

Сергей Л. Парновский
Как работает Вселенная: Введение в современную
КОСМОЛОГИЮ



Текст предоставлен правообладателем
http://www.litres.ru/pages/biblio_book/?art=27827085&lfrom=30440123
«Как работает Вселенная: Введение в современную космологию»: Альпина нон-фикшн;
Москва; 2018
ISBN 978-5-9614-5060-6

Аннотация

Эта книга посвящена космологии – науке, недавно отпраздновавшей свое столетие. Она объясняет, почему мы уверены, что у Вселенной есть начало, где и когда произошел Большой взрыв, что означает разбегание галактик, как образовалось все, что нас окружает, от атомов до галактик, каково будущее Вселенной, существуют ли миры с другими физическими законами, что такое черные дыры и многое другое. Подробно рассказывается про то, что нам известно и что неизвестно про две таинственные сущности, которые вместе составляют более 95 % содержимого Вселенной – темную материю и темную энергию. Кроме того, показаны физические основы общей теории относительности и предсказанные ею эффекты.

Книга ориентирована на широкий круг читателей, но некоторые ее разделы, в которых излагаются элементы нерелятивистской космологии, требуют знания математики на уровне начальных курсов университета. Эту часть можно рассматривать как своеобразный учебник, в котором основные космологические решения получены без использования математического аппарата общей теории относительности.

Сергей Парновский
**Как работает Вселенная: Введение в современную
космологию**

С. Л. Парновский

Как работает Вселенная

Введение в современную космологию



ТРАЕКТОРИЯ



АЛЬПИНА НОН-ФИКШН

Москва
2018

Научный редактор *Анатолий Засов*
Редактор *Антон Никольский*
Руководитель проекта *Д. Петушкова*
Корректоры *М. Миловидова, М. Савина*
Компьютерная верстка *Е. Кукалева*

Дизайн обложки С. Хозин
Иллюстратор И. Жук

Издание подготовлено в партнерстве с Фондом некоммерческих инициатив «Траектория» (при финансовой поддержке Н.В. Каторжного).



Фонд поддержки научных, образовательных и культурных инициатив «Траектория» (www.traektoriafdn.ru) создан в 2015 г. Программы Фонда направлены на стимулирование интереса к науке и научным исследованиям, реализацию образовательных программ, повышение интеллектуального уровня и творческого потенциала молодежи, повышение конкурентоспособности отечественных науки и образования, популяризацию науки и культуры, продвижение идей сохранения культурного наследия. Фонд организует образовательные и научно-популярные мероприятия по всей России, способствует созданию успешных практик взаимодействия внутри образовательного и научного сообщества.

В рамках издательского проекта Фонд «Траектория» поддерживает издание лучших образцов российской и зарубежной научно-популярной литературы.

© Парновский С., 2017

© Издание на русском языке, перевод, оформление. ООО «Альпина нон-фикшн», 2018

Все права защищены. Произведение предназначено исключительно для частного использования. Никакая часть электронного экземпляра данной книги не может быть воспроизведена в какой бы то ни было форме и какими бы то ни было средствами, включая размещение в сети Интернет и в корпоративных сетях, для публичного или коллективного использования без письменного разрешения владельца авторских прав. За нарушение авторских прав законодательством предусмотрена выплата компенсации правообладателя в размере до 5 млн. рублей (ст. 49 ЗОАП), а также уголовная ответственность в виде лишения свободы на срок до 6 лет (ст. 146 УК РФ).

* * *

Предисловие

В книге описана история и современное состояние космологии – науки о Вселенной в целом. Она посвящена описаниям основных идей космологии: расширяющейся Вселенной, ее возникновению в ходе Большого взрыва, эволюции, характерным величинам и т. д. Мы попытались ответить на многие часто задаваемые вопросы на эти темы. Мы подробно рассказываем про две загадки современной науки, имеющие непосредственное отношение к космологии, – темную материю и темную энергию.

Эта книга отличается от большинства научно-популярных книг. Золотое правило их написания гласит: каждая формула в тексте уполовинивает число потенциальных читателей. Тем не менее мы рискнули и используем уравнения, но только там, где они необходимы. Мы постарались свести количество формул до минимума и сделать их настолько простыми, насколько это возможно, понятными для всех, кто изучал математику или физику в институте. Формулы собраны в особые разделы, отмеченные в оглавлении звездочками как «Расширенный материал», и они должны рассматриваться именно так. Кроме того, в тексте они отмечены изображением Альберта Эйнштейна.



Если вы их пропустите, это не ухудшит понимание материала, однако в основном тексте есть несколько ссылок на эти разделы, поэтому советуем хотя бы просмотреть их. Каждая такая часть начинается с краткого резюме. Эти разделы составляют своеобразный простой учебник по космологии для тех, кто не знаком с математическим аппаратом общей теории относительности (далее ОТО), но хотел бы понять, откуда берутся законы космологии.

Остальная часть книги рассчитана на широкую аудиторию, хотя и предполагает некоторый минимальный уровень знания математики и физики. Тем, у кого нет даже базовых знаний в области астрономии, мы настоятельно рекомендуем прочитать несколько популярных книг по астрономии. В качестве первой мы предлагаем вышедшую в 1969 г. работу Айзека Азимова «Вселенная: от плоской Земли до квазаров», которая, впрочем, несколько устарела, но это с лихвой компенсируется легкостью и доходчивостью текста. Другие предложения для чтения перечислены в конце раздела «Выводы».

Мы старались излагать материал без упрощений, свойственных научно-популярной литературе, и объяснять, на каких основаниях делаются те или иные предположения или оценки в космологии. В тех вопросах, где современная космология сталкивается с проблемами, мы не только их не скрывали, но, наоборот, уделяли им повышенное внимание. То же самое относится к ситуациям, относительно которых у ученых нет однозначного мнения. Мы не пытались выдавать гипотезы за устоявшиеся теории, как это нередко бывает. В некотором смысле эта книга находится где-то между научно-популярной книгой и учебником, являясь своего рода мостом через ущелье, отделяющее популярную науку от истинной науки.

Книга основана на монографии «Введение в современную космологию» (Парновский, Парновский, 2013), которая была хорошо принята гораздо более широкой аудиторией, чем мы ожидали. Мы переработали материал с учетом вопросов и пожеланий читателей и попытались объяснить все научные термины, которые используем.

Глава 1 **Законы Вселенной**

1.1. Истоки космологии

Эта книга посвящена космологии – науке о структуре и эволюции Вселенной в целом, ее прошлом и будущем. Космология – не просто молодая, а очень молодая наука; ей исполнилось всего 100 лет. Ее появление связано с публикацией в 1917 г. работы Альберта Эйнштейна «*Kosmologische Betrachtungen zur allgemeinen Relativitätstheorie*»¹. В ней впервые законы физики были применены ко всей Вселенной сразу. Конкретно речь шла об уравнениях недавно открытой Эйнштейном ОТО.

В принципе ничто не мешало этой науке появиться на 250 лет раньше, сразу после открытия Исааком Ньютоном закона всемирного тяготения. Физики XVII–XIX вв. рассуждали о бесконечной Вселенной, заполненной звездами, вокруг которых обращаются планеты. Такая Вселенная существовала вечно и все, что нужно было для предсказания ее будущего состояния, – это знание законов механики и текущего положения всех объектов.

¹ Русский перевод опубликован под названием «Вопросы космологии и общая теория относительности» в книге: Эйнштейн А. Собрание сочинений в 4-х т. Т. 1. – М.: Наука, 1965. С. 601–612.

Однако сила всемирного тяготения в классической механике имеет одну особенность: это всегда сила притяжения, которая никогда не становится силой отталкивания. Поэтому отдельные звезды в бесконечной Вселенной под действием силы взаимного притяжения должны были бы в конце концов собраться вместе. Вопрос о взаимном притяжении решался с помощью простого, но неверного рассуждения: раз Вселенная бесконечна, то на каждую частицу действует сила притяжения бесконечного числа других частиц. Если считать, что частицы заполняют Вселенную с постоянной плотностью, можно сделать вывод, что суммарная сила компенсируется, следовательно, гравитационным притяжением при рассмотрении динамики Вселенной в целом можно пренебречь.

Эта идея подобна попыткам поставить карандаш на кончик грифеля. В обоих случаях причиной проблем является неустойчивость равновесия. Даже если мы как-то умудримся поставить карандаш вертикально на острый конец грифеля, то любое сколь угодно малое отклонение от вертикали вызывает момент силы, отклоняющий карандаш в том же направлении, увеличивающий отклонение и полностью нарушающий исходное равновесие. В технике это называется положительной обратной связью.

Еще более близкая аналогия связана с водой в перевернутом стакане. Многие знакомы с классическим опытом, в котором стакан с водой, накрытый открыткой или плотной картонкой, переворачивают верх дном и вода удерживается в стакане атмосферным давлением, эквивалентным давлению 10,3 м воды. Но немногие задумываются, зачем для этого опыта необходима картонка. Причина связана с неустойчивостью Рэля – Тейлора: когда более плотная жидкость (вода) помещена над менее плотной (воздух²), любое отклонение поверхности от плоской будет экспоненциально расти со временем, разрушая границу очень быстро. Процесс обычно называется выливанием жидкости. Вот почему для демонстрации необходима картонка: она никак не влияет на давление воздуха, не создает никаких сил, но фиксирует форму границы раздела между водой и воздухом, препятствуя развитию неустойчивости Рэля – Тейлора.

Аналогично, в неустойчивой Вселенной случайным образом образуются области повышенной плотности, к которым начинают двигаться соседние звезды и области пониженной плотности, называемые войдами. Заметим, что взаимное притяжение звезд, заполняющих бесконечную Вселенную, приводит не только к росту возмущений плотности, но и к ускоренному сжатию всей Вселенной, т. е. к уменьшению расстояний между звездами.

Естественно, ученым было известно, что отклонения от однородного распределения плотности материи приводили к тому, что неоднородности начинали нарастать со временем, но в тот период этот механизм рассматривался только на масштабах, не превышающих размеры Солнечной системы. Согласно гипотезе Лапласа, планеты Солнечной системы образовались из исходной газопылевой туманности именно под влиянием взаимного гравитационного притяжения. К большим масштабам подобные рассуждения не применяли. В рассматриваемой картине мира рост неоднородностей плотности материи приводил к образованию планет, которые не падали на Солнце только потому, что обращались вокруг него. На расстояниях, сравнимых с расстоянием до ближайших звезд, Вселенная уже рассматривалась как нечто однородное, и считалось, что сила притяжения какого-либо тела к разным звездам полностью компенсируется.

Эту радужную картину нарушал так называемый парадокс Ольберса, сформулированный в 1823 г. немецким астрономом-любителем Хайнрихом Ольберсом, врачом по профессии. Суть его состояла в том, что в бесконечной неизменной Вселенной вместо ночного неба мы видели бы раскаленную небесную сферу, светящуюся, как поверхность Солнца. Объясняется это следующим образом: если мы разделим Вселенную на концентрические сферические оболочки постоянной толщины с Землей в центре, то поток света, падающий на Землю от каждой из оболочек, будет одинаков, поскольку число звезд в

² В гидродинамике газы часто тоже называют жидкостями.

