтернативу инфляции. Стейнхардт и Турок представили себе две вселенные на бране, каждая из которых состоит из девяти пространственных измерений. Только три из девяти измерений видны, остальные компактифицированы. Вселенные погружены в десятимерный т.н. балк. Две браны соединены замкнутой струной, которая является переносчиком гравитации, и разделены дополнительным измерением, которое может периодически сжиматься (см. рис. 7.6). Поскольку гравитационная сила и частица, которая является посредником взаимодействия, гравитон, распространяются между двумя бранами, две вселенные на бране притягиваются, вызывая столкновение, т.н. Большой хлюп.

Это событие предвещает Большой взрыв и является фундаментальной стадией формирования циклической вселенной. Такая вселенная называется *экпиротической вселенной*¹.

Согласно этим двум авторам проблему с энтропией решили, поскольку сжимается только дополнительное измерение, а не браны, которые продолжают расширяться. Энтропия, созданная в бранах, распространяется и никогда не концентрируется. Эта модель также объясняет темную материю и темную энергию.

¹ Этот термин можно перевести как «преобразование в огонь» или «выход из огня», термин философии стоицизма, обозначающий момент, в который циклически создается и разрушается мир.



Большой взрыв
в результате
столкновения бран

Браны раздвигаются
в результате высвобождения
энергии

Браны сближаются
из-за сжатия
дополнительного размера

Рис. 10.8. Экпиротическая вселенная

Темная материя — это проявление гравитации другой браны и обычной материи, которую она содержит. В результате столкновения бран высвобождается огромное количество энергии и тепла, что генерирует гигантский взрыв, который в ускоренном расширении порождает новую вселенную. Ускоренное расширение появляется в результате остаточной темной энергии взрыва. После Большого хлюпа браны раздвинутся, а потом снова сблизятся, благодаря гравитации и циклическому сжатию дополнительного измерения, и вызовут новый цикл. В отличие от модели Большого взрыва и инфляции, экпиротическая модель полностью устраняет сингулярность. Темная энергия — это своего рода дополнительная гравитация, которая, кроме всего прочего, держит браны в состоянии соосности и стабилизирует их. Браны не являются жесткими, но они как простыни на ветру, поэтому столкновение происходит в разных точках и в разные моменты. В точках, где оно происходит впервые, материя и энергия, произведенные столкновением, будут значительно ниже из-за расширения. В местах, где столкновение происходит позже, появляются неоднородности, из которых возникают галактики.

Таким образом, для объяснения первичной неоднородности, из которой появляются галактики, не нужна инфляция; она является неотъемлемой частью модели.

Что лучше объясняет реальность: инфляция или модель, которую мы описали выше? Чтобы понять это, необходимо сравнить прогнозы двух теорий и наблюдения.

Инфляция предсказывает, что в фоновом реликтовом излучении (СМВ) есть признаки ускоренного расширения: т.н. В-моды поляриза-

ции, упомянутые в разделе 4.3, благодаря генерации гравитационных волн во время инфляции. Эмпирическая модель их не прогнозирует. В 2014 году в результате эксперимента BICEP-2 вроде бы обнаружили это явление, подтверждающее инфляцию. К сожалению, результат не подтвердился, так что необходимы другие сведения для того, чтобы понять, которая из двух моделей (эмпирическая вселенная или инфляция) является верной. Надо сказать, что группа Андрея Линде показала, что у модели эмпирической вселенной есть ряд расхождений с М-теорией. По этой причине Стейнхардт и Турок добавили более точные подробности, а также изменили название модели на «*вселенную-феникс*». Эту модель изучали, пока не предложили две другие вероятные модели: одну, основанную на квантовой механике, предложили Турок и Штеффен Гилен, и классическую модель, предложенную Стейнхардтом. В обеих моделях от сингулярности отказались благодаря Большому отскоку.

Большой отскок используют также и в *теории квантовой петлевой гравитации*¹. Учитывая квантовую механику, сжимающуюся вселенную нельзя сжать после определенного предела, поскольку электрон может приближаться к ядру на определенное расстояние. Похоже, квантовая механика вводит силу отталкивания, которая производит большой отскок.

Наконец, еще один тип циклической вселенной предложил Роджер Пенроуз, т.н. *конформную циклическую космологию*. Согласно Роджеру Пенроузу, во вселенной, которая достигла тепловой смерти, микроскопический уровень может влиять на макроскопический, приводя к тому, что «мертвая» вселенная дает начало новой вселенной. Проблема энтропии решается этим допущением, и, следовательно, энтропия теряется в конечном испарении огромных черных дыр, которые доминируют во вселенной по прошествии 10^{100} лет. Кроме того, модель предсказывает, что столкновение между черными дырами должно вызывать гравитационные волны, которые будут видны как концентрические кольца в анизотропии реликтового излучения. По мнению Пенроуза и Ваагна Гурзадяна, эти кольца видны на карте анизотропии реликтового излучения, полученной космической обсерваторией WMAP.

По мнению Стивена Вайнберга, «осциллирующей Вселенной...» счастливо удастся избежать проблемы Начала», и по этой причине она привлекательна.

В отличие от теории Большого взрыва, которая была основательно проверена, описанные выше модели не получили подтверждения из

¹ Цель этой теории – выстроить единую теорию, исходя из общей теории относительности и квантовой механики.

наблюдений, и, как сказал Ричард Фейнман, «Не имеет значения, насколько красива ваша теория, не имеет значения, насколько вы умны. Если она не согласуется с экспериментами, она неверна».

10.6. Мультимиры

В разделе 9.4 мы видели, что интерпретация квантовой механики, хаотическая инфляция Андрея Линде или теория пузырей, теория струн и так далее, предсказывают существование Мультимира. Даже плоская вселенная совместима с представлением о Мультимире, учитывая, что из нашей Вселенной мы можем наблюдать лишь часть всей Вселенной. Мультимир сочетает в себе все возможные сценарии конца Вселенной, которые мы описали. Другими словами, Мультимир — это бесконечный набор вселенных, (возможно) с разными физическими законами, допускающими разные концы их существования. Хотя многие ученые являются противниками этой идеи, тот факт, что и теория струн, и некоторые инфляционные модели, и плоские вселенные согласны с идеей Мультимира, может быть знаком того, что к ней следует относиться серьезнее (см. Приложение А). Кроме всего прочего, если соединить идею Мультимира с антропным принципом, то отпадет необходимость в некоей «сущности» для установления всех необходимых параметров для формирования Вселенной.

В любом случае, даже если другие вселенные существуют, перед нами проблема найти экспериментальные подтверждения их существования, а это маловероятно.

10.7. Конец космологии

Сегодня мы задаем себе вопрос: какой будут видеть Вселенную люди в далеком будущем? Вот почему мы допускаем, что темная энергия и дальше будет обладать теми же свойствами, что и сейчас. В этом случае из нашей Галактики мы увидим, что галактики продолжают разбегаться с возрастающей скоростью, пока она не превысит скорость света. Как ни странно, это не противоречит прогнозам общей теории относительности, согласно которой максимально возможная скорость — это скорость света. В нашем случае пространство расширяется, поскольку между галактиками создается пространство со скоростью, большей скорости света, и это не противоречит теории относительности. Когда относительная скорость галактик превышает скорость света, мы не можем их

больше видеть. В сущности, исходящий от них свет будет двигаться со скоростью, меньшей скорости разбегания галактик, которые станут невидимыми и покинут наш горизонт. Очевидно, они не исчезнут с нашего горизонта вдруг, но их свет будет подвержен красному смещению. Сначала мы увидим, как они становятся все более красными, потом их свет сдвинется к инфракрасному спектру, микроволновому, радиоволнам и так далее. Галактики местной группы, которые будут нашими галактическими соседями, – примерно 70 галактик в радиусе около 1,5 Мпк – будут по-прежнему нам видны, поскольку гравитационно связаны с нами. Случится это примерно через десятикратный возраст нашей Вселенной. Примерно через 100 миллиардов лет наше Солнце уже минует стадию красного гиганта, породив белого карлика, который, остыв, станет черным карликом. После столкновения с Андромедой и другими галактиками наша Галактика станет другой. Будут звезды и, вероятно, цивилизации на какой-нибудь планете, связанной с ними. Эти цивилизации не увидят Вселенную такой, какой мы видим ее сегодня. Помимо галактик поблизости, они не будут видеть ничего и придут к выводу, как и астрономы XIX века, что Вселенная статична и содержит только нашу и соседние галактики. Они даже не будут осознавать, что Вселенная расширяется.

Больше не будет трех основ теории Большого взрыва. Не будет видно расширения Вселенной, которое наблюдал Эдвин Хаббл, поскольку можно будет наблюдать только галактики местной группы, которые после различных столкновений образуют единую огромную галактику. У нас больше не будет доказательства существования темной энергии, хотя она подавляет плотность других компонентов Вселенной, поскольку мы не будем наблюдать ни расширения, ни ускорения. Во Вселенной в несколько сот раз больше современной, если температура понизится с увеличением размера вселенной, температура реликтового излучения будет в сто раз меньше, а плотность – в сотни миллионов раз меньше. У нас останется третий тест: изобилие легких элементов. При нуклеосинтезе количество водорода и гелия было примерно 75 и 25%, что незначительно отличается от сегодняшних цифр. Прогнозы первичного нуклеосинтеза были подтверждены наблюдениями. Со временем количество гелия и металлов¹ будет намного больше, чем сегодня, и не будет необходимости допускать Большой взрыв для согласования с наблюдениями.

Последнее описание будущего Вселенной, которое есть не что иное, как сценарий тепловой смерти, основано на предположении, что темная

¹ В астрономии все элементы тяжелее водорода и гелия называют металлами.