них будет расти пропорционально квадрату расстояния, что скомпенсирует аналогичный множитель в формуле для освещенности. Поскольку число слоев бесконечно, то и общая сумма будет бесконечна. Единственная причина, по которой освещенность будет все же конечной, это то, что более близкие звезды будут закрывать собой далекие. Другими словами, в каком бы направлении мы ни посмотрели, рано или поздно луч нашего зрения должен наткнуться на какую-то звезду.

Тем не менее каждый из нас прекрасно знает, что ночью наблюдается совсем другая картина. В качестве простого решения парадокса Ольберса предлагали вариант, при котором свет далеких звезд поглощается облаками межзвездной пыли, но это решение звучит убедительно только для тех, кто не знает физику. За продолжительное время эта пыль, поглощая излучение, нагрелась бы до температуры окружающих звезд и сама стала бы светящимся объектом.

Со временем прогресс в астрономии привел к модели Вселенной, предложенной Уильямом Гершелем в конце XVIII в. В ней звезды не заполняли всю Вселенную, а образовывали единственное звездное скопление, называемое Галактикой и имеющее линзовидную форму. В связи с этим возник вопрос: почему звезды не падают на центр Галактики? Ответ был столь же прост, как и ответ на вопрос, почему планеты не падают на Солнце: они обращаются вокруг него. Точно так же и отдельные звезды Галактики обращаются вокруг ее центра. Движение Солнца относительно центра Галактики было обнаружено все тем же Гершелем в 1783 г. С незначительными уточнениями эта картина мироздания считалась общепринятой до начала XX в. Идея Галактики решала парадокс Ольберса, поскольку материя теперь занимала конечный объем во Вселенной. Однако, после того как были открыты другие галактики, парадокс Ольберса опять стал актуальным.

Таким образом, космология, которая потенциально могла появиться еще в конце XVII в., появилась лишь в начале XX в. и недавно отпраздновала свой столетний юбилей. Возникновение космологии связано с одним удивительным обстоятельством: обычно новые науки появляются в простейшей постановке и затем, в процессе своего развития, переходят к более сложным моделям, расчетам и используют все более современные физические теории. Например, физика твердого тела столетиями получала результаты, основываясь на классической физике, и только потом стала успешно использовать квантовую механику.

Космология же появилась сразу в своем самом сложном варианте – в виде релятивистской космологии, основанной на ОТО. И лишь спустя десятилетия космологи к немалому удивлению обнаружили, что можно рассматривать куда более простую нерелятивистскую космологию. Дело в том, что однородная Вселенная развивается одинаково во всех своих частях, и для изучения развития ее как целого достаточно изучить развитие небольшой области пространства, например 1 см^3 . А при изучении 1 см^3 уже не важны кривизна пространства-времени и другие сложные вопросы ОТО.

Но это справедливо только в случае однородной и изотропной Вселенной. В подобном мире нет избранного места или предпочтительного направления, каждая точка не может быть лучше или хуже, чем любая другая, и каждое направление не лучше или хуже любого другого. Эта идея известна как принцип Коперника. Хотя не все результаты релятивистской космологии могут быть получены в рамках нерелятивистской, но основные понятия выводятся довольно просто. Для их вывода, понимания и анализа достаточно знания физики на уровне младших курсов университета. Поэтому в книге в случаях, когда мы просто не могли отказать себе в желании написать некоторые формулы, мы ограничились нерелятивистской космологией.

Вопрос: *Чем космология принципиально отличается от других наук?*

Ответ: *Тем, что она изучает уникальный, существующий в единственном экземпляре, изменяющийся во времени объект, частью которого мы являемся. В результате не может идти речи ни о повторяемости, ни о воспроизводимости, ни, тем более, об активных экспериментах. В связи с этим к космологическим теориям очень сложно*

применить критерий фальсифицируемости, выполнение которого требуется от любых научных теорий. Аналогичная ситуация встречается и в некоторых других научных дисциплинах, таких как история и эволюционная биология.

1.2. Принципы общей теории относительности

Появлению науки космологии предшествовало появление ОТО, окончательно сформулированной Эйнштейном в 1916 г. Эта теория является одной из вершин современной физики. Так как ее идеи и терминология широко используются в космологии, мы решили описать основы ОТО, которые достаточно просты для понимания и могут быть объяснены без использования сложного математического аппарата. Мы начнем с трех классических эффектов ОТО.

1.2.1. Прецессия перигелия

Первый эффект был обнаружен астрономами еще задолго до появления ОТО. Это прецессия³ перигелия⁴ Меркурия, которая проявляется как вращение орбиты Меркурия как целого вокруг Солнца с очень малой угловой скоростью – менее 6 угловых секунд в год. Это было не первое обнаруженное отклонение от простейших законов небесной механики с момента их открытия Иоганном Кеплером. Ранее, в середине XIX в., аналогичное поведение орбиты Урана было успешно объяснено гравитационным влиянием неизвестной тогда планеты, позже получивший название Нептун.

Один из предсказателей существования Нептуна, Урбен Леверье, применил тот же подход к орбите Меркурия, предположив существование новой планеты Вулкан, которая должна быть расположена очень близко к Солнцу и скрываться на фоне его света. После этого предсказания в течение нескольких десятилетий как профессиональные астрономы, так и астрономы-любители сообщали о наблюдении прохождения этой гипотетической планеты по солнечному диску, но затем, после усовершенствования телескопов, эти сообщения были признаны ошибочными. Теперь мы знаем, что планеты Вулкан не существует, и это было известно почти наверняка еще 100 лет назад. Таким образом, вращение орбиты Меркурия надо было как-то объяснить.

ОТО не только объяснила прецессию перигелия Меркурия, но и обеспечила точное количественное согласие теории с наблюдаемой скоростью прецессии. После дальнейшего улучшения точности наблюдений была обнаружена подобная прецессия перигелия Венеры, которая вместе с другими описанными ниже эффектами подтверждает правильность ОТО. В результате Международный астрономический союз (МАС) – высший мировой авторитет в астрономии – издал постановление об обязательном рассмотрении эффектов ОТО при точных расчетах орбит небесных тел в Солнечной системе.

Еще более впечатляющее проявление прецессии, в данном случае периастра (точки орбиты, которая ближе всего к звезде), наблюдается в системах двойных пульсаров⁵. Два массивных тела в этом случае вращаются с периодом в несколько дней на небольшом расстоянии друг от друга. ОТО описывает их движение с точностью до 0,01 %, при этом

³ Прецессией перигелия называется весьма медленное вращение гелиоцентрической орбиты (орбиты вокруг Солнца) в ее плоскости.

⁴ Перигелий – точка гелиоцентрической орбиты, которая ближе всего к Солнцу.

⁵ Пульсар – сильно намагниченная вращающаяся нейтронная звезда, которая испускает пучок электромагнитного излучения в направлении, которое вращается вместе со звездой. Испущенное излучение может наблюдаться только тогда, когда луч направлен в сторону Земли и, таким образом, регистрируется в виде серии импульсов.

наблюдаются потери энергии из-за излучения гравитационных волн. За обнаружение таких систем Рассел Алан Халс и Джозеф Хотон Тейлор-младший получили Нобелевскую премию по физике за 1993 г.

1.2.2. Отклонение света

Второй эффект заключается в искривлении световых лучей в гравитационном поле массивных объектов. Это искривление само по себе не было неожиданностью и вполне объяснимо в рамках ньютоновской механики. Но предсказанный ОТО угол отклонения света был в два раза больше по сравнению с ньютоновским. Причина, по которой появился этот коэффициент, будет обсуждена ниже, в подразделе 1.3.2.

В то время явление было чисто умозрительным, но упомянутое различие углов отклонения позволяло узнать, какая из теорий правильно описывает этот эффект, и заставило астрономов измерить его величину. Для этого нужно было измерить положение звезды, свет которой распространялся вблизи Солнца и отклонялся в его гравитационном поле, смещая видимое положение звезды на небе. С современной точностью этот эффект можно измерить даже в перпендикулярном по отношению к Солнцу направлении, используя радиоинтерферометр со сверхдлинной базой (РСДБ), но в начале XX в. он мог быть измерен только на очень небольшом участке неба вокруг Солнца.

Это было сделано экспедицией сэра Артура Эддингтона, которая измерила положения звезд во время полного солнечного затмения 1919 г. Полное солнечное затмение было необходимо, так как в то время астрономы могли производить наблюдения только в видимом свете, и свет Солнца сделал бы невозможным наблюдения звезд возле его диска. Эддингтон и его коллеги проводили наблюдения в Бразилии и на западном побережье Африки. Сравнив фотографии неба вблизи Солнца во время затмения и той же области неба вдали от Солнца, они измерили угол отклонения, который соответствовал предсказанию Эйнштейна. Эти наблюдения все же были недостаточно точны, но ситуация существенно улучшилась после появления радиотелескопов.

Эффект отклонения света является основой для так называемого гравитационного линзирования, при котором наблюдаются несколько изображений одного и того же объекта. Оно активно изучается и даже используется в качестве инструмента для нестандартного наблюдения чрезвычайно удаленных объектов. Мы обсудим это в подразделе 4.2.7.

1.2.3. Гравитационное красное смещение

Третий эффект называется гравитационным красным смещением⁶ и описывает разницу в скорости течения времени в точках с различными гравитационными потенциалами⁷. Грубо говоря, время течет быстрее на верхнем этаже здания, чем в его подвале. Это и является причиной изменения частоты. Пусть источник в подвале передает, скажем, 1000 сигналов в секунду. Они ловятся приемником на крыше, но для приемника секунды имеют другую продолжительность, так что в течение своей секунды он получает не 1000, а, например, 999 сигналов. Другими словами, частота в приемнике смещается относительно частоты источника.

⁶ Красное смещение возникает при увеличении длины волны. Противоположный эффект называется синим смещением. Названия происходят от того, что красный свет имеет более длинные волны, чем синий свет, хотя оба термина применяются к любой области частот электромагнитного излучения, не обязательно видимого света.

⁷ Гравитационный потенциал – это потенциальная энергия компактного тела в гравитационном поле в пересчете на единицу его массы. Именно эта величина определяет скорость течения времени в слабых гравитационных полях.

Астрономы наблюдали гравитационное красное смещение в спектрах излучения белых карликов, в частности у Сириуса В, который приблизительно содержит массу Солнца в объеме Земли. В результате гравитационный потенциал на его поверхности значительно превосходит максимальные значения, наблюдаемые в Солнечной системе.

Этот эффект был также продемонстрирован в лабораторных условиях Робертом Паундом и Гленом Ребкой в 1959 г. Они построили свой эксперимент вокруг основополагающей идеи квантовой механики о том, что для возбуждения атома из основного состояния⁸ он должен поглотить фотон с точно такой же энергией или длиной волны, какой возбужденный атом излучает при переходе в основное состояние⁹. Если что-то (в нашем случае гравитационное красное смещение) изменит пусть даже совсем незначительно энергию или длину волны фотона, пока тот перемещается от одного атома к другому, то фотон не будет поглощаться. Тем не менее он все еще может быть поглощен, если атом-приемник движется таким образом, что изменение длины волны из-за эффекта Доплера¹⁰ компенсирует изменение длины волны из-за гравитационного красного смещения.

Итак, Паунд и Ребка положили одну железную пластину в подвале, присоединили другую к конусу громкоговорителя на крыше и измерили фазу динамика, при которой гамма-поток, создаваемый возбужденными атомами железа в подвале, сильнее всего поглощается атомами железа на крыше. Это дало им возможность вычислить изменение энергии фотона из-за разницы в гравитационном потенциале или скорости течения времени на крыше и в подвале. Их результаты соответствовали предсказанию ОТО в пределах 10 % погрешности.