энергия не меняет своего поведения. В противном случае, у нас были бы совершенно другие сценарии, а не те, что мы описали в этой главе. Если темная энергия сохранит свою природу, нашим потомкам придется придумать способ для описания Вселенной, которая якобы статична, как ошибочно полагал Эйнштейн. Описанное в этой главе будущее — это возможное будущее, будущее, которое может измениться, как меняется человек по своему выбору. Ведь как заметил Марк Твен: «Трудно делать прогнозы, особенно насчет будущего».

ПРИЛОЖЕНИЯ

Приложение А. Инфляция

Инфляция — это предыстория к традиционной теории Большого взрыва.

Алан Гут

Как мы говорили в главе 1, примерно через 10^{-35} секунд после происхождения Вселенной произошло экспоненциальное расширение, произведенное полем под названием *инфлатон*, в результате чего микроскопические размеры выросли до макроскопических, увеличив ее радиус на порядок 10^{26} – 10^{30} . Первым высказал эту теорию Алексей Старобинский в 1979 году, а через несколько лет — Алан Гут. Ее ввели для решения некоторых проблем космологии, а именно:

- проблема горизонта, т.е. способ объяснить, как не связанные области Вселенной (большого размера, чем мог пройти свет с момента Большого взрыва) породили однородную и изотропную Вселенную, как видно по анизотропии реликтового излучения;
- проблема плоскостности, т.е. того факта, что Вселенную описывает плоская геометрия;
- проблема топологических дефектов, например, магнитных монополей, которые, согласно Стандартной космологии, должны быть во Вселенной, однако их нет.

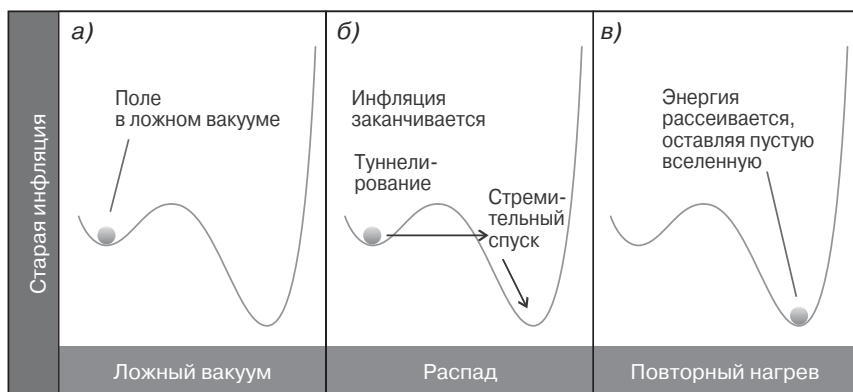


Рис. А1. Инфляция Гута

Существует несколько теорий инфляции. Первая, инфляция Гута, предполагает, что изначально Вселенная была в состоянии ложного вакуума и перешла в состояние истинного вакуума с помощью квантового туннелирования (рис. А1).

Это привело бы к появлению «пузырей» энергии (пузырей истинного вакуума в ложном вакууме), что в свою очередь привело бы к столкновению и образованию вселенной. К сожалению, инфляционное расширение было таким стремительным, что несмотря на расширение на скорости света, эти пузыри не могли слиться. У этой модели были проблемы с тем, как определить конец инфляции.

Эту модель заменили другой (моделью Линде и Стейнхардта), в которой инфляция была медленнее. Основная идея заключалась в том, что во Вселенной доминирует *скалярное поле*, т.н. *инфлатон*, подобный полю Хиггса или полю квинтэссенции, и изначально Вселенная была в состоянии ложного вакуума этого поля. Тогда это поле было единственным — распространенным в пространстве (как поле Хиггса) и с энергетическим профилем (потенциальной энергией), подобным профилю поля Хиггса. Начальная часть профиля поля, область ложного вакуума, является плоской, как видно на рис. А2.

Из состояния ложного вакуума, т.е. от максимума кривой, поле должно было сдвинуться, медленно скатываясь к истинному вакууму (рис. А2), минимуму кривой, т.е. к области минимальной энергии, характеризующейся гравитационным отталкиванием.

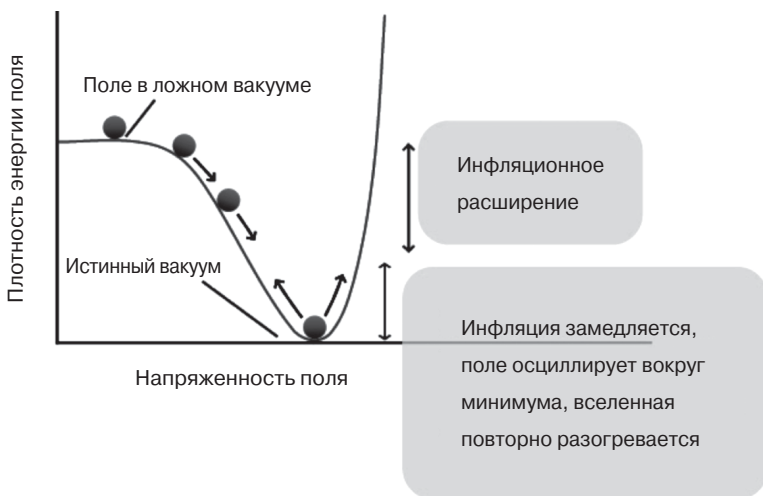


Рис. А2. Эволюция инфляционного поля

Это могло привести к стремительному расширению пространства. Поле потом начало постепенно скатываться к истинному вакууму (минимуму кривой). Энергия наверху, в ложном вакууме, больше энергии в зоне минимума, в истинном вакууме. Когда поле достигает минимума потенциала, в состоянии истинного вакуума, оно начинает колебаться (осциллировать) вокруг него, как мяч, брошенный на спуск с такой формой профиля потенциала, как показано на рисунке. Таким образом, оно начнет рассеивать свою энергию, расположенную на верхушке кривой. Высвобождение энергии, в соответствии с законами квантовой механики, производит поля и частицы во время т.н. *фазы вторичного разогрева*. Следовательно, современные частицы произошли на этой стадии эволюции инфляции (рис. А2). Когда поле достигало минимума потенциала, т.е. истинного вакуума, скорость расширения снижалась до сегодняшней.

Итак, Вселенная была заполнена инфляционным полем в состоянии ложного вакуума. Квантовые флуктуации вывели Вселенную из состояния ложного вакуума и подтолкнули к состоянию истинного вакуума. Изначально это происходило медленно, во время *фазы медленного скатывания*, когда Вселенная чрезвычайно расширилась от размеров порядка 10^{-28} м до нескольких десятков сантиметров за время, необходимое полю для достижения минимума потенциала. Этот размер является наблюдаемой вселенной. Согласно Гуту, размер Вселенной может быть в 10^{26} раз больше, чем размер наблюдаемой Вселенной, но есть расчеты как намного большие, так и меньшие. В этот момент были созданы поля и частицы, а область, где происходила инфляция, начала расширяться с сегодняшней скоростью.

Как все поля, *инфлатон* подвержен квантовым флуктуациям. Квантовые флуктуации приводят к тому, что потенциал инфляции подвергается неопределенности, т.е. другими словами, инфляция не может закончиться везде в одно и то же время, поскольку «флуктуации дают различные значения полю, даже в двух очень близких областях». Итак, инфляция закончится в разное время и в разных точках. В точках, где квантовые флуктуации превышают определенный порог, будет инфляция, а в тех точках, где колебания ниже порога, она прекратится. Образуется пузырь энергии и материи, который даст начало новой вселенной. Это один из вариантов инфляции, *вечная инфляция*, при которой расширение продолжается вечно в разных областях Вселенной. Андрей Линде предложил теорию, основанную на вечной инфляции, т.н. *хаотическая инфляция* или *теория пузырей* (рис. А3). В этой модели, как только инфляция начинается, она создает бесконечное число вселенных, Мультимир, в каждой из которых разные физические законы.

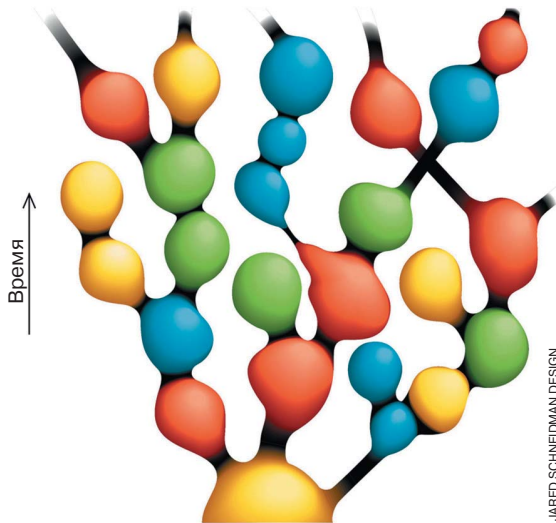


Рис. А3. Образование минивселенных при хаотической инфляции (*теория пузырей*). В каждой вселенной разные физические законы, что показано разным цветом и разной пространственно-временной размерностью. С разрешения: Jared Schneidman, *Scientific American*

Каждая из этих вселенных-пузырей окажется на огромном расстоянии от других и не сможет с ними общаться.

Какие прогнозы есть у инфляционной теории? Об этом речь шла в главе 4. Сейчас мы их вспомним.

- Согласно инфляции, Вселенная плоская, $\Omega \approx 1$. Если она началась при Ω , отличной от 1, то инфляция подтолкнет ее к единице. Наблюдения анизотропии реликтового излучения подтверждают этот прогноз. Более того, поскольку Вселенная плоская, ее энергия равна нулю и, следовательно, она могла образоваться из ничего, точнее, из квантового вакуума. Чтобы убедиться в этом и открыть дверь планковской эпохи, нужна теория квантовой гравитации. Теория струн уводит от этой цели, но есть надежда на петлевую квантовую гравитацию.
- Как все квантовые поля, инфляция подвержена непрерывным квантовым колебаниям. Будут области, которые выйдут из инфляции первыми, другие выйдут позже. В конце инфляции останутся небольшие расхождения в энергии и плотности. Эти небольшие колебания плотности растут благодаря гравитации, и именно они и есть те зародыши, из которых образуются структуры.



Инфляция дает целый спектр возмущений, характеристики которых соответствуют тому, что зафиксировано картой анизотропии реликтового излучения.

- Как уже было сказано, инфляция связана с производством первичных гравитационных волн. Эти волны, несмотря на ложное обнаружение эксперимента ВИСЕР2, еще ни разу не наблюдались.
- Инфляция влечет за собой однородную и изотропную вселенную, как та, что мы наблюдаем.

Инфляция объясняет несколько вещей, но многое остается без объяснения. Например, ничего не известно о поле, которое ее породило, т.н. *инфлатоне*, которое, по некоторым предположениям, и есть поле Хиггса.

Для того чтобы инфляция объяснила все, о чем мы с вами сейчас говорили, необходимо, чтобы условия, ее породившие, были точно отрегулированы (настроены) — аналогично проблеме иерархии (см. главу 6). По мнению Пола Стейнхардта, одного из отцов этой теории, если начальные условия выбраны случайно, скорее всего мы получим «плохую» инфляцию, т.е. инфляцию, не способную привести к сегодняшней Вселенной. Чтобы с уверенностью говорить о том, что инфляция случилась, необходимо найти «первый тип» гравитационных волн, произведенных «растягиванием» пространства благодаря фазе инфляции, и «второй тип» гравитационных волн, произведенных повторным нагреванием. Это и будет проверкой, весомым доказательством тому, что инфляционная парадигма верна. Гравитационные волны первого типа могли оставить следы в анизотропии реликтового излучения, но, как уже было отмечено, их еще не обнаружили. Гравитационные волны второго типа со значительно большей амплитудой обладают диапазоном частот, который превышает порог чувствительности современного оборудования.

Приложение Б. Образование структур

В главе 2 мы обсуждали эволюцию Вселенной от Большого взрыва до образования первых звезд. Из пепла первичных звезд возникло новое поколение звезд, первые галактики и квазары. С помощью телескопов стало возможным наблюдать квазары и галактики примерно миллиард лет после Большого взрыва и слияние квазара и спутниковой галактики, произошедшее примерно 12,8 миллиарда лет назад. Кроме того, впервые стало возможным различить газ и звездный компонент такого удаленного объекта, несмотря на присутствие ослепительного квазара. Как же образовались эти объекты и все остальные? Они возникли из квантовых флуктуаций, созданных во время инфляции, преобразованных расширением во флуктуации плотности материи и энергии.

Другую точку зрения высказали в 1977 году Стивен Хокинг и Гэри Гиббонс. Эти два физика показали, что во вселенной с *космологическим горизонтом*, экспоненциально расширяющейся, как происходит во время фазы космической инфляции, должно выделяться тепловое излучение с температурой, связанной с темпом космологического расширения. Это излучение связано с локальными вариациями температуры. Можно сделать вывод, что при наличии ускоренного расширения существуют изначальные температурные флуктуации.

Квантовые флуктуации, которые представляют собой микроскопические неоднородности, были усилены расширением в период инфляции, генерируя неоднородности материи и температуры, наблюдаемые в анизотропии реликтового излучения. Эти неоднородности представляют собой вариации плотности в среде, которые и составляют зародыши, из которых возникли космические структуры.

Физика формирования космических структур сложна и требует использования численных моделей для изучения финальных этапов. Говоря упрощенно:

- Квантовые флуктуации преобразуются в малые колебания плотности, и во время эпохи доминирования излучения они растут. Масса, составляющая Вселенную, в основном представляет собой темную материю и в меньшей мере барионную материю. Из этих двух компонентов растут только флуктуации темной материи (например, плотность увеличивается) почти во все эпохи, в то время как возмущения барионной материи (электроны и протоны) не могут расти до рекомбинации, поскольку барионы и излучение взаимодействуют, образуя акустические волны.

Таким образом, чтобы понять, как образуются галактики, нам необходимо знать, как скапливается темная материя. На самом деле, галактики погружены в огромные области темной материи, т.н. *гало*, которые образуются благодаря гравитационной неустойчивости флуктуаций темной материи.

- Первые гало были очень маленькими и сливались, образуя все более крупные гало, пока они не достигнут массы 10^{12} солнечной массы, которые «помогают» барионной материи создавать галактики, подобные нашей, или массы до 10^{15} массы Солнца, из которых образуются скопления галактик.
- Изначально существуют невидимые гало темной материи, которые притягивают барионы, и они падают в них, охлаждаются и ссодотачиваются в центре, образуя видимый компонент галактик. Следовательно, все структуры образованы гравитационным сжатием мелких неоднородностей в распределении материи, но не все эти неоднородности могут сжиматься. Сжимаются лишь те, чья масса M больше, чем определенная *масса Джинса* ($M > M_{\text{Jеans}} = \sqrt[3]{\frac{9}{2}c_s^3 / (\pi G \rho)} = (5kT / G\mu m_H)^{3/2} [3 / (4\pi\rho)]^{1/2}$)¹. Масса Джинса зависит от куба скорости звука (или корня квадратного куба температуры T) и от корня квадратного плотности.

Эта масса достигается, когда гравитация, которая вызывает сжатие структуры, и внутреннее давление газа, которое противостоит сжатию, равны. Если масса облака, M , больше чем масса Джинса, $M_{\text{Jеans}}$, то оно сжимается; если же она меньше, то газ под воздействием двух сил начнет колебаться, образуя волны плотности². Теория Джинса работает для статичной системы. В 1946 году советский физик Евгений Лифшиц расширил эту теорию для случая расширяющейся системы, показав, что рост неоднородностей во Вселенной медленнее, чем в статичной системе. В случае формирования звезд масса Джинса имеет значения примерно в 1000 солнечных масс, и сжатие происходит намного быстрее, чем в случае возмущений, образующих галактики. Это объясняет, почему звезды рождаются не поодиночке, а группами в тысячи. Чтобы понять формирование структур, необходимо понимать, как меняется масса Джинса в разные космологические эпохи.

¹ Здесь c_s — это скорость звука, ρ — плотность, T — температура, μ — молекулярный вес, а m_H — это масса атома водорода.

² Эти осцилляции имеют длину волны, пропорциональную скорости звука в среде и обратно пропорциональную квадратному корню плотности.

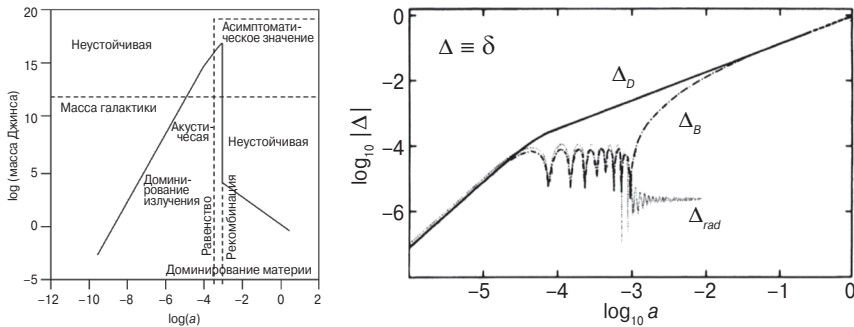


Рис. Б1. Эволюция массы Джинса. Примерно до $a \sim 10^{-6}$ (около года) такой объект, как Млечный Путь с массой $M = 10^{12} M_{\odot}$ является неустойчивым, то есть расположенным к сжатию и образованию структуры, поскольку $M > M_{\text{Jеans}}$, где $M_{\text{Jеans}}$ представлен на вертикальной оси. От $a \approx 10^{-6}$ до $a \approx 3 \times 10^{-4}$ эта масса больше не растет, поскольку $M < M_{\text{Jеans}}$. После рекомбинации, $a > 3 \times 10^{-4}$, у нас снова $M > M_{\text{Jеans}}$. Возмущение сжимается, и образуется новая структура. Справа: эволюция относительной плотности темной материи $\delta = (\rho - \rho_c) / \rho_c$, барионной материи и излучения. С разрешения: E. Battaner and E. Florido (вращение кривых спиральных галактик и его космологические приложения). Слева: эволюция δ в разные эпохи

На рис. Б1 (левая панель) показано, как со временем меняется масса Джинса барионов. Начиная с момента, соответствующего величине расширения параметра¹ $a \approx 10^{-10}$ (примерно 0,3 секунды), чуть раньше расщепления нейтрино и аннигиляции позитронов и электронов, до значения $a \approx 10^{-6}$ (примерно год), масса Джинса барионов растет и она меньше типичной массы галактики, $\sim 10^{12} M_{\odot}$. Поскольку $M \approx 10^{12} M_{\odot} > M_{\text{Jеans}}$, как для барионов, так и для темной материи, система неустойчива и медленно сжимается для образования структур. В этой фазе возмущения плотности материи, радиация и темная материя растут, как видно на рис. Б1 (правая панель). Между $a \approx 10^{-6}$ и $a \approx 3 \times 10^{-4}$ (примерно 47,000 лет), т.н. *эпоха равенства*, масса Джинса больше массы галактики ($M < M_{\text{Jеans}}$) и, следовательно, возмущения в материи и радиации не могут сжиматься, чтобы создавать структуры.