Дальнейшая проверка этого эффекта была произведена в ходе эксперимента Gravity Probe A в 1976 г., когда на ракету был помещен водородный мазер, используемый в качестве чрезвычайно стабильного генератора частоты. Идентичный мазер покоился на земле. Этот эксперимент подтвердил существование и соответствие ОТО гравитационного красного смещения в пределах погрешности 0,01 %. Сегодня гравитационное красное смещение обычно учитывается, когда требуются точные измерения времени: например, при использовании GPS и других навигационных спутников. Оно также принимается во внимание астрономами при определении земного времени, времени в геоцентрической системе координат и времени в барицентрических координатах, введенных МАС в 1991 г., которые представляют собой, соответственно, время на уровне моря, в центре Земли и в барицентре¹¹ Солнечной системы.

1.2.4. Другие эффекты и проверки

Эксперимент Gravity Probe A подтвердил также еще один важный эффект ОТО – принцип эквивалентности, в соответствии с которым объект ведет себя одинаково,

⁸ Основное состояние – состояние атома с минимальной энергией. Любое другое состояние, отличное от основного, называется возбужденным.

⁹ Этому препятствует энергия отдачи атома, излучающего фотон, но в эксперименте она отсутствовала из-за использования открытого незадолго перед этими опытами эффекта Месбауэра.

¹⁰ Эффект Доплера – сдвиг частоты периодических сигналов, вызванный движением источника или приемника или их обоих и конечностью скорости распространения сигнала. Вопреки распространенному мнению это относится не только к волнам, но и к любым периодическим сигналам. Когда источник и приемник движутся по направлению друг к другу, частота, регистрируемая приемником, увеличивается, а когда они удаляются друг от друга, уменьшается.

¹¹ Барицентром называется общий центр масс гравитационно связанной системы.

независимо от того, равномерно ли он ускорен или помещен в однородное гравитационное поле.

С тех пор все предсказания ОТО были подтверждены экспериментально. Одним из наиболее широко известных предсказаний было существование черных дыр (см. раздел 6.1) – массивных компактных объектов, из которых не может вылететь ничто, даже свет. Несмотря на то что в течение достаточно долгого времени их косвенно наблюдали (например, путем отслеживания собственных движений близлежащих звезд), первое прямое наблюдение вспышки, исходящей из так называемого аккреционного диска¹², окружающего черную дыру, было проведено в июне 2015 г. (Kimura et al., 2016).

Недавним подтвержденным предсказанием стало открытие гравитационных волн с помощью детектора Advanced LIGO в сентябре 2015 г. (Аббот и др., 2016a), подтвержденное в декабре 2015 г. (Аббот и др., 2016b) и завершившееся присуждением Нобелевской премии по физике за 2017 г. Райнеру Вайссу, Барри Баришу и Кипу Торну. Естественно, что экспериментальные проверки ОТО продолжают со все более высокой точностью.

Теперь расскажем и о других принципах ОТО.

1.2.5. Выделенная система отсчета

Ньютоновская механика построена вокруг идеи инерциальной системы отсчета. Первый закон Ньютона справедлив только в таких системах. Инерциальная система связана с телом, которое не взаимодействует с остальной частью Вселенной. Возможно ли это? На любое тело можно воздействовать с помощью механических сил, таких как сила натяжения привязанной к телу веревки¹³, и четырех фундаментальных сил: электромагнитных, слабых¹⁴, сильных¹⁵ и гравитационных. Электромагнитные, слабые и сильные силы действуют лишь на некоторые из частиц, которые имеют ненулевые заряды соответствующего типа. Гравитационная сила, с другой стороны, является универсальной; она действует на все тела во Вселенной. Даже безмассовые частицы, такие как фотоны, подвержены силе гравитационного притяжения. Поэтому не ясно, каким образом можно обеспечить инерциальную систему отсчета в присутствии гравитационного поля.

ОТО тоже выделяет некоторые системы отсчета, но, в отличие от ньютоновской механики, они не должны быть подвержены действию никаких сил, кроме гравитационных. В таких системах отсчета справедливы все физические законы, в том числе законы специальной теории относительности (СТО). Чтобы ускорить тело в такой системе, на него надо воздействовать с помощью любой внешней силы, кроме силы тяжести. Другими словами, это системы, в которых наблюдатель свободно падает. Проиллюстрируем это на

¹² Аккреционным диском называется область вокруг звезды, черной дыры или другого массивного объекта, заполненная падающим вращающимся вокруг них веществом. Из-за гравитации эта материя разогревается и начинает излучать. Аккреционные диски черных дыр излучают рентгеновские лучи. Черную дыру, не имеющую аккреционного диска, невозможно увидеть в телескоп. Поэтому наблюдения явлений, связанных с этим диском, косвенно подтверждают и существование черных дыр.

¹³ Строго говоря, сила натяжения веревки представляет собой сложную комбинацию электромагнитных и сильных сил. Тем не менее объяснение этого увело бы нас в глубь квантовой механики, поэтому мы просим читателя принять это как данность.

¹⁴ Слабое взаимодействие является одним из четырех фундаментальных взаимодействий (помимо электромагнитного, гравитационного и сильного), которое работает на субатомных масштабах и отвечает за радиоактивный распад. В настоящее время рассматривается вместе с электромагнитным взаимодействием как часть более общего электрослабого взаимодействия.

¹⁵ Сильное взаимодействие отвечает за удержание частиц атомных ядер вместе. Оно действует на очень малых масштабах около 10–15 м на элементарные частицы, называемые адронами, состоящие из кварков.

двух простых примерах.

Человек спит в своей постели. Для вящей точности укажем, что кровать неподвижна относительно земли, т. е. ее географические координаты постоянны. С ньютоновской точки зрения человек находится в состоянии покоя в приблизительно инерциальной системе отсчета. Это не совсем инерциальная система, потому что этот человек вращается (вместе с его кроватью) вокруг центра Земли, вокруг Солнца (вместе с Землей), вокруг центра Млечного Пути (вместе с Солнечной системой), падает по направлению к скоплению в созвездии Дева (вместе с галактикой Млечный Путь), к Великому аттрактору (вместе со скоплением в Деве) и т. д.¹⁶ Но давайте не будем слишком придирчивы и назовем эту систему инерциальной. Человек находится под воздействием двух основных сил (и множества незначительных): гравитационного притяжения Земли, известного как вес, а также силы давления со стороны кровати из-за сил упругости. Эти силы компенсируют друг друга, в результате чего человек находится в состоянии покоя.

Рассмотрим ту же ситуацию с точки зрения ОТО. В этом случае выделенная система довольно сильно отличается: это система отсчета свободно падающего наблюдателя. Человек, который спит в постели, не пребывает в состоянии покоя в этой системе из-за силы давления со стороны кровати.

Второй случай – это космонавт на орбите вокруг Земли. С ньютоновской точки зрения его система никаким образом не выделенная, так как он находится под воздействием силы тяжести и его траектория искривлена. Это может быть описано двумя способами. В системе отсчета, связанной с Землей, гравитационная сила действует как центростремительная сила, в результате чего его траектория изгибается. В неинерциальной системе отсчета, связанной с космическим кораблем, сила тяготения компенсируется так называемой центробежной силой, что заставляет космонавта ощущать себя в состоянии невесомости.

Эта ситуация выглядит намного проще в рамках выделенной системы отсчета ОТО. На космонавта действует только сила тяжести, т. е. не действуют никакие негравитационные силы, и он, таким образом, покоится в данной системе отсчета. Космический корабль на орбите свободно падает на Землю, но постоянно промахивается из-за тангенциальной скорости¹⁷. Это основной принцип, который делает возможным полеты в космос.

Космонавт, покоясь в выделенной системе, испытывает невесомость. Тем не менее, если на него воздействовать некоторой негравитационной силой (пихнуть палкой, притянуть веревкой, дать космонавту достаточно сильный магнит и т. д.), этот космонавт будет двигаться, согласно второму закону Ньютона.

Проиллюстрируем силы, действующие в обоих подходах, на рис. 1.1 и 1.2.

¹⁶ К сожалению, в наши дни довольно трудно найти подлинный покой.

¹⁷ Тангенциальное направление является направлением в плоскости вращения, перпендикулярным радиусу. При применении к орбитальному движению это направление полета или противоположное (ретроградное).

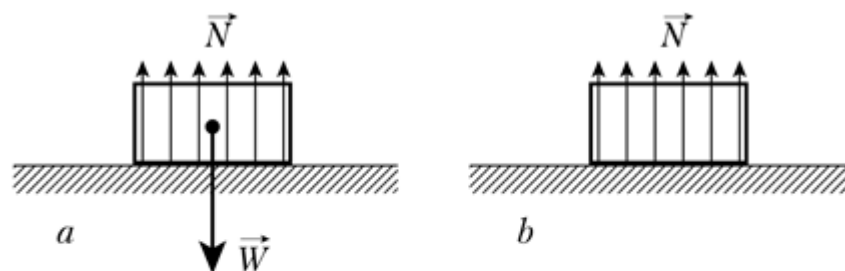


Рис. 1.1. Силы, действующие на тело, покоящееся на поверхности Земли, в ньютоновской инерциальной системе отсчета (а) и системе отсчета, выделенной в ОТО (б). Здесь N — это сила реакции опоры (она же сила давления) и W — сила тяжести (она же вес)

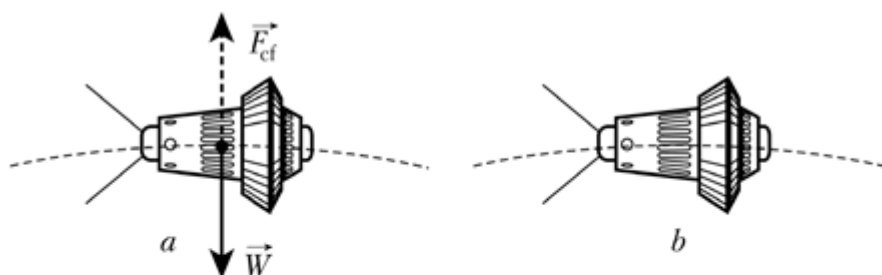


Рис. 1.2. Силы, действующие на космический корабль на орбите в ньютоновской инерциальной системе отсчета (а) и системе отсчета, выделенной в ОТО (б). Здесь W — сила тяжести, а F_{cf} — центробежная сила

1.2.6. Гравитация, инерция и приливные силы

Легко жить в мире с однородной силой тяжести. Ее просто подделать с помощью ускорения, например, ракеты или даже лифта. Внутри замкнутой ракеты или лифта никакие эксперименты не могут обнаружить различия между гравитацией и инерцией. Тем не менее этот трюк возможен только в фантастических книгах, например у Терри Пратчетта, но не в реальной жизни. В реальном мире гравитационное поле можно считать однородным лишь на очень малых масштабах, таких как ваш дом. Проблема заключается в том, что на крупных масштабах гравитационное поле Земли гораздо больше похоже на поле точечной массы, чем на однородное поле, что проявляется в виде двух эффектов: уменьшении ускорения свободного падения по мере увеличения высоты и разницы в направлениях гравитационной силы в двух разных точках на поверхности Земли. В двух диаметрально противоположных точках на Земле, например в Великобритании и в Австралии, направления гравитационных сил почти противоположны. При меньших расстояниях, например между Китаем и Японией, гравитационные силы направлены под гораздо меньшим, но все же значительным углом между ними. Второй эффект может быть имитирован с помощью расширяющейся сферической оболочки, но было бы почти невозможно имитировать различие ускорений свободного падения у пола и у потолка.