Между $a \approx 3 \times 10^{-4}$ до рекомбинации (380 000 лет) взаимодействие фотонов и барионов производит только осцилляции, и роста барионной структуры нет. Вместо этого, продолжают расти возмущения темной

¹ Вспомните, что параметр расширения a можно рассматривать как среднее расстояние между галактиками.

материи. Такое поведение представлено на рис. Б1 (правая панель), где четко видны осцилляции и непрерывный рост темной материи.

После рекомбинации масса Джинса барионов падает до величин меньших массы галактики, $M \approx 10^{12} M_{\odot}$ намного больше массы Джинса, и возмущения плотности барионной массы начинают снова расти, как видно на рис. Б1 (правая панель), пока не достигают возмущений темной материи, после чего сжимаются для создания структур. Поскольку колебания плотности темной материи никогда не прекращают расти, у них больший контраст плотности, они уже сжались и образовали гало, которые действуют как ямы (потенциальные колодцы), куда «падает» обычная материя, порождая структуры, такие как видимые галактики.

Исторически, первая модель образования галактики, благодаря Олину Эггену, Дональду Линдену-Беллу и Алану Сэндиджу, допускала, что галактики сформировались в результате *монолитного сжатия* большого облака газа. Эта модель не может объяснить некоторые характеристики галактик. Л. Сирл и Р. Зинн предложили модель, в которой галактики формируются в обратном процессе, т.н. *иерархическую модель*, начиная со слияния более мелких прародителей, массой в несколько миллионов солнц для образования более крупных объектов. В результате этого процесса образуется дисковая структура внутри гало темной материи. В иерархической модели эллиптические галактики образуются в результате слияния спиральных галактик. Среди различных свидетельств в пользу иерархической модели назовем программу HDF (Hubble Deep Field), представленную в разделе 2.6.

Приложение В. Механизм Хиггса более подробно

В разделе 6.7 мы узнали, что у электрона со спином $1/2$ есть два *состояния спина*: $1/2$ и $-1/2$. Для массивных частиц со спином 1, например бозонов W и Z , значения спина $-1, 0, 1$. Для частицы без массы (фотон) значения спина -1 и $+1$.

Спиновые состояния, поляризации, или степени свободы представляют собой режимы колебания поля. В то же самое время каждое состояние поляризации можно рассматривать как разные частицы. В этом смысле две частицы «встроены» в электрон, а три частицы — в W -бозон.

Суммируем: поле со спином 0, которое мы называем скалярным, имеет только одну степень свободы. Поле со спином 1 без массы имеет две степени свободы и, следовательно, может колебаться в направлении, перпендикулярном направлению распространения, т.е. вверх—вниз, справа—налево, как видно на рис. В1.

Поле с массой имеет три степени свободы, с двумя перпендикулярными колебаниями ($1, -1$) и одним продольным (0), как видно на рис. В1.

Частица без массы, например фотон, которая движется со скоростью света, не может колебаться по направлению движения, поскольку ее скорость не может быть больше или меньше скорости света. У частицы с массой, например W - и Z -бозона, которая движется со скоростью меньшей, чем скорость света, нет такой проблемы, как у фотона, и она может себе «позволить» колебаться по направлению движения.

В первичной Вселенной, состоявшей из частиц без массы, которые двигались со скоростью света, было четыре переносчика электрослабого взаимодействия: *поля со слабым изоспином*¹ W_1, W_2, W_3 и *поле со слабым гиперзарядом*² B — все без массы. Проблема состоит в том, чтобы создать мир, подобный нашему, где есть фотон γ без массы и переносчики W^+, W^- и Z^0 , у которых есть масса. Как мы уже говорили, векторному бозону с массой нужно три степени свободы. У бозонов W_1, W_2, W_3 две степени свободы, но нет свободы в продольном направлении. Если мы хотим,

¹ Спин ассоциируют с каждой элементарной частицей. Можно также характеризовать частицу т.н. изоспином, целым или полуцелым числом, определяющим число зарядовых состояний адронов. Изоспин регулирует поведение частиц при слабом взаимодействии. У слабого изоспина та же роль, что у электрического заряда при электромагнетизме, и у цвета при сильном взаимодействии. У него три компонента, I_1, I_2 и I_3 , и теоретически изоспин объясняет некоторые асимметрии при распаде.

² Гиперзаряд — это удвоенная разница между электрическим зарядом и изоспином $Q = I_3^w + Y^w/2$, где w означает «слабый» (англ. weak).

чтобы они получили массу, надо найти три скалярные частицы, которые, объединяясь с частицами W_1, W_2, W_3 , дадут им свободу в продольном направлении. Для этой цели подойдет поле Хиггса. Оно состоит из четырех скалярных частиц: H_1, H_2, H_3 и H , что даст возможность частицам W_1, W_2 и W_3 получить массу.

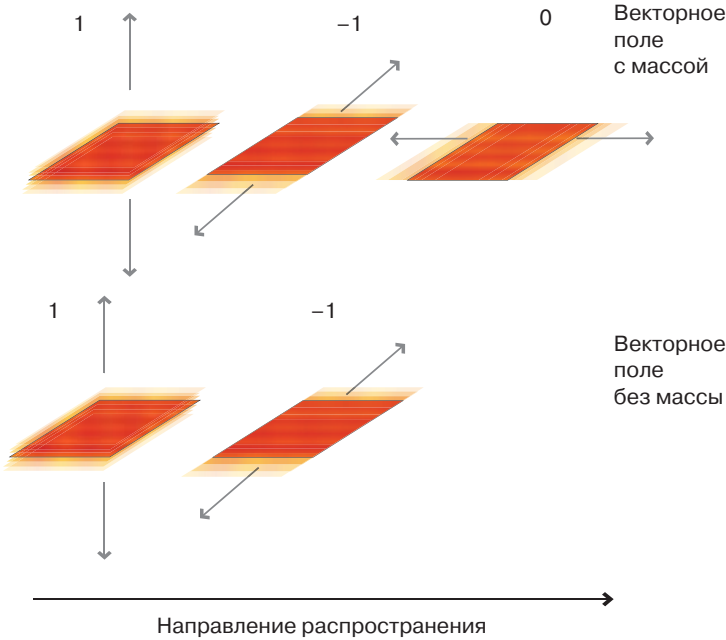


Рис. В1. Степени свободы векторных полей с массой (сверху) и без массы (внизу). С разрешения: Modification of work by David Blanco, «Il bosone di Higgs», RBA Italia

Первые три, H_1, H_2, H_3 , обеспечат свободой в продольном направлении, которой недостает частицам W_1, W_2 и W_3 , чтобы получить массу. Последний компонент поля Хиггса, H , не объединяясь с фотоном (бозоном V), который остается без массы, и мы называем его γ . H остается свободным, эту частицу мы называем *бозоном Хиггса*. Однако полный механизм подразумевает не только то, что H_1, H_2, H_3 обеспечивают свободу продольного движения, но также и то, что бозон Хиггса соединяет некоторые компоненты. Прежде чем показать, как происходит это «соединение», мы хотим ответить на вопрос. Откуда взялись бозоны Голдстоуна H_1, H_2, H_3 ?

Поле Хиггса сыграло фундаментальную роль в первичной Вселенной. Чтобы прояснить, что там происходило, мы рассматриваем эволюцию

поля Хиггса (его уравнения движения) как мяч, который изначально находится на вершучке потенциала в виде мексиканской шляпы, показанной на рис. В2, а потом скользит вниз. Высота представляет собой потенциальную энергию, а ширина у основания – значение (напряженность) поля.

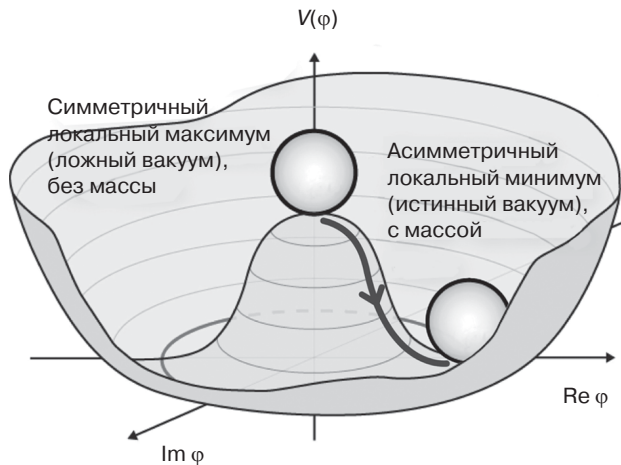


Рис. В2. Эволюция поля Хиггса

Когда частица находится на вершучке шляпы, потенциальная энергия максимальна, поле и масса частиц нулевая. Максимальное положение симметрично для вращения по проходящей через него вертикальной оси, но оно очень неустойчиво, и любая квантовая флуктуация может заставить его скатиться с холма к минимальной потенциальной энергии. Когда мяч, т.е. поле, сдвигается с положения покоя, потенциальная энергия в результате движения начинает преобразовываться в кинетическую энергию. Когда это происходит, поле скатывается в случайную точку на основании мексиканской шляпы. Новое положение, в отличие от первоначального, больше не является симметричным. Имеет место *спонтанное нарушение симметрии*¹.