В ОТО термин «гравитация» понимается, скорее, не как притяжение к некоторым массивным телам (это обеспечивается движением выделенной системы отсчета), а как небольшие различия в направлении и величине гравитационного поля в близких точках, называемые приливными силами. Название происходит от давно известного факта, что эти силы вызывают приливы в морях и океанах Земли.

Для иллюстрации рассмотрим свободно падающий лифт – пример, придуманный самим

Эйнштейном из-за отсутствия ракет в то время – с семью почти невесомыми шарами, которые исходно неподвижны относительно лифта и друг друга. Один из шаров находится в центре масс, другой – ближе к потолку прямо над первым, третий – у пола прямо под ними, а остальные четыре – у стен на высоте первого, как показано на рис. 1.3. Мы предполагаем, что стенки лифта имеют незначительный вес и их единственное назначение – защита шаров от набегающего потока воздуха и поддержка жесткости конструкции.

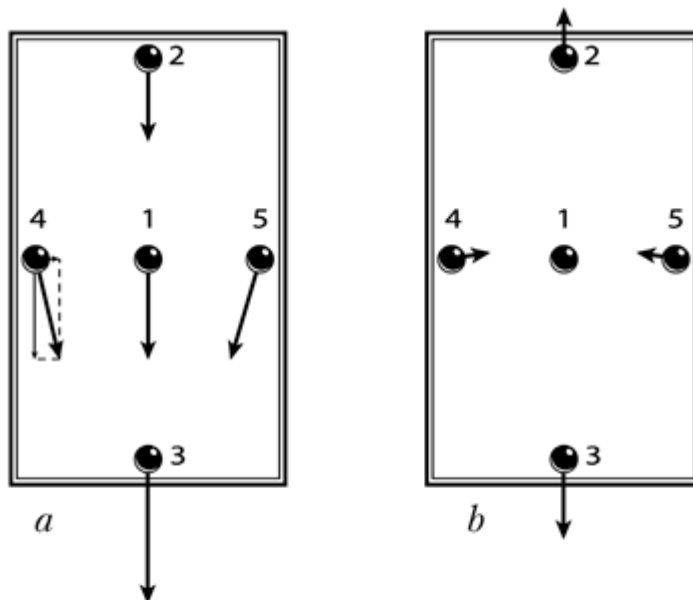


Рис. 1.3. Силы, действующие на шары в свободно падающем лифте (а) и соответствующие им приливные силы (б). Масштабы приливных сил сильно преувеличены

Каждый из шаров свободно падает вместе с лифтом, но из-за разницы в начальных положениях их движение будет несколько отличаться. Это хорошо видно в системе отсчета, привязанной к лифту. В этой системе шар 1 неподвижен; шар 2, который всегда находится в районе с немного меньшим ускорением свободного падения, дрейфует вверх; аналогичным образом шар 3 дрейфует вниз; шары от 4 до 7 имеют небольшой компонент гравитационной силы, направленной к центру¹⁸, и дрейфуют в сторону шара 1. Следует отметить, что масштаб приливных сил на рис. 1.3 в значительной степени преувеличен.

Если мы теперь добавим взаимное гравитационное притяжение между шарами в лифте, мы получаем модель приливных сил на Земле. На самом деле приливы на Земле вызваны притяжением Луны и Солнца, но для простоты мы будем рассматривать только лунные приливы и отливы. Приливы будут происходить, когда наблюдатель, Луна и центр Земли находятся на одной прямой, а отливы – когда направления на наблюдателя и Луну из центра Земли будут перпендикулярны.

Приливные силы могут быть довольно сильными и играть важную роль в астрономии. Например, в 1992 г. комета Шумейкера – Леви 9 была разорвана приливными силами в гравитационном поле Юпитера. Другим примером могут служить Магеллановы Облака – два спутника нашей Галактики, которые деформированы ее приливными силами. Особенно сильные приливные силы встречаются в непосредственной близости от компактных объектов, таких как нейтронные звезды или черные дыры (см. раздел 6.1).

С ньютоновской точки зрения падающий лифт – это неинерциальная система отсчета с

¹⁸ По этой же причине отвес, висящий возле стенки, будет слегка отклонен по сравнению с отвесом в центре.

однородным полем сил инерции, точно компенсирующих силы притяжения в центре масс. Однако во всех других местах этот баланс нарушается и образуется суммарное поле приливных сил, показанное на рис. 1.3. Эти силы заменяют силы тяжести в космическом корабле на орбите¹⁹. По этой причине ученые и инженеры, связанные с космосом, используют термин «микрोगравитация» вместо невесомости.

1.2.7. Лунные приливы и отливы

Для объяснения лунных приливов на Земле в рамках ньютоновского подхода мы рассмотрим сначала гравитационное поле неподвижной Луны. Рассматривая ее как точечную массу, мы видим, что силовые линии ее гравитационного поля, т. е. направления ускорения свободного падения на Луну, радиальные. Таким образом, суммарная сила, действующая на любую частицу на Земле, является суммой притяжения к остальной части Земли и силы, действующей в направлении Луны (мы не рассматриваем другие небесные тела, чтобы избежать путаницы). Для перехода к системе отсчета, связанной с Землей, мы должны вычесть ускорение свободного падения в центре масс Земли из ускорения свободного падения, действующего на каждую точку, как показано на рис. 1.4. В результате мы получаем знакомую картину: приливы в направлении к и от Луны и отливы в перпендикулярных направлениях.

Таким образом, с ньютоновской точки зрения приливная сила – это просто разница ускорений свободного падения между произвольной точкой и некоторой опорной точкой, например центром Земли. С релятивистской точки зрения приливная сила – это то, что отличает гравитацию от сил инерции, вызванных, например, ускорением ракеты.

Переходя в систему свободно падающего наблюдателя, вы можете обнулить силу, действующую в одной точке, как правило, в центре масс, но в любой другой точке имеется ненулевая разность – приливная сила. В ОТО приливные силы являются проявлением кривизны пространства-времени.

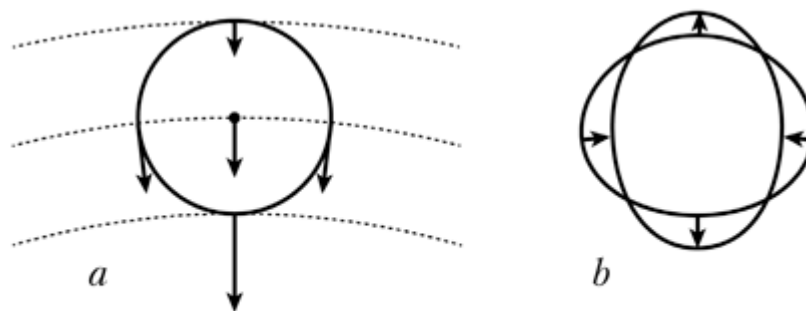


Рис. 1.4. Лунные приливы и отливы на Земле в ньютоновской (а) и релятивистской (b) системах отсчета

Вопрос: Почему приливы, вызванные небольшой Луной, сильнее, чем приливы, вызванные огромным Солнцем?

Ответ: Формулу для приливной силы можно найти в учебниках, она утверждает, что эта сила обратно пропорциональна кубу расстояния. Тем не менее, вместо того чтобы просто использовать эту формулу, покажем, как эта зависимость от расстояния может быть получена с помощью простой аналогии.

Рассмотрим два точечных тела единичной массы – одно в центре Земли, а другое на поверхности Земли. Приливная сила во второй точке может зависеть только от трех параметров: от расстояния между двумя точками, в которых находятся тела, от

¹⁹ В реальном космическом корабле есть много других сил, действие которых гораздо существенней.

расстояния до Луны, а также от угла между направлением на Луну и линией, соединяющей эти точки. Эта приливная сила, равная разности сил, действующих на две точечные массы, равна также сумме сил, действующих на второе тело и на первое тело, если вторая взята с противоположным знаком.

Воспользуемся электростатической аналогией и заменим эти тела точечными единичными зарядами, а Луну – внешним точечным зарядом, величина которого выбирается таким образом, что силы, действующие на точечные заряды, идентичны гравитационным силам, действующим на точечные массы²⁰. Обратим знак центрального заряда (именно поэтому нам понадобилось переключиться на электрическое поле, так как не существует такого понятия, как отрицательная масса). Теперь на заряд в центре Земли действует сила той же величины, но в противоположном направлении. Эти два противоположных заряда образуют диполь, причем его размеры существенно меньше расстояния до Луны.

Сила, с которой точечный заряд, которым мы заменили Луну, взаимодействует с нашим электрическим диполем, равна искомой приливной силе. Согласно третьему закону Ньютона, она равна также силе, с которой диполь действует на точечный заряд в центре Луны. Поле диполя убывает обратно пропорционально кубу расстояния, поэтому поле приливных сил должно убывать по тому же закону. Возвращаясь к гравитации, мы наконец-то получаем, что приливные силы падают обратно пропорционально кубу расстояния до тела, вызывающего приливы, и пропорциональны его массе.

Теперь сделаем некоторые простые расчеты. Солнце весит $2,0 \times 10^{30}$ кг и расположено на расстоянии $1,5 \times 10^8$ км. Луна весит $7,3 \times 10^{22}$ кг и находится на расстоянии $3,8 \times 10^5$ км. Таким образом, Солнце в $2,7 \times 10^7$ раз тяжелее и в 395 раз дальше, чем Луна. Если возвести отношение расстояний в куб, мы получаем $6,2 \times 10^7$, что в 2,2 раза больше, чем отношение масс. Таким образом, лунные приливы в 2,2 раза сильнее солнечных приливов.

Однако, если нас интересует отношение гравитационных сил, мы должны использовать отношение квадратов расстояний, которое в 176 раз меньше, чем отношение масс, и Солнце легко выигрывает это соревнование. Если мы интересуемся вкладом в гравитационный потенциал, обратно пропорциональный расстоянию, то вклад от галактик в скоплении Девы, расположенных на расстоянии около 54 млн световых лет (св. лет) от Земли, будет существенно большим, чем вклад как Солнца, так и Луны.

1.2.8. Пространство, время и пространство-время

Что такое пространство-время? Начнем с пространства. Наше пространство трехмерно. Это означает, что мы можем двигаться вперед или назад, вправо-влево, вверх или вниз, т. е. изменить наше местоположение, описываемое тремя пространственными координатами. Каждый физический процесс происходит в этих трех координатах и во времени. В ОТО время считается четвертой координатой в дополнение к трем пространственным. Вместе они образуют четырехмерное пространство-время.

Тем не менее время имеет одно важное отличие по сравнению с пространством: мы можем сознательно выбрать, как двигаться в пространстве, но мы не можем повлиять на наше движение во времени. Мы обречены двигаться во времени из прошлого в будущее со скоростью вне нашего контроля, если только не будем двигаться со скоростью, близкой к скорости света. Если мы будем двигаться очень быстро, мы можем немного усложнить ситуацию за счет релятивистского замедления времени, но нам все равно придется двигаться вдоль оси времени по направлению к будущему. По этой причине, даже когда мы объединяем пространственные и временные измерения в единое пространство-время, мы не воспринимаем их как равные и по-прежнему относимся ко времени особым образом.

²⁰ Это возможно потому, что обе эти силы падают как квадрат расстояния.

Чем хороша концепция пространства-времени? Когда мы рассматриваем траекторию тела в пространстве, это не дает нам ни малейшего представления о скорости, ускорении и других кинематических свойствах движения, за исключением того, что тело когда-то находилось в каждой точке его траектории. Когда мы переходим к пространству-времени, траектория тела говорит нам не только о его местонахождении, но и о том, когда и как долго тело находилось в каждой точке своего пути. Это дает нам полное описание его кинематики на протяжении рассматриваемого периода времени. Такая траектория в пространстве-времени называется мировой линией тела.

Любая мировая линия реального тела имеет одно фундаментальное ограничение: скорость этого тела, определяемая его мировой линией, не может быть больше, чем скорость света в вакууме. Согласно СТО, только безмассовые частицы могут (и должны) путешествовать со скоростью света. На сегодняшний день известны только две такие частицы: фотон и глюон, которые являются калибровочными бозонами²¹ электромагнитных и сильных сил соответственно. Из них только фотоны наблюдаются непосредственно, поскольку глюоны заключены внутри адронов²² и не могут существовать отдельно. Некоторые теоретики предполагают, что возможно существование особого класса частиц, называемых тахионами, которые всегда движутся быстрее скорости света, однако все попытки обнаружить их пока не увенчались успехом.

Для иллюстрации свойств пространства-времени космологи используют концепцию светового конуса. Он показывает мировые линии фотонов, излучаемых или наблюдаемых в данной точке в данный момент времени. Два различных конуса называются, соответственно, световыми конусами будущего и прошлого. Чтобы обеспечить двумерность рисунка, два пространственных измерения, как правило, отбрасываются, делая его похожим на рис. 1.5, на котором изображен простейший случай плоского пространства-времени, которое также называют пространством-временем Минковского. В нем нет гравитации, пространство не искривлено и работают все законы и формулы СТО. Область внутри светового конуса будущего называется абсолютным будущим, область внутри светового конуса прошлого – абсолютным прошлым, а область вне этих двух световых конусов называется внешней областью. В отсутствие гравитации в пространстве Минковского не возникает проблем с определением инерциальной системы отсчета, которая вдобавок совпадает с релятивистской.

Для любой заданной точки в области абсолютного будущего можно найти такую инерциальную систему отсчета, в которой эта точка находится на том же месте в пространстве, что и исходная, но событие, соответствующее этой точке, происходит позже. Подобную систему отсчета можно найти и для точки в абсолютном прошлом, но с противоположной последовательностью событий. В этих случаях говорят, что интервал – четырехмерная аналогия расстояния – между наблюдателем и любой из этих точек времениподобный.

Для любой точки из внешней области, лежащей вне светового конуса, можно найти такую инерциальную систему отсчета, в которой оба события, соответствующие этой точке и вершине конуса, происходят одновременно, но в разных местах. Такой интервал между

²¹ Калибровочный бозон – это элементарная частица, которая действует как носитель любого из фундаментальных взаимодействий. Бозон – элементарная частица с угловым моментом, равным целому числу приведенных постоянных Планка \hbar . Любое число таких частиц может находиться в одном и том же квантовом состоянии одновременно. Другая возможность заключается в том, что угловой момент частицы равен полуцелому числу приведенных постоянных Планка, т. е. $1/2 \hbar$, $3/2 \hbar$ и т. д. Такие частицы называются фермионами, и не более одной такой частицы может одновременно находиться в каком-то определенном квантовом состоянии.

²² Адрон – массивная составная элементарная частица, участвующая в сильном взаимодействии. Адроны включают барионы (протоны, нейтроны и более тяжелые частицы, испытывающие ядерные силы) и мезоны, см. сноску 66.

событиями называется пространственноподобным. Наконец, если точка находится точно на краю светового конуса, невозможно найти такую инерциальную систему отсчета, в которой события происходят в одном месте или в одно время, но существует фотон, который последовательно проходит обе эти точки. В этом случае интервал между ними называется светоподобным.



Рис. 1.5. Световой конус в плоском пространстве-времени Минковского

Понятие светового конуса непосредственно связано с принципом причинности, который играет ключевую роль в физике. Идея принципа причинности в том, что любое событие может повлиять на события в будущем, но не в прошлом. Специальная теория относительности добавляет, что энергия или информация не может распространяться быстрее, чем свет в вакууме. Сочетая эти две идеи, мы получаем очень важную интерпретацию светового конуса: событие, соответствующее его вершине, может повлиять только на события внутри верхнего конуса, т. е. на абсолютное будущее, и на него могут влиять только события внутри нижнего конуса, лежащие в области абсолютного прошлого. События вне конуса совершенно независимы от события в его вершине и наоборот, хотя они оба могут быть вызваны одной и той же причиной в области абсолютного прошлого. Мировая линия тела всегда лежит в пределах светового конуса, построенного для любой своей точки.

Важно помнить о том, что скорость света в вакууме всегда одинакова независимо от скорости тела. По этой причине световой конус тоже не зависит от скорости движения тела и его ускорения.

1.2.9. Искривленное пространство-время

Наиболее искушенные читатели должны в этом месте ожидать какого-то подвоха со всеми этими пространственно-временными вопросами уже потому, что все пока выглядит слишком просто. И действительно, предчувствия их не обманули. Дело в том, что пространство-время еще и искривлено, кроме простейшего случая плоского пространства-времени Минковского. Это немного усложняет анализ динамики пространства-времени и его содержимого (иногда этот подход называют геометродинамикой) для случая сложных гравитационных полей. Локальная форма пространства-времени определяется так называемой метрикой, которая связывает интервал

между двумя очень близкими точками с их четырехмерными координатами. Любое свойство пространства-времени может быть получено из его метрики.

Все пространства-времена, с которыми мы имеем дело в этой книге, описываются их метриками, и все эти метрики были названы в честь их открывателей. Они включают в себя: метрику Минковского (плоское пространство), метрику Фридмана – Леметра – Робертсона – Уокера (расширяющаяся однородная и изотропная Вселенная, заполненная пылевидной материей, раздел 2.4), метрику де Ситтера (очень быстро расширяющаяся Вселенная без материи, но с космологической постоянной, раздел А.1) и метрики Шварцшильда, Райсснера – Нордстрёма, Керра и Керра – Ньюмена (различные виды черных дыр, раздел 6.1). Однако их формальное описание существенно выходит за рамки этой книги.

Световой конус в искривленном пространстве-времени может быть гораздо более сложным, чем в плоском пространстве-времени. Например, гравитационное линзирование обеспечивает существование нескольких изображений одного и того же объекта. Это означает, что фотоны, испускаемые этим объектом, движутся к нам по различным траекториям (им также требуется различное время для каждого пути). А для экзотических объектов вроде черных дыр ситуация становится еще запутаннее. Вот почему в сложных случаях часто используют световые конусы, чтобы проиллюстрировать геометрические свойства пространства-времени.

Искривление пространства-времени понять легче, если отбросить одно пространственное измерение. Тогда пространство-время можно представить в виде эластичной пленки, на которой лежат различные предметы, прогибая и деформируя ее. Пленка искривляется, и прогиб, вызванный одними тяжелыми предметами, влияет на движение других предметов, положенных на пленку. Изменение высоты этой пленки соответствует изменению гравитационного потенциала, наклон поверхности демонстрирует ускорение свободного падения, и его локальная кривизна связана с приливными силами. Эта очень наглядная аналогия была придумана Эйнштейном. В интернете есть довольно много видеоматериалов, демонстрирующих ее.

В заключение раздела заметим, что ОТО не только дает некоторые количественные поправки к ньютоновской физике, но и предсказывает совершенно новые эффекты и объекты, такие как гравитационные волны или черные дыры.

1.3. Сколько весит свет?

ОТО лежит в основе математического формализма в космологии. Тем не менее при рассмотрении космологических проблем следует учитывать свойства среды, заполняющей Вселенную. Наши представления о содержимом Вселенной существенно изменились со времени жизни Эйнштейна. Сто лет назад физики знали только о существовании обычной материи, из которой состоят звезды, планеты и другие привычные объекты вроде наших тел, и об электромагнитном излучении. Сегодня обычная материя называется барионной материей, и, как полагают, на нее приходится около 5 % содержимого Вселенной. На электромагнитное излучение приходится гораздо меньше 1 %.

Остальные 95 % состоят из двух или трех других видов материи. Темная материя и темная энергия, которые мы обсудим соответственно в главе 4 и главе 5, являются действительно новыми типами, хотя темную энергию можно назвать материей только весьма условно. Третьим типом материи является нейтрино²³. Эти типы материи отличаются друг от друга своими уравнениями состояния, т. е. соотношением между плотностью массы ρ и

²³ Нейтрино — очень легкая элементарная частица, которая участвует только в гравитационных и слабых взаимодействиях. Известно три вида нейтрино: электронное нейтрино (ν_e), мю-нейтрино (ν_μ) и тау-нейтрино (ν_τ), каждое из которых имеет соответствующее антинейтрино.

давлением p . Плотность массы связана с плотностью энергии ϵ простым соотношением $\epsilon = \rho c^2$, которое получается путем применения хорошо известного соотношения $E = mc^2$ к единице объема. Хотя уравнение состояния может иметь любую форму, мы рассмотрим только его простейший вид $p = w\epsilon = w\rho c^2$, где w – безразмерная константа.

Следует отметить, что плотность энергии включает энергию покоя, которая очень велика из-за коэффициента c^2 . Насколько велика? Переформулируем этот вопрос: если бы мы рассматривали обычный воздух, то какое давление он бы имел при значении $w = 1$? При стандартных условиях воздух имеет плотность $1,23 \text{ кг/м}^3$. Умноженная на квадрат скорости света, она дает плотность энергии около 1017 Дж/м^3 , что соответствует давлению 1017 Па . Таким образом, мы должны были бы сжать воздух до 10^{12} атмосфер²⁴, чтобы сделать его уравнение состояния похожим на уравнение с параметром $w = 1$. Такое давление в пределах Солнечной системы встречается только в центре Солнца, но плотность вещества там также значительно выше, около $1,6 \times 10^5 \text{ кг/м}^3$. Таким образом, можно смело положить $w = 0$ для обычной барионной материи. Такой вид материи в космологии называется холодной или пылевидной материей.

С точки зрения ОТО уравнение состояния материи среди прочего определяет и то, как она участвует в гравитационном взаимодействии. В этом ОТО отличается от классической гравитации Ньютона, в которой давление не влияет на силу гравитационного взаимодействия. Определим теперь, как различные типы материи взаимодействуют гравитационно.