Прежде чем достичь положения покоя, мяч покачивается вверх-вниз вокруг минимума, а потом останавливается в нем. *Колебания вверх-вниз – это бозон Хиггса (H) (с массой) (рис. В3).*

¹ Понятие спонтанного нарушения симметрии связано с понятием *фазового перехода*. Как и при переходе из жидкого состояния в твердое, нарушение симметрии переносит нас из абсолютно симметричного мира без массы, с высокой температурой в асимметричный мир с массой и низкой температурой.

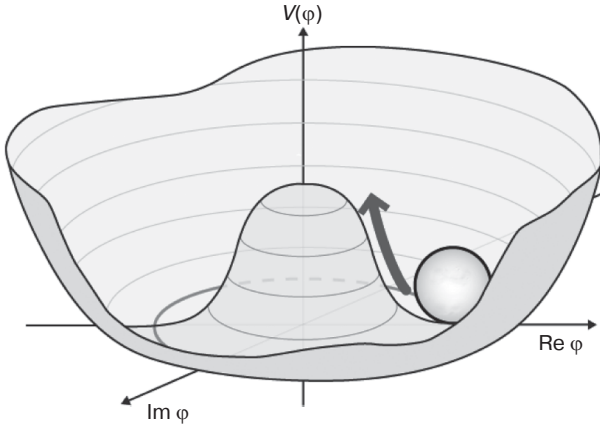


Рис. В3. Осцилляции в радиальном направлении, создающие бозон Хиггса с массой, h . С разрешения: Modification of work by Flip Tanedo, Quantum Diaries

Когда бозон Хиггса H достигает минимума, он приобретает среднее значение в вакууме, равное 246 ГэВ. Когда это случается, поле Хиггса «включается» во всем пространстве и начинает выполнять свою «работу», заполняя все пространство своими частицами. Более того, поле достигает минимума, оно может двигаться по всей окружности основания шляпы (зеленая линия), где величина поля 246 ГэВ (квантовомеханическое основное состояние называется *ожидаемым значением вакуума*), несмотря на то, что поле не находится в состоянии покоя.

У бозона Хиггса есть три плоских направления, соответствующих бозонам Голдстоуна (H^+ , H^- и H^0) (рис. В4).

Колебания вверх-вниз это бозон Хиггса (H) (с массой), а колебания по окружности основания — это бозоны Голдстоуна без массы, которые потом будут поглощены бозонами W_1 , W_2 и W_3 , чтобы образовать калибровочные бозоны W^+ , W^- и Z^0 .

Как правило, его колебания соединяются с другими полями, с последующим переносом энергии от поля Хиггса к другим полям, и частицы обретают массу.

Бозон Хиггса не только обеспечивает продольные режимы, но и осуществляет своего рода связь между бозонами W_1 , W_2 и W_3 и B , подобно тому, как он поступает с фермионами. Итак, прежде чем описать механизм Хиггса, я хотел бы напомнить, как поле Хиггса обеспечивает массой фермионы, например, электроны. В главе 6 мы упрощенно объяснили, что поле Хиггса ведет себя по отношению к частицам как вязкая субстанция.

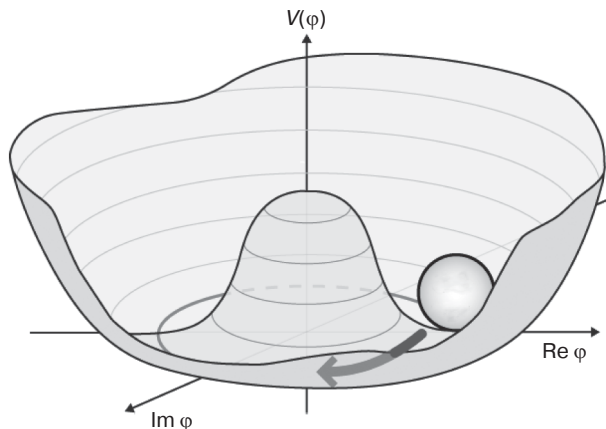


Рис. В4. Осцилляции в плоских направлениях, создающие безмассовые бозоны Голдстоуна H^+ , H^- и H^0 . С разрешения: Modification of work by Flip Tanedo, Quantum Diaries

Попавшие в поле Хиггса частицы движутся медленнее, как будто у них масса становится больше. Выражаясь более технично, описание полей и частиц в Стандартной модели осуществляется с помощью лагранжиана. Соединение бозонов Хиггса с фермионами определяет член взаимодействия $-\lambda\psi^*H\psi$, т.н. *взаимодействие Юкавы*, которое напоминает то, что предложил в 30-е годы прошлого столетия Хидэки Юкава. λ — это т.н. *константа связи Юкавы*, H — поле Хиггса, ψ — поле фермиона, а ψ^* — его комплексное сопряжение. Масса фермиона пропорциональна связи Юкавы: чем больше сила сцепления, тем больше масса фермиона. Когда происходит спонтанное нарушение симметрии, поле Хиггса опускается с верха холма (ложный вакуум) в долину (истинный вакуум). Когда это происходит, поле Хиггса принимает *ожидаемое значение вакуума* (среднее значение энергии в вакууме), равное 246 ГэВ, а выражение $-\lambda\psi^*H\psi$ принимает форму $m\psi^*\psi$, где масса фермиона m пропорциональна значению в вакууме Хиггса ($v = 246$ ГэВ) или $m = \lambda v/\sqrt{2}$.

Упрощенно, поле Хиггса соединяет безмассовый левосторонний (см. Приложение Г) электрон с безмассовым правосторонним (см. Приложение Г) электроном для образования электрона с массой.

Вернемся к калибровочным бозонам. Прежде чем дать продольные степени свободы бозонам W_1 , W_2 и W_3 и сделать их массивными, поле Хиггса соединяет их, как это происходит в случае с электронами. Полная схема действия механизма Хиггса представлена на рис. В5.

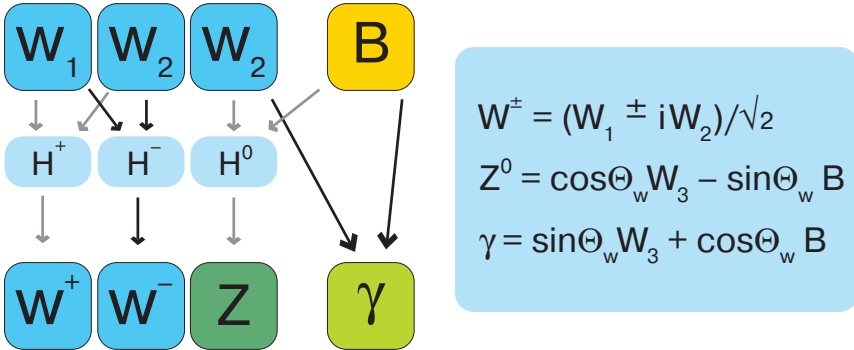


Рис. В5. Кванты поля Хиггса H_1, H_2, H_3 и H взаимодействуют с полями B, W_1, W_2, W_3 , создавая электромагнитные поля W^+, W^- и Z^0

Электромагнитное поле создается полями B и W_3 . В этом случае поле Хиггса ограничено «переплетением» поля B и W_3 , но не обеспечивает продольного компонента. В результате один из бозонов поля Хиггса, H , остается свободным, и его мы и называем *бозоном Хиггса*. В конечном результате это векторное поле с двумя компонентами, у которого, следовательно, нет массы, и оно движется со скоростью света фотон γ .

Фотон получается в результате совмещения $\gamma = \sin\Theta_w W_3 + \cos\Theta_w B$, где Θ_w — *угол Вайнберга*.

Чтобы создать поле Z^0 , поле Хиггса переплетает B и W_3 , а также предоставляет продольный компонент $H_1(H^0)$ (рис. В5) новому векторному полю, у которого три компонента и, следовательно, оно имеет массу. Что касается поля Z^0 , то $Z^0 = \cos\Theta_w W_3 - \sin\Theta_w B$. Это отношение показывает, что у наблюдаемых состояний (Z^0) есть масса, но у исходных полей W_3 и B массы нет, учитывая калибровочную симметрию (инвариантность).

Чтобы создать поле W^+ , поле Хиггса переплетается с полями W_1 и W_2 и предоставляет продольный компонент $H_2(H^+)$ (рис. В5). Новое поле это совмещение трех состояний W_1, W_2 и H_2 .

Чтобы создать поле W^- , поле Хиггса переплетается с полями W_1 и W_2 и предоставляет продольный компонент $H_3(H^-)$ (рис. В5). Новое поле это совмещение трех состояний W_1, W_2 и H_3 .

Приложение Г. Масса нейтрино

В Стандартной модели у нейтрино нет массы, однако их экспериментально наблюдаемое свойство трансформироваться друг в друга возможно лишь при наличии у них массы, хотя бы и очень малой. Масса элементарных частиц, например кварков и лептонов, достигается в результате взаимодействия с полем Хиггса, которое соединяет право- и левосторонние варианты частиц. К сожалению, нейтрино существуют лишь в левосторонней версии и, следовательно, в Стандартной модели не имеют массы¹.

Более того, поскольку механизм Хиггса дает массу только *частицам Дирака*², в Стандартной модели массивные частицы, если они существовали, могли быть исключительно дираковскими фермионами.

Что в нашем контексте подразумевается под право- и левосторонним? Рассмотрим частицу, которая движется и одновременно вращается вокруг своей собственной оси, т.е. частицу со спином. Знак проекции вектора спина, S , на вектор момента, p (произведение массы на скорость) называется *спиральностью*. Если спин и скорость имеют одно и то же направление (рис. Г1 слева), то у частицы правая спиральность; если же у них направление противоположное, как на рис. Г1 справа, то у частицы левая спиральность. Если быть еще более точным, то хотелось бы напомнить, что спиральность не зависит от системы координат, то есть она не трансформируется слева направо и наоборот, только для безмассовых частиц. Для частиц с массой, если мы движемся быстрее, чем частица, спиральность меняется и для последовательности мы должны заменить понятие спиральности на более абстрактное понятие *киральности*³, т.е. отсутствие симметрии относительно правой и левой стороны.