1.3.1. Барионная материя

Для барионной материи это было сделано в конце XVIII в. Генри Кавендишем. Результаты его эксперимента были опубликованы в 1798 г. в «Философских трудах Королевского общества» в Лондоне, ведущем научном журнале того времени, и считаются важной вехой в истории физики. Цель эксперимента состояла в том, чтобы определить среднюю плотность Земли, что непосредственно переводится в задачу оценки гравитационной постоянной. Кавендиш измерял силу гравитационного взаимодействия между двумя парами свинцовых шаров, при этом изменялись как массы шаров, так и расстояния между ними. Его экспериментальная установка использовала новое хитроумное изобретение того времени – крутильные весы. Та же идея была использована несколько лет спустя Шарлем Огюстеном де Кулоном для измерения силы электростатического взаимодействия. Однако Кавендиш решал гораздо более сложную задачу в связи с существенно более слабой силой гравитационного взаимодействия. Ему удалось измерить силы на уровне 10^{-7} Н , что для того времени было беспримерным достижением. Оценка гравитационной постоянной, полученная Кавендишем, отличается от современной лишь на 1 %, а точность измерения была улучшена лишь столетие спустя. Он также подтвердил экспериментально закон всемирного тяготения Ньютона.

Но это подтверждение работает только для обычной барионной материи в привычных нам условиях, т. е. в случае, когда гравитационные поля являются слабыми, а скорости тел намного меньше скорости света в вакууме. Физики изучали законы ОТО и вычислили величину силы гравитационного взаимодействия в случае слабого гравитационного поля (гравитационное поле на поверхности Солнца считается слабым). Она немного отличается от той, которая следует из закона всемирного тяготения Ньютона. Разница заключается в том, что мы должны заменить массу притягивающего тела m выражением $m + 3pV/c^2$, или,

²⁴ Это значение сильно недооценено, так как сжатый воздух имеет более высокую плотность, поэтому уравнение состояния $w = 1$ будет выполняться при давлении воздуха, в 10^{12} раз превышающим плотность. Этого невозможно достичь для воздуха в газообразном состоянии.

другими словами, ввести дополнительный множитель $1 + 3w$ в выражение для силы притяжения тел. Эта замена известна как ньютоновский предел ОТО.

В реальном эксперименте Кавендиш измерял силу притяжения свинцовых шаров (которые, как мы уже знаем, имеют параметр $w = 0$), но нет никаких причин, почему мы не можем проделать подобный мысленный эксперимент с другими типами материи. Для начала заменим один из шаров на сосуд, заполненный воздухом при обычных условиях. Сосуд этот невесом и нужен только для удержания газа. В этом случае мы получаем силу притяжения, которая будет сильнее примерно в $(1+3 \times 10^{-12})$ раз по сравнению с притяжением двух свинцовых шаров из-за ненулевого, но очень малого значения w . Если бы мы использовали вместо воздуха немного вещества из солнечного ядра, мы получили бы усиление притяжения примерно на семь миллионных долей.

1.3.2. Излучение

Наибольшее увеличение притяжения было бы достигнуто в опытах с сосудом, наполненным светом или другим электромагнитным излучением, которое имеет максимально возможное значения w , равное $1/3$. Идея давления света была предложена Иоганном Кеплером еще в 1619 г. Соотношение между плотностью энергии и давлением света было теоретически определено Джеймсом Максвеллом в 1862 г. и подтверждено в 1899 г. в опытах Петра Лебедева по измерению давления света, которые стали окончательным экспериментальным доказательством справедливости уравнений Максвелла. Сила притяжения в этом случае была бы вдвое сильнее, чем для барионной материи, из-за множителя $(1 + 3 \times 1/3 = 2)$ – вот откуда берется множитель 2 в формуле для угла отклонения света в ОТО²⁵.

1.3.3. Темная энергия и антигравитация

Но кто сказал, что давление должно быть положительным? По определению, давление – это сила на единицу площади поверхности. Положительное давление означает, что эта сила действует наружу, а отрицательное – что она действует внутрь. Следует отметить, что ситуация, когда внешнее давление сжимает сосуд, не считается отрицательным давлением. Отрицательное давление встречается и в обычных условиях, например вследствие закона Бернулли, когда жидкость протекает через трубу с высокой скоростью (это главная причина, по которой самолет может летать) или когда вращается капилляр, заполненный жидкостью. Тем не менее во всех этих ситуациях отрицательные давления небольшие, исчезающе малые по сравнению с величиной ρc^2 . В современной космологии мы имеем дело со средами, в которых отрицательное давление сравнимо с ρc^2 .

Когда газ с положительным давлением расширяется в цилиндре с поршнем, он выполняет работу и теряет энергию. Благодаря первому закону термодинамики его плотность падает. Когда мы помещаем среду с отрицательным давлением в цилиндр с поршнем, она, расширяясь, получает энергию, и ее плотность может как уменьшаться, так и увеличиваться.

В следующей главе мы вводим так называемую космологическую постоянную, предложенную Эйнштейном. Она может рассматриваться как среда с плотностью энергии и давлением, сохраняющими свою величину при космологическом расширении. Давление отрицательно и соответствует уравнению состояния $w = -1$. Это именно тот тип среды, о котором мы говорили: она обладает отрицательным давлением и, следовательно, получает энергию при расширении Вселенной. Общий баланс энергии приводит к тому, что плотность

²⁵ Понятно, что эти соображения не более чем намек, но строгие расчеты в рамках ОТО дают такой же коэффициент.

энергии не меняется при расширении. Но нет уверенности в том, что мы имеем дело именно с космологической постоянной, а не с какой-то средой с близкими свойствами, в которой баланс энергии все-таки нарушается. Если среда при расширении приобретет немного меньше энергии, ее плотность будет уменьшаться, а если она получит больше энергии, то ее плотность будет возрастать. Это обобщение идеи космологической постоянной называется темной энергией, и она будет обсуждаться в главе 5.

Поставим сосуд с темной энергией в прибор Кавендиша (в нашем воображении, естественно). Мы будем наблюдать антигравитацию, т. е. гравитационное отталкивание. Это не какой-то трюк из-за архимедовой силы в воздухе; прибор работает в чистом вакууме. Причина заключается в том, что сумма $\rho c^2 + 3p$ становится отрицательной, как и сила притяжения. Это происходит для сред с отрицательным давлением, причем таким, что в уравнении состояния параметр $w \leq -1/3$. Для космологической постоянной $w = -1$ и антигравитация весьма заметна.

Согласно современным представлениям, темная энергия с уравнением состояния, очень близким к уравнению состояния для космологической постоянной, составляет большую часть состава Вселенной – около 69%. Именно гравитационное отталкивание, или антигравитация, вызванное темной энергией, обеспечивает наблюдаемое ускоренное расширение Вселенной.

До сих пор мы рассматривали гравитационное взаимодействие между барионной материей, представленной свинцовыми шарами, и различными экзотическими видами материи. Но нет никаких причин, почему мы не могли бы рассмотреть взаимодействие между двумя экзотическими видами материи. Согласно третьему закону Ньютона, сила, действующая на экзотическую материю при гравитационном взаимодействии с барионной материей, в точности равна силе, действующей на барионную материю при гравитационном взаимодействии с экзотической материей. Используя этот факт и приведенное выше уравнение состояния, можно рассчитать гравитационные силы между любыми двумя типами материи. Мы оставляем эти расчеты для читателей в качестве упражнения.

Глава 2 **Расширяющаяся Вселенная**

2.1. Статическая Вселенная Эйнштейна

Итак, с помощью ОТО Эйнштейну удалось объяснить ряд известных астрономических фактов: например, прецессию перигелия Меркурия, которую нельзя было объяснить в рамках ньютоновской механики. Кроме того, он сделал предсказание об искривлении лучей света в гравитационном поле массивных тел, которое было блестяще подтверждено наблюдениями положений звезд во время полного солнечного затмения 1919 г., которые проводила экспедиция Артура Эддингтона.

Но Эйнштейн не ограничился применением своей теории к эффектам на масштабах Солнечной системы. Впервые в истории науки он попытался применить законы физики ко всей Вселенной сразу. Хотя статья, написанная им в 1917 г., была посвящена применению ко Вселенной уравнений ОТО, в ней в качестве иллюстрации рассматривается также и ньютоновская гравитация. При этом Эйнштейн рассматривал Вселенную, равномерно заполненную материей.

Первый же результат, полученный Эйнштейном, состоял в том, что под действием взаимного притяжения материя, заполняющая Вселенную, должна собраться вместе. Но так как Вселенная, рассмотренная Эйнштейном, была бесконечной, это выразалось не в уменьшении заполненной материей части, а в увеличении плотности в каждой точке Вселенной. Поскольку Эйнштейн, как и любой ученый начала XX в., был уверен в том, что

Вселенная статична, т. е. не меняется со временем, ему нужна было найти силу отталкивания, которая компенсировала бы силу гравитационного притяжения.

Эту силу Эйнштейн ввел искусственно, добавив в полученные им уравнения ОТО дополнительное слагаемое, содержащее космологическую постоянную. Сам Эйнштейн обозначил ее λ , а сейчас ее принято обозначать Λ , поэтому соответствующее слагаемое в уравнении Эйнштейна называется лямбда-членом. Космологическая постоянная была предложена Эйнштейном, не опираясь на эмпирические факты, только как следствие гипотезы о том, что Вселенная должна быть статической. Космологическая постоянная обеспечивала вдобавок к ньютоновскому притяжению некую силу отталкивания между любыми телами во Вселенной. При определенной плотности материи эти силы взаимно компенсировались, что и обеспечивало статичность Вселенной. Гипотеза статической Вселенной была отброшена уже через несколько лет, но она важна тем, что дала начало новой науке – космологии.

Однако очень быстро было показано, что статическая Вселенная Эйнштейна является неустойчивой. Области с большей плотностью начинают притягивать к себе окружающую материю, тем самым еще более увеличивая свою плотность, а области с пониженной плотностью становились еще более разреженными. Это – одно из проявлений так называемой гравитационной неустойчивости. Кроме того, вся статическая Вселенная в целом тоже неустойчива. Если ее размеры чуть увеличатся, то силы отталкивания станут сильнее сил притяжения и Вселенная начнет расширяться до бесконечных размеров. Если размеры чуть уменьшатся, то притяжение станет сильнее отталкивания и Вселенная начнет сжиматься, в конце концов коллапсируя в точку. Это обстоятельство привело к тому, что Эйнштейн потерял интерес к этому решению.

2.2. Расширение Вселенной и красное смещение

2.2.1. Другие галактики и их разбегание

Поначалу космология не вызывала большого интереса в научном сообществе, так как ее выводы было невозможно проверить. Однако ситуация изменилась после того, как в 1923 г. Эдвин Хаббл установил, что туманность Андромеды находится за пределами нашей Галактики, и вскоре после этого она была классифицирована как отдельная галактика. Таким образом, наша Галактика оказалась лишь одной из многочисленных галактик²⁶. К 1929 г. было открыто уже большое количество галактик, и для некоторых из них удалось измерить лучевые скорости²⁷ и расстояния до них. Результаты очень удивили астрономов, поскольку из них следовало, что большинство галактик удаляются от нас с очень большой скоростью. На основании данных о 24 галактиках Хаббл в 1929 г. получил свой знаменитый закон²⁸,

²⁶ Напомним, что слово «галактика» пишется с большой буквы, только когда речь идет о нашей Галактике, которую также называют Млечный Путь, и с маленькой во всех остальных случаях.

²⁷ Лучевая или радиальная скорость объекта является проекцией вектора его скорости на луч зрения — линию, соединяющую этот объект и наблюдателя.

²⁸ В 2011 г. в средствах массовой информации широко освещалось предположение о том, что закон Хаббла был впервые получен Леметром в 1927 г. и опубликован на французском языке в малоизвестном журнале. При этом Леметр определил постоянную Хаббла. Английский перевод был опубликован в 1931 г. в известном журнале *Monthly Notices of Royal Astronomical Society*. Но при этом в переводе отсутствовали две страницы, содержащие этот результат. Некоторые историки науки дошли до того, что обвинили Хаббла в плагиате. Их коллеги выступили с противоположными утверждениями. Поскольку в средствах массовой информации была отражена только первая точка зрения, мы считаем справедливым привести обе точки зрения, чтобы читатель мог самостоятельно сделать выводы. Исторически первой появилась работа Вея и Нуссбаумера (<http://arxiv.org/abs/1104.3031>) о первенстве Леметра. Затем появился препринт Блока

согласно которому скорость разбегания галактик v пропорциональна расстоянию r до них.

Математически он выражается формулой:

$$v = Hr. \quad (2.1)$$

Коэффициент пропорциональности H получил название постоянной Хаббла.

Как следует из ОТО, величина H меняется со временем, но очень медленно – масштаб времени его изменения сравним с возрастом Вселенной, который сейчас оценивается в 13,8 млрд лет. Это часто приводит к путанице, поскольку значение переменной H исторически называется постоянной Хаббла. Значение этой величины, в настоящее время H_0 , называется параметром Хаббла. Эта величина обычно измеряется в километрах в секунду на мегапарсек²⁹ (обозначение (км/с)/Мпк).

Параметр Хаббла является одним из наиболее важных космологических параметров. Он необходим при определении расстояний до удаленных объектов (подробнее об этом далее в разделе 2.9), он напрямую связан с возрастом Вселенной и используется для вычисления многих других космологических параметров, таких как плотность вещества. Таким образом, улучшение точности его измерения улучшает также точность определения космологических параметров и, следовательно, ведет к лучшему пониманию свойств Вселенной.

Приведем последние оценки параметра Хаббла, основанные на данных: космического аппарата «Планк» (2013 г.): $H_0 = (67,80 \pm 0,77)$ (км/с)/Мпк, Слоуновского цифрового обзора неба (2016 г.): $H_0 = (67,6 \pm 0,7)$ (км/с)/Мпк и космического телескопа «Хаббл» (2016 г.): $H_0 = (73,00 \pm 1,75)$ (км/с)/Мпк. Эти три оценки различны, они обеспечиваются различными методами и поэтому полностью независимы друг от друга. Некоторые из них могут быть неточными из-за неучтенных систематических ошибок.

2.2.2. Расширение

Разбегание галактик и закон Хаббла означают, что Вселенная расширяется. Как это понимать? Как можно представить себе расширение Вселенной в однородном мире без фиксированного центра? Рассмотрим в качестве примера модель двумерной Вселенной, сделанную из эластичной пленки, с галактиками, прикрепленными к ней. Эта пленка растягивается, увеличивая расстояние между галактиками. Это и будет расширением Вселенной. Обратите внимание, что сами галактики не расширяются вместе с пленкой, потому что на галактическом масштабе доминирует взаимное гравитационное притяжение. Другими словами, нехаббловские движения, т. е. местные мелкомасштабные движения, сильнее глобального хаббловского расширения на космологических масштабах. В результате ближайшие галактики не удаляются друг от друга, но движутся в общей потенциальной яме.

В нашей гравитационной яме находятся галактики Местной группы, которые включают в себя Млечный Путь, галактику Андромеды, галактику Треугольник, оба Магелланова Облака, а также около сотни карликовых галактик. Эти отклонения от общего расширения являются результатом отклонений от однородности Вселенной: средняя плотность материи внутри Местной группы больше, чем в соседних областях Вселенной. Естественно, что нехаббловские движения и отклонения плотности не могут быть описаны в рамках

(<http://arxiv.org/abs/1106.3928>) с обвинениями Хаббла в плагиате в этом и других случаях. Именно на основе этого препринта и появились сообщения в средствах массовой информации. Но они были оспорены другими историками науки (<http://arxiv.org/abs/1107.0442>). Оригинальная статья Хаббла доступна на <http://www.pnas.org/content/15/3/168.full.pdf+html>.

²⁹ Парсек (параллакс-секунда) — широко используемая в астрономии единица измерения расстояния, равная расстоянию, с которого орбита Земли вокруг Солнца видна под углом 1 секунда дуги. Парсек выражается через астрономическую единицу (среднее расстояние между Землей и Солнцем, обозначается а.е.) и связан с другими единицами расстояния следующими соотношениями: 1 пк $\approx 206,26 \times 10^3$ а.е. $\approx 3,26156$ св. лет $= 30,857 \times 10^{15}$ м.

однородной космологии и требуют специального рассмотрения. Но в более крупных масштабах Вселенная довольно однородна и мы можем использовать закон Хаббла и другие выводы, полученные в рамках однородной изотропной космологической модели.

Если пример с двумерной пленкой недостаточно нагляден для вас, можно привести и трехмерные аналоги. Обычно говорят про пудинг или пирог, который увеличивает свои размеры по мере выпекания. Внутри него есть отдельные кусочки начинки, например изюминки или орехи, которые в процессе выпекания удаляются друг от друга, но сохраняют свои размеры. Они играют роль групп и скоплений галактик, а также отдельных изолированных галактик.

Расширение означает увеличение пространственного масштаба Вселенной со временем. Мы пишем «пространственный масштаб», а не «размер Вселенной», поскольку последний термин плохо определен, если Вселенная бесконечна. Для количественной оценки пространственного масштаба вводят так называемый масштабный фактор, который обозначается a . Мы более строго определим его в разделе 2.6.

В действительно однородной Вселенной нет нехаббловских движений, и все расстояния между любыми двумя конкретными точками, привязанными к материи, заполняющей Вселенную, пропорциональны друг другу и растут с той же относительной скоростью. Иными словами, при рассмотрении расстояния между двумя удаленными объектами изменение масштабного фактора описывает, как это расстояние меняется с течением времени.

Постоянная Хаббла может быть выражена через скорость изменения масштабного фактора как относительная скорость этого изменения: $H = (da/dt)/a$, т. е. абсолютная скорость его изменения, деленная на его величину, измеренную в ту же эпоху. Таким образом, важно не столько значение масштабного фактора a , сколько отношение его величин в различные эпохи, которое мы будем называть относительным масштабным фактором и обозначать u . Из практических соображений в качестве знаменателя этого отношения используется масштабный фактор в современную эпоху: $u = a/a_0$, где a_0 – текущее значение масштабного фактора.

Так что все, что нам нужно, чтобы вычислить постоянную Хаббла в зависимости от времени, – это отношение расстояния между любыми достаточно удаленными объектами (которые гравитационно не связаны друг с другом) в разные эпохи к его значению в современную эпоху. Таким образом, эта постоянная может быть вычислена даже без точного определения масштабного фактора. Мы вернемся к дальнейшему обсуждению этого понятия в разделе 2.6.

2.2.3. Красное смещение

Расширение Вселенной проявляется в так называемом красном смещении спектра излучения. Спектр излучения каждого далекого астрономического объекта, например галактики или квазара, смещается. Этот сдвиг, как правило, происходит в сторону увеличения длин волн, поэтому и называется красным смещением. Его величина характеризует радиальную скорость удаления объекта.

Этот сдвиг можно объяснить двумя способами, описывающими тот же самый эффект. Обратите внимание, что при количественных расчетах следует использовать только один из них, чтобы избежать учета этого эффекта дважды.

Первый подход связывает красное смещение с расширением самого пространства (и вместе с ним и волн света) за время распространения этого света. В результате общего расширения Вселенной наблюдаемая длина волны $\lambda_{\text{набл}}$ длиннее, чем длина испущенной волны $\lambda_{\text{исп}}$, поскольку она расширилась вместе со всеми остальными расстояниями. Их отношение равно относительному масштабному фактору в ту эпоху, когда был излучен свет.

Количественная характеристика красного смещения определяется значением величины z , которая также называется красным смещением, или z -фактором, равной $z = 1/u - 1$. Она

равна нулю для очень близких объектов и стремится к бесконечности для очень далеких объектов. Красное смещение обычно используется для определения расстояния до наиболее удаленных объектов. При очень больших расстояниях до объекта астрономы предпочитают указывать его красное смещение вместо скорости удаления.

Второй подход рассматривает красное смещение как результат эффекта Доплера, вызванного тем, что излучающий объект отдаляется от нас со скоростью его «разбегания». Для скоростей, существенно меньших скорости света c , т. е. при малых красных смещениях $z \ll 1$, его значение может быть приближенно записано как $v = cz$.

Скорость удаления объектов переводится в расстояния до них, используя закон Хаббла. Из-за неопределенности в значении параметра Хаббла расстояние часто выражается через безразмерную величину $h = H_0/(100 \text{ (км/с)/Мпк})$. Таким образом, скорость расширения 10 000 км/с переводится в расстояние $100 h^{-1}$ Мпк, иногда сокращается до 100 Мпк/ h . Причина в том, что точность измерения z -фактора значительно выше, чем у параметра Хаббла, а расстояния, написанные таким образом, не теряют свою актуальность даже после изменения значения параметра Хаббла.

Мы еще раз подчеркиваем, что написанное выше – это не два разных эффекта, а два разных объяснения одного и того же эффекта. Их не надо объединять вместе.

Обратите внимание, что нехаббловские потоки также вызывают красное смещение, но только из-за вызванного скоростями их движения эффекта Доплера. Когда галактика движется в сторону близкой области с повышенной плотностью материи, это не сопровождается расширением пространства. Спектр ближайших галактик иногда смещен в фиолетовую область, что означает, что они движутся по направлению к нам. Этот эффект не имеет ничего общего с расширением Вселенной и обусловлен взаимным притяжением соседних галактик, например Млечного Пути и Андромеды. Поэтому астрономы не используют лучевые скорости для определения расстояния до близких объектов, но для далеких объектов это является основным методом измерения расстояний до них.

2.3. Закон Хаббла



В этом разделе мы выводим закон Хаббла, предположив изотропию и однородность Вселенной.

Рассмотрим точки 1, 2 и 3 где-то во Вселенной, образующие треугольник, как показано на рис. 2.1. Длины сторон треугольника являются r_{21} , r_{31} и r_{32} . Длина r_{31} зависит не только от длины двух других сторон, но и от угла между ними. Изменяя угол, мы можем получить любое значение r_{31} в диапазоне от $|r_{21} - r_{32}|$ до $r_{21} + r_{32}$.