¹ Не имея правостороннего компонента, механизм Хиггса не может переплести их, как делает это с электронами, давая им массу.

² Если частица и античастица это один и тот же объект, то речь идет о майорановских частицах.

³ Этот термин происходит от древнегреческого слова χεῖρ (хеир), что значит «рука». Зеркальное отражение нельзя совместить с самим собой, как в случае с рукой. Точнее, система является киральной, если при преобразовании пространственной четности — т.е. меняя пространственные координаты на обратные $((x, y, z) \text{ на } (-x, -y, -z))$, система не совмещается сама с собой и меняет киральность справа налево и наоборот. До 1956 года считали, что Вселенная инвариантна, оперируя симметрией четности или, иначе говоря, в природе не было процессов, которые могли различать реальное изображение и зеркальное отражение. В 1956 году китайский физик Цзяньсюн Ву рассеяла сомнения Чжэндао Ли и Чженьнин Янга относительно того, что природа не всегда следует принципу четности, доказав, что в слабых взаимодействиях четность не сохраняется.



Рис. Г1. Спиральность частицы

Проблему массы нейтрино можно решить, допустив, что они являются собственными античастицами, то есть они являются нейтрино Майораны, которые могут обладать т.н. майорановской массой. Однако, даже допустив, что нейтрино это майорановские частицы, необходимо объяснить, почему эта масса такая маленькая.

Предложенное решение связано с существованием правосторонних нейтрино, например т.н. стерильных нейтрино, которые уже упоминались. Эти нейтрино могут взаимодействовать с полем Хиггса, как и другие фермионы, не будучи подверженными слабому взаимодействию. Будь у этих нейтрино очень большая масса, было бы невозможно объяснить малую массу обычных нейтрино, поскольку согласно механизму качелей, масса обычных нейтрино обратно пропорциональна массе стерильного нейтрино.

Точнее, масса обычных нейтрино определяется соотношением между квадратом шкалы электрослабой энергии, ~ 246 ГэВ, и энергетической шкалой ТВО, 10^{16} ГэВ, соотношение, равное примерно сотой доле эВ (10^{-2} эВ), в точности ожидаемое значение для массы нейтрино. Этот механизм основан на существовании новой физики на энергетической шкале в 10 000–100 000 миллиардов раз больше, чем шкала электрослабого взаимодействия (100 ГэВ) (т.е. шкала, на которой обнаружили бозон Хиггса), которая может быть шкалой теории Великого объединения, 10^{15} – 10^{16} ГэВ.

Библиография

- Aczel, A.D. (1999). *God's Equation: Einstein, Relativity and the Expanding Universe*.
- Alonso, J.M. (1989). *Introducion al principio antropico* (Ediciones Encuentro, S.S., Madrid).
- Barbour, J. (2005). *The End of Time: The Next Revolution in Physics*, Oxford University Press.
- Bertone, G. (2013). *Behind the Scenes of the Universe: From the Higgs to Dark Matter*, Oxford.
- Carroll, S. (2012) *The Particle at the End of the Universe: How the Hunt for the Higgs Boson Leads Us to the Edge of a New World*, Dutton.
- Carroll, S. (2010). *From Eternity to Here; The quest for the Ultimate theory of time*, Oneworld.
- Casas, A. (2016). *La materia oscura* (Dark matter) (RBA Italia, Milano).
- Davies, P. (1993). *The Mind of God: The Scientific Basis for a Rational World*.
- Davies, P. (2008). *Superstrings: A Theory of Everything?* (Cambridge University Press).
- Deutsch, D. (1997). *The fabric of reality*, Penguin Books.
- Evans, R. *The Cosmic Microwave Background: How It Changed Our Understanding of the Universe*, Springer.
- Ferreira, P. (2014). *The Perfect Theory: A Century of Geniuses and the Battle over General Relativity*, Mariner Book.
- Feynman, R.P. (1986). *QED: The Strange Theory of Light and Matter* (Princeton Science Library).
- Gregg, B. (2019), *Dark matter and dark energy, the hidden 96% of the universe*, Hotsience.
- Guth, A. (1998), *The Inflationary Universe*.
- Gardner, M. (2003). *Multiverses and Blackberries* (W.W. Norton, New York).
- Greene, B. (2011). *The Hidden Reality: Parallel Universes and the Deep Laws of the Cosmos*, Penguin Books.
- Greene, B. (2000). *The Elegant Universe: Superstrings, Hidden Dimensions, and the Quest for the Ultimate Theory*, Vintage Books.
- Hawking, S. *A Brief History of Time: From Big Bang to Black Holes*.
- Hawking, S., *Mlodinow, L.*, *The Grand Design*.
- Hoddeson, L., *et al.* (1997). *The Rise of the Standard Model: A History of Particle Physics from 1964 to 1979*.
- Hogan, C. J. (1998). *The Little Book of the Big Bang: A Cosmic Primer* (Springer-Verlag, New York).
- Impey, C. (2010). *How It Ends: From You to the Universe*, Norton & Company.



- Kaku, M. (2006). *Parallel Worlds: A Journey Through Creation, Higher Dimensions, And the Future of the Cosmos*.
- Kragh, H. (2013). *Conceptions of Cosmos: From Myths to the Accelerating Universe – A History of Cosmology* (Oxford University Press, Oxford).
- Krauss, L.M. (2012). *A Universe from Nothing: Why There Is Something Rather than Nothing*, Free Press.
- Luminet, J.-P. (2006). *L'invenzione del big bang: storia dell'origine dell'universo* (Dedalo, Bari, Italy).
- Mitton, S. and Ostriker, J. (2015). *Heart of Darkness: Unraveling the Mysteries of the Invisible Universe* (Princeton University Press).
- Ne'eman, Y. and Kirsh, Y. (1988). *The Particle Hunters*.
- Neuenschwander, D. E. (2010). *Emmy Noether's Wonderful Theorem* (Johns Hopkins University Press, Baltimore).
- Pagels, H.R. (1984). *The Cosmic Code: Quantum Physics as the Language of Nature*, Dover Publications.
- Parsons, P. (2018). *The Beginning and the End of Everything: From the Big Bang to the End of the Universe*.
- Penrose, R. *The Road to Reality: A Complete Guide to the Laws of the Universe*.
- Profumo, S. (2017). *An Introduction to Particle Dark Matter*, World Scientific.
- Randall, L. (2012). *Knocking on Heaven's Door: How Physics and Scientific Thinking Illuminate the Universe and the Modern World*, Harper Collins.
- Randall, R. (2016). *Dark Matter and the Dinosaurs: The Astounding Interconnectedness of the Universe*.
- Rees, M. (2001). *Just Six Numbers: The Deep Forces That Shape The Universe*.
- Rovelli, C. (2017). *Reality Is Not What It Seems*, Penguin Books.
- Susskind, L. *The Cosmic Landscape: String Theory and the Illusion of Intelligent Design*.
- Tegmark, M. (2015). *Our Mathematical Universe: My Quest for the Ultimate Nature of Reality*.
- Thorne, K.S. (1994). *Black Holes & Time Warps: Einstein's Outrageous Legacy*, Norton & Company.
- Thuan, T.X. (1995). *The Secret melody: And man created the Universe*, Oxford, University Press.
- Vilenkin, A. *Many Worlds in One: The Search for Other Universes*.
- Weinberg, S. (1980). *The First Three Minutes: A Modern View Of The Origin Of The Universe*.
- Weinberg, S. (2010). *Dreams of a Final Theory: The Scientist's Search for the Ultimate Laws of Nature* (Random House, New York).
- Weyl, H. (1952), *Symmetry*, Princeton Science Library.

Предметный указатель

А

абсолютная величина, 26
адиабатичность, 97
адронная эпоха, 43, 44
адроны, 37, 43, 143
аксион, 41, 112
акустические пики, 93
анизотропия реликтового излучения, 52
антилептоны, 43
античастицы, 41
антропный принцип, 203
антропос, 4
аргон, 174
асимметричная темная материя, 165
асимптотическая свобода, 141
астрономическая единица, 12
атом, 114
атомарная теория, 114
аттрактор Шепли, 50

Б

балдж, 63
балк, 163
барионные акустические осцилляции, 199
барионная материя, 13
барионное число, 144
барионы, 37, 43, 143
башни частиц, 162
башня Калуцы – Клейна, 162
башня состояний Калуцы – Клейна, 164
белый карлик, 104
бериллий, 46
бета-распад, 132
«блины» (сверхскопления галактик), 111

бозон Хиггса, 38, 115, 146
бозонные поля, 118
бозоны, 37
бозоны X и Y, 36
бозоны Голдстоуна, 135
бозоны Намбу – Голдстоуна, 133, 134
Большое Магелланово Облако, 215
Большое сжатие (Большой хлопок), 7, 32, 188
Большой адронный коллайдер (БАК/LHC), 7, 156
Большой взрыв, 4, 14, 28, 29, 32, 33, 49, 52, 57, 89
Большой отскок, 32, 223
Большой разрыв, 209
Большой хлопок, 219
боязнь пустоты, 114
брана, 32
броуновское движение, 115

В

ви́но (частица), 150
вакуум, 40
вакуум поля, 120
век Великого объединения, 40
векторное поле, 40, 116
Великий аттрактор, 50
Великое объединение, 152
вечная инфляция, 207, 233
вечная хаотическая инфляция, 205
вечное возвращение, 8
взаимодействие Юкавы, 137
взаимодействия, 38
вимпзиллы, 165, 166
виртуальные глюоны, 130
виртуальные частицы, 39, 119
вмораживание, 155
внутренние симметрии, 126

волновая функция, 128
волновое уравнение, 128
Волосы Вероники, 75
восходящие модели, 112
Вселенная, 8
вселенная с часовым механизмом, 8
вселенная-феникс, 42
Вселенная Фридмана, 10
второй пик, 94
вырожденное состояние, 104
вырожденные электроны, 104

Г

гало темной материи, 62
гало, 237
гармоники, 91
гауссовость, 97
геодезические линии, 78
гиперболическая вселенная, 13
гиперболическая геометрия, 13
глобальное преобразование, 124
глубокое поле Хаббла (HDF), 62
глюино, 150
глюоны, 37, 141
голая масса, 151
голографический мультимир, 207
голографический принцип, 207
голубое смещение, 21
гомо сапиенс, 4
горизонт событий, 78, 106
гравитационная сила, 33, 146
гравитационная сингулярность, 13
гравитационное поле, 86
гравитационные волны, 216
гравитационный потенциал, 118
гравитон, 38, 146, 153

Д

дейтерий, 59
дипольная анизотропия, 50

дипольный отталкиватель, 50
частицы Диарка, 246
дискретная симметрия, 124
длина волны, 17, 34
дополнительные измерения, 157
дуги, 84

Е

евклидова геометрия, 13

З

заговор диска-гало, 74
закон Снеллиуса – Декарта, 76, 86
закон сохранения, 126
закон Хаббла, 16, 22, 27, 29, 31, 187
закрытая вселенная, 12
закрытая вселенная Фридмана, 13
звуковой горизонт, 200
звуковой спектр, 90, 93, 94
звуковой спектр реликтового излучения, 95
зино (частица), 150
зона Златовласки, 103
зона пригодности для жизни, 103

И

иерархическая модель, 62, 239
излучение в рентгеновском диапазоне, 75
излучение Хокинга, 111, 160, 217
излучение Черенкова, 179
изначальная вселенная, 34
изобилие легких элементов, 229
изоспин, 240
изотоп, 59
импульс, 39
инвариантный, 124
инфлатон, 41, 97, 206, 232
инфляция, 41, 42, 90, 92
ионизационный канал, 173

использование ионизации, 169
истинный вакуум, 120

К

кажущаяся светимость, 26
калибровочная теория, 133
калибровочное поле, 126
калибровочное преобразование, 124
калибровочные бозоны, 130, 143
калибровочные симметрии, 127
каналы обнаружения, 169
каон, 140
карликовая сфероидальная галактика, 63
карликовые галактики, 180
карликовые звезды, 101
карта реликтового излучения, 89
квантовая гравитация, 34, 36, 153
квантовая запутанность, 98
квантовая механика, 36
квантовая мультивселенная, 207
квантовая неопределенность, 39
квантовая хромодинамика, 115, 141
квантовая электродинамика (КЭД), 115, 122, 130, 131
квантовое поле, 35, 40, 118
квантовое туннелирование, 219
«квантовые прыжки», 128
квантовые флуктуации, 38, 89, 97
квантовый вакуум, 35, 37
кварко-глюонная плазма, 43
кварки, 37
кварковая эпоха, 43
квинтэссенция, 208
Кельвин, 12
кеплеровское падение, 72
кинетическая квинтэссенция, 209
киральность, 246

кольца, 84
кольцо Эйнштейна, 83
конденсат Бозе – Эйнштейна, 142
конец времени, 217
константа связи Юкавы, 244
континуум, 114
конформная циклическая космология, 227
коричневые карлики, 104
коричневые субкарлики, 104
коричневые, красные, белые карлики, 101
корона, 101
корпускулярно-волновой дуализм, 18, 127
косвенное обнаружение, 168, 178
космическая паутина, 63
космические лучи, 70
космический нейтринный фон, 43
космическое смещение, 209
космическое микроволновое фоновое излучение (СМВ), 28, 29, 42, 46, 49, 89, 98
космогоническая гипотеза Лапласа – Канта, 102
космологическая постоянная, 10
космологический горизонт, 31, 236
космология Большого взрыва, 42
красное смещение, 16, 21, 55
красный гигант, 104, 216
крест Эйнштейна, 83
кривая вращения, 71
кривизна пространства, 3
кривизна, 6
кривые исключения, 175
криогенные эксперименты, 173
критическая плотность, 10, 13
кратовые норы, 35
крупномасштабная структура, 65
ксенон, 174

**Л**

лагранжиан, 244
ландшафтный мультимир, 207
латентное тепло, 41
лептонная эпоха, 43
лептоны, 38, 43, 140, 144
линия водорода, 54
литий, 105
ложный вакуум, 120

М

магнитное поле, 16
масса Джинса, 102, 237
масса Планка, 151
массивный астрофизический компактный объект гало (MACHO), 101, 108
«Математические начала» Ньютона, 8
мезоны, 38, 43, 143, 144
метаустойчивое состояние, 220
механизм «качели», 145
механизм Хиггса, 134
микроволновое фоновое излучение, 7
мнимое время, 33
многомировая интерпретация квантовой механики, 205
модель HDM, 112
модель Большого взрыва, 14
модель горячей темной материи, 111
модель кварка, 141
модель Леметра – Толмана – Бонди, 211
модель фантомной энергии, 209
модель холодной темной материи, 112
модифицированная гравитация, 210

модифицированная ньютоновская динамика (МОНД), 211
модифицированные теории гравитации, 68
моды поляризации, 97
монокристаллическое сжатие, 239
M-теория, 32, 162
мультимир (мультивселенная), 42, 205
мультимир бран, 207
мю-мезон, 140
мюонные нейтрино, 110
мюоны, 37, 38

Н

наблюдаемая Вселенная, 31
нарушение симметрии, 125
нарушение шкалы суперсимметрии, 156
нарушение электрослабой симметрии, 43
«Начала» Ньютона, 118
независимое от спина рассеяние, 169
нейтралито, 154
нейтринные осцилляции, 38, 112
нейтринный фон, 43
нейтрино, 37, 101, 132
нейтронная звезда, 70, 102, 104
нейтроны, 37, 43
неопределенность, 39
неправильные галактики, 63
непрерывная симметрия, 124
несохранение барионного числа, 153
нечеткая темная материя, 165
нисходящая модель, 111
нуклеосинтез, 45, 54
ньютоновская механика, 9, 13, 77

О

облако Оорта, 190
обратная реакция, 211
обсерватория «Евклид», 212
обсерватория «Планк», 31
общая теория относительности, 9, 36
объединение фундаментальных сил, 152
обычная темная материя, 100
однородная, изотропная и нестатичная вселенная, 10
ожидаемое значение вакуума, 244
оптический эксперимент по гравитационному линзированию (OGLE), 108
орбитали, 128
отклонение света, 82
открытая вселенная, 13
отрицательное давление, 191

П

парадокс Ольберса, 9
параллельные вселенные, 208
параметр плотности, 13
параметр расширения, 11
параметр состояния, 221
парниковый эффект, 216
парсек, 12
пары античастиц, 43
первичные гравитационные волны, 97
первичные черные дыры, 108
первичный атом, 22, 23
первичный нуклеосинтез, 109
первоначальный атом, 14
первоначальный спектр возмущений, 42
первый пик, 94

переход к стадии Большого объединения, 41
периодичный мир, 12
петлевая квантовая гравитация, 218
петлевая квантовая теория, 32
пик (гармоники), 91
пи-мезон, 140
плазма кварков, 43
планетарная туманность, 104
планетезимали, 102
планковская эпоха, 35
планковская эра, 36, 40
планковское время, 35, 37
плоская геометрия, 35
поверхность последнего рассеяния, 52, 93
позитроны, 43
поле взаимодействия, 126
поле Хиггса, 41, 121
поле, 39
поле связи, 126
поле скалярного типа, 209
поле со слабым гиперзарядом, 240
поле со слабым изоспином, 240
поляризованный свет, 178
портал Хиггса, 166
постоянная Хаббла, 27, 31
потенциал «мексиканская шляпа», 206
поток, 26
правило октета, 141
предел Оорта, 69
предел Чандрасекара, 105, 189
преобразование четности, 133
прецессия перигелия Меркурия, 67
принцип, 39
принцип исключения Паули, 104, 142
принцип неопределенности, 39



- принцип неопределенности Гейзенберга, 119
принцип эквивалентности, 77
проблема горизонта, 231
проблема иерархии, 146, 150
проблема касп-ядра, 166
проблема космологической постоянной, 196
проблема плоскостности, 231
проблема пропавших спутников, 166
проблема совпадения, 202
проблема тонкой настройки, 157
проблема топологических дефектов, 231
пространства Калаби – Яу, 159
пространство анти-де Ситтера, 164
протозвезда, 102
протоны, 37, 43
протопланетарный диск, 102
прямое обнаружение, 168
пузыри Ферми, 185
пульсары, 106
пустоты, 63
пятая сила, 209
- Р**
радиодиапазон, 74
распад протона, 153
разделение (декаплинг), 47
расширяющаяся вселенная, 26
редукционизм, 8
рекомбинация, 47
реликтовое излучение, 24
реликтовое количество, 156
ренормализация, 130
решения Фридмана, 13
- С**
самовзаимодействующая темная материя, 165
сверхновая, 69, 104
сверхновые типа Ia, 189
сверхновые с парной нестабильностью, 60
сверхновые Филлипса, 191
сверхпроводящий материал, 169
сверхскопление Гидра – Кентавр, 50
сверхскопление Ланиакея, 50
сверхскопления, 63
световой год, 12
сэлектрон, 150
сечение аннигиляции, 156
силовые линии, 118
сильное линзирование, 84
сильное ядерное взаимодействие, 38, 131, 146
сильный, 84
симметрия зарядности и четности, 44
симметрия четности, 133
скалярное поле, 39, 116, 232
скварк, 150
скопление Девы, 65, 75
скопление Волосы Вероники, 70, 75, 100
скопление Пуля, 86, 87
скопления, 75
скопления галактик, 63
скорость убегания (удаления), 13, 16
скрининг, 210
скрининг Вайнштейна, 210
скрининг-хамелеон, 210
скрытая симметрия, 125
скрытый, или темный сектор, 166
слабое ядерное взаимодействие, 38, 131, 146
слабый, 84
слишком большая проблема, 166

- смоделированный мультимир, 207
снеговая линия, 103
снейтрино, 150
совершенный космологический принцип, 14
солнечный ветер, 101
состояние Хартла – Хокинга, 33
состояния поляризации, 135
состояния спина, 135
сотрудничество LIGO/VIRGO, 109
сохранение импульса, 126
сохранение энергии, 126
спектр излучения, 20
спектр поглощения, 20
спектральный индекс, 97
специальная теория относительности, 130
спин, 37
спиральная галактика, 61, 71
спиральность, 244
спонтанное нарушение симметрии, 124, 133, 242
спутник COBE, 51
спутник Ферми, 178
стандартная линейка, 200
стандартная модель частиц, 113, 115
стандартная модель физики элементарных частиц, 7
стандартные свечи, 26, 188
статистика Бозе – Эйнштейна, 142
статистика Ферми – Дирака, 142
степени свободы, 135
степень 10, 11
стереоскопическая техника, 179
стерильный нейтрино, 145, 165
субструктуры, 180
сумерки богов, 213
супергиганты, 102
Супер-Камиоканде (эксперимент), 217
суперсила, 152
суперсимметрия (SUSY), 7, 150, 152
сцинтилляция, 169
сцинтилляция кристаллов йодида натрия, 171
- Т**
таблица элементов, 115
тау, 37
тау нейтрино, 110
тау-мезон, 140
тау-частицы, 38
темная материя, 68, 69, 76, 89
темная материя МACHO, 101
темная энергия, 95, 97, 193
темный фотон, 165, 166
теорема Голдстоуна, 133
теорема о вириале, 70, 76
теорема о связи спина со статистикой, 142
теории квантового поля, 115
теория Великого объединения (GUT), 40, 152, 153, 217
теория возмущений, 129, 151
теория всего, 158
теория Калуцы – Клейна, 157
теория пузырей, 228, 233
теория Рэндалла – Сандрама, 164
теория сверхбольших измерений, 163
теория струн, 32
теория суперструн, 157
теория устойчивого состояния, 14
теория электрослабого взаимодействия, 115
теплая темная материя, 97
тепловая смерть, 215
томографическая реконструкция, 202

третий пик, 94
третий, 59
тяжелые лептоны, 150

У
углеродный цикл, 59
удержание (конфайнмент), 141
ультрафиолетовое (УФ) излучение, 60
универсальное дополнительное измерение (UED), 164
уравнение гравитационной линзы, 86
уравнение состояния, 209
уравнения гравитационного поля, 77

Ф
фаза вторичного разогрева (рехитинг), 41, 233
фаза главной последовательности, 105
фаза медленного скатывания, 233
фазовый переход, 242
фантомная энергия, 221
фермионные поля, 118
фермионы, 37, 38, 142
физика квантового поля, 195
филаменты, 63
флуктуации плотности, 52, 97
фон первичной гравитационной волны, 42
фоновый шум, 171
фононы, 169
фотино, 112, 150
фотоны, 34, 37, 40, 43
фотосфера, 101
фотоэлектрический эффект, 127
фотоэлектронный умножитель, 174
фундаментальная частота, 90

фундаментальные поля, 116

Х

хиггсина, 150
холодная темная материя, 41
хромосфера, 101

Ц

цветовой заряд, 141
цепочка протон – протон, 58
цефеиды, 24, 25, 188
цианоген, 49
цикл Сароса, 5
циклическая вселенная, 32

Ч

частицы, 41
частота, 17
черная дыра, 14, 68, 104, 106
черное тело, 51
черный карлик, 105
чудо WIMP-частиц, 156

Э

экзопланеты, 103, 203
экипиротическая вселенная, 42, 225
экипиротическая модель, 32
эксперимент DMICE, 172
электрическое поле, 16
электромагнитная волна, 16
электромагнитная сила, 38, 146
электромагнитное поле, 119
электромагнитный спектр, 16
электронвольт, 12
электронные нейтрино, 110
электроны, 37, 38, 43
электрослабая эпоха, 41
электрослабое взаимодействие, 135
эллиптические галактики, 63
энергия Ферми, 142

- энтропия, 223
эпоха нуклеосинтеза, 45
эпоха равенства, 238
эпоха радиации, 46
эпоха рекомбинации/разделения, 47
эффект Ганна – Петерсона, 55
эффект гравитационной линзы, 70
эффект Доплера, 16, 21, 27, 72
эффект затухания Силка, 94
эффект Заутера – Швингера, 122
эффект Казимира, 122
эффект линзирования, 82
эффект Лэмба, 122
эффект микролинзирования, 84
эффект Примакова, 175
эффект слабого линзирования, 84
- Я**
ядро гелия-4, 44
- 2-сфера, 9
3-сфера 9, 12
- А**
ADMX (Axion Dark Matter Experiment), 175
AMANDA, 182
AMS-02, 182
ANTARES (Astronomy with a Neutrino Telescope and Abyss environmental Research Project), 182
- В**
В-моды, 226
BDUNT (Baikal Deep Underwater Neutrino Telescope), 182
BICEP (эксперимент по исследованию реликтового излучения), 99
- BOOMERanG (наблюдения с помощью воздушного шара миллиметровой внегалактической радиации и геофизики), 52, 196
BOSS (спектроскопическое наблюдение барионных осцилляций), 200
- С**
CALET (Calorimetric Electron Telescope), 182
CANGAROO-III (телескоп), 179
CAST (CERN Solar Axis Telescope), 175
CDMS (криогенный поиск темной материи), 112, 173
CDMSI, II (криогенный эксперимент по поиску темной материи), 173
COGENT (криогенный эксперимент), 173
CORE (спутник), 99
CP-симметрия, 44
CRESST (криогенный эксперимент), 173
СТА (массив черенковских телескопов), 180
- Д**
DAMA/LIBRA (эксперимент), 171
DAMPE (Dark Matter Explorer), 182
DARKSIDE (коллаборация), 174
DARKSIDE-20k, 174
DARWIN (детектор), 175
D-браны, 162
- Е**
EDELWEISS (криогенный эксперимент), 173
EGRET (телескоп), 184
EROS (коллаборация), 108

Н

HAWC (High-Altitude Water Cherenkov Observatory), 187

HESS (высокоэнергетическая стереоскопическая система), 179

I

INTEGRAL (телескоп), 184

J

JAXA (спутник), 99

К

КМ3NET (телескоп), 182

L

LiteBIRD (спутник), 99

LUX (эксперимент), 174

М

MAGIC (Major Atmospheric Gamma Imaging Cherenkov Telescope), 179

MSSM (минимальная суперсимметричная модель), 153

Р

PAMELA (Payload for Antimatter Matter Exploration and Light-nuclei Astrophysics), 181

PAVLAS (коллаборация), 178

PIXIE (спутник), 99

Planck (спутник), 52, 53, 56, 70, 98

Q

QUIJOTE (эксперимент), 99

Q-шары, 165

R

R-четность, 155

S

SuperCDMS (криогенный эксперимент по поиску темной материи), 173

SuperCDMS SNOLAB (эксперимент по обнаружению частиц с малой массой), 173

Supernova Cosmology Project (SCP), 190

V

VERITAs (Very Energetic Radiation Imaging Telescope Array System), 179

W

WIMP (слабовзаимодействующие массивные частицы), 154, 168

WMAP (Wilkinson Microwave Anisotropy Probe, спутник), 52, 98

X

XDF (чрезвычайно глубокое поле), 62

XENON (эксперимент), 172, 174

XENONIT (эксперимент), 174

Производство книг на заказ
Издательство «ТЕХНОСФЕРА»
125319, Москва, а/я 91
тел.: (495) 234-01-10
e-mail: knigi@technosphera.ru

Реклама в книгах:

- модульная
- статьи

Подробная информация о книгах на сайте
<http://www.technosphera.ru>

Антонино дель Пополо

НЕВИДИМАЯ ВСЕЛЕННАЯ

Темная материя и темная энергия.
Происхождение и исчезновение Вселенной

Компьютерная верстка – ИП Автушенко Р.В.
Дизайн – Н.И. Семякина
Выпускающий редактор – О.Н. Кулешова
Ответственный за выпуск – С.А. Орлов
Редактор-продюсер – С.В. Новиков

Подписано в печать 05.06.2023
Формат 60×90/16
Гарнитура «Ньютон»
Печ. л. 16,25. Тираж 1000 экз. Зак. № Т-670
Бумага офсет №1, плотность 80 г/м²

Издательство «ТЕХНОСФЕРА»
Москва, ул. Краснопролетарская, д. 16, стр. 2

Отпечатано в полном соответствии с качеством предоставленного электронного оригинал-макета в типографии АО «Т 8 Издательские Технологии» 109316, г. Москва, Волгоградский проспект, д. 42