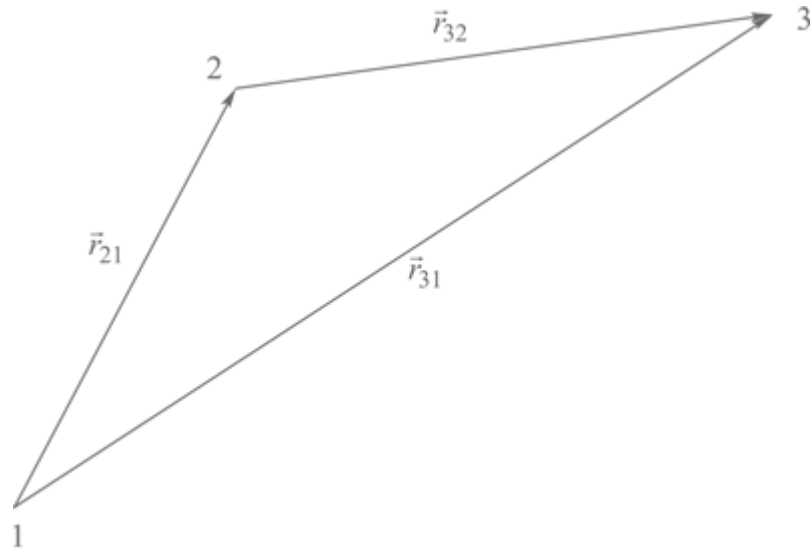


Рис. 2.1. К объяснению закона Хаббла

Из-за космологического расширения точки удаляются друг от друга. Рассмотрим движение частиц в двух других точках, наблюдаемых из определенной точки: скажем, из точки 1. Каждая из точек 2 и 3 может смещаться только в радиальном направлении от точки 1, в противном случае Вселенная была бы анизотропной. В изотропной Вселенной попросту нет никаких выделенных направлений, за исключением радиального. Скорости удаления всех частиц на расстоянии r от наблюдателя должны быть одинаковыми независимо от их направления, в противном случае Вселенная тоже была бы анизотропной. Таким образом,

условие изотропии фиксирует скорость расширения в виде $\vec{v} = f(r)\vec{r}$,
где $f(r)$ – некоторая пока неизвестная функция.

Скорость точки 2 по отношению к наблюдателю в точке 1 равна $\vec{v}_{21} = f(r_{21})\vec{r}_{21}$.

Точка 3 движется со скоростью $\vec{v}_{32} = f(r_{32})\vec{r}_{32}$ относительно точки 2. Сложив эти скорости, мы получаем, что точка 3 движется со скоростью $\vec{v}_{31} = \vec{v}_{21} + \vec{v}_{32} = f(r_{21})\vec{r}_{21} + f(r_{32})\vec{r}_{32} = f(r_{31})\vec{r}_{31} = f(r_{31})(\vec{r}_{21} + \vec{r}_{32})$

относительно точки 1. Это дает нам условие:

$$(f(r_{21}) - f(r_{31}))\vec{r}_{21} = (f(r_{31}) - f(r_{32}))\vec{r}_{32}. \quad (2.2)$$

Так как векторы \vec{r}_{21} и \vec{r}_{32}

могут иметь разные направления, это возможно, только если $f(r_{21}) = f(r_{31}) = f(r_{32}) = \text{const.} \quad (2.3)$

Таким образом, функция $f(r)$ сводится к постоянной, которую мы называем постоянной Хаббла H . Следовательно, в однородной и изотропной Вселенной в любой момент времени единственно возможным законом расширения является закон Хаббла (2.1).

Обратите внимание, что при выводе закона Хаббла мы игнорировали релятивистские эффекты, связанные с конечностью скорости света. В релятивистском случае мы больше не можем просто складывать скорости, формулы становятся более сложными.

Выведем их. Согласно СТО, если тело движется со скоростью v относительно неподвижного наблюдателя, а второе тело движется в том же направлении со скоростью w относительно первого, то скорость второго тела относительно неподвижного наблюдателя равна:

$$V = \frac{v + w}{1 + \frac{vw}{c^2}}. \quad (2.4)$$

Используя обратные гиперболические функции, это уравнение можно переписать в виде:

$$\text{arth} \frac{V}{c} = \text{arth} \frac{v}{c} + \text{arth} \frac{w}{c}. \quad (2.5)$$

Гиперболический арктангенс может быть сведен к натуральным логарифмам как

$$\operatorname{arth} x = \frac{1}{2} \ln \left(\frac{1+x}{1-x} \right). \quad (2.6)$$

Если бы постоянная Хаббла H была действительно постоянной, то мы должны были бы использовать функцию $c \operatorname{arth}(v/c)$ вместо v в законе Хаббла (2.1) и получить (здесь буквы th обозначают гиперболический тангенс):

$$v = c \operatorname{th} \frac{Hr}{c}, \quad Hr = c \operatorname{arth} \frac{v}{c} = \frac{c}{2} \ln \left(\frac{c+v}{c-v} \right). \quad (2.7)$$

Тем не менее для скоростей намного меньше скорости света закон Хаббла в виде (2.1) хорошо работает.

Обратите внимание, что скорость v разбегания галактик и других космических объектов не может достичь скорости света c , и это никак не противоречит СТО. Расстояние $r = c/H$, таким образом, не является границей наблюдаемой части Вселенной, как многие ошибочно полагают. В разделе 3.4 мы обсудим космологический горизонт, который является настоящей границей видимой части Вселенной, но существование этой границы вызвано совершенно другой причиной.

Как бы то ни было, зависимость постоянной Хаббла от времени приводит к тому, что ученые используют закон Хаббла в простой форме (2.1) только для объектов, расположенных не слишком далеко, т. е. при $v \ll c$. Более отдаленные объекты характеризуются их красными смещениями z . Их свет был излучен давно, когда значение постоянной Хаббла отличалось от нынешнего параметра. Еще одна причина связана с неоднозначностью определения расстояния до удаленных объектов.

Вопрос: Почему галактики удаляются именно от нас? Неужели мы находимся в центре Вселенной?

Ответ: Любая точка во Вселенной ничуть не хуже и не лучше других. Пусть наблюдатель в точке 1 видит, что галактика 3, имеющая относительно него радиус-вектор удаляется от него со скоростью v . Наблюдатель в точке 2 сдвинут от точки 1 на вектор \mathbf{r} и удаляется от наблюдателя 1 со скоростью v . Относительно него радиус-вектор галактики 3 равен \mathbf{r} и скорость движения галактики 3 равна v . Таким образом, закон Хаббла выполняется независимо от расположения точки, в которую помещено начало координат.

Вопрос: Как с помощью закона Хаббла можно оценить возраст Вселенной?

Ответ: Две галактики, находящиеся на расстоянии r друг от друга, разбегаются со скоростью $v = Hr$. Оценим время, прошедшее с того момента, когда расстояние между ними было равно нулю. Разделив расстояние на скорость, получим $T = r/v = H^{-1}$. Обратите внимание, что это время не зависит от того, какую пару галактик мы выберем. Результат получается не точный, а оценочный, потому что величина H меняется со временем, а скорость v меняется с расстоянием.

Вопрос: Почему меняющуюся со временем величину H продолжают называть постоянной?

Ответ: Обратим полученное соотношение для возраста Вселенной T : $H = T^{-1}$. Оценим относительное изменение постоянной Хаббла за 1 год как: 1 год / $13,8 \times 10^9$ лет = $7,25 \times 10^{-11}$. Таким образом, за 72 года, прошедших с открытия закона Хаббла, эта величина изменилась примерно на 5 миллиардных долей. На самом деле эта оценка верна лишь по порядку величины, поскольку, как будет показано дальше, постоянная Хаббла сейчас изменяется с другой скоростью из-за действия космологической постоянной или темной энергии.

2.4. Модели Фридмана

Закон Хаббла имел столь важное значение для космологии, поскольку эта зависимость следовала из теоретических предсказаний, сделанных незадолго до его открытия.

В 1922 г. в Петрограде (ныне Санкт-Петербург) русский физик Александр Фридман получил решение уравнения Эйнштейна, описывающее всю Вселенную, но не содержащее космологической постоянной. Особенность этого решения состояла в том, что Вселенная была динамической, т.е. вначале расширялась, а затем в зависимости от своей первоначальной плотности либо продолжала вечно расширяться, либо расширение сменялось сжатием. В 1927 г. это же решение было получено бельгийцем Жоржем Леметром, а в 1935 г. – американцем Говардом Робертсоном и британцем Артуром Уокером. В англоязычной литературе это решение часто называют решением FLRW по их инициалам (в старых книгах иногда встречается аббревиатура FRW, из которой несправедливо исключен Леметр). Мы в этой книге называем его решением Фридмана, признавая приоритет ученого.

Это решение является чрезвычайно важным, поскольку лежит в основе всех современных космологических теорий, которые комбинируют его идею с идеей космологической постоянной. Хотя сегодня известно, что исходное решение Фридмана не описывает реальную Вселенную, оно очень важно для понимания современных космологических моделей. Поэтому стоит знать его основные свойства. По этой причине мы даем его подробное описание в разделах повышенной сложности.

Фридман и его последователи применили уравнения ОТО Эйнштейна для описания однородной и изотропной Вселенной. Напомним, что в таком мире нет избранного места или предпочтительного направления, каждая точка не лучше и не хуже любой другой, как и каждое направление. Этих требований достаточно для того, чтобы получить, например, закон Хаббла как наиболее общее решение для скорости разбегания галактик, что мы и сделали в разделе 2.3.

Решение Фридмана описывает три физически различные ситуации, отличающиеся величиной отношения плотности материи Вселенной к так называемой критической плотности, зависящей от постоянной Хаббла. Точная формула для критической плотности (2.11) будет дана чуть позже в «продвинутом» разделе. Это отношение называется параметром плотности вещества и обозначается Ω_m . Если этот параметр меньше единицы, Вселенная имеет бесконечный объем и расширяется вечно, причем скорость разбегания любой галактики стремится к положительному значению. Такая ситуация называется открытой моделью, или открытой Вселенной Фридмана.

Когда параметр плотности равен единице, Вселенная так же бесконечна и вечно расширяется, но скорость разбегания любой галактики стремится к нулю. Такая ситуация называется плоской моделью, или плоской Вселенной Фридмана, и отличается от открытой модели ее асимптотическим поведением в будущем. Открытая Вселенная расширяется быстрее, чем плоская Вселенная.

Совершенно иная ситуация возникает тогда, когда параметр плотности больше единицы. В этом случае, который называется закрытой, или замкнутой моделью Фридмана, Вселенная имеет конечный объем, но не имеет границ или краев. Чтобы понять, как такое возможно, представьте себе земной шар или любую другую сферу. Площадь земной поверхности конечна, но нигде нет «края света». Закрытая Вселенная выглядит точно так же, но в трех измерениях³⁰. В какой-то момент она перестает расширяться и начинает сжиматься, что сопровождается изменением знака постоянной Хаббла, а через некоторое время снова сжимается в точку, точнее в сингулярность, называемую Большой хруст³¹.

³⁰ Умение представить себе пространство с более чем тремя измерениями является чрезвычайно полезным при изучении теории относительности.

³¹ Используемый иногда термин «Большое сжатие» совсем не отражает всего драматизма описываемого конца света. Корректнее перевести английский термин Big Crunch как Большой хруст, но мы добавили в конце

Все три модели начинаются с начальной сингулярности, называемой Большим взрывом, которую можно рассматривать как возникновение Вселенной.

Следует отметить, что, хотя и плотность вещества и критическая плотность изменяются с течением времени, отношение Ω_m не может пересечь граничное значение, равное единице. Другими словами, тип модели – открытая, плоская или замкнутая – фиксирован и не может измениться.

Проиллюстрируем свойства этих моделей рис. 2.2, на котором показано, как их основные параметры (масштабный фактор и постоянная Хаббла) изменяются со временем. Сразу после Большого взрыва постоянная Хаббла была бесконечно большой, а масштабный фактор бесконечно малым. В замкнутой модели непосредственно перед Большим хрустом постоянная Хаббла стремится к значению, равному минус бесконечности, а масштабный фактор вновь становится бесконечно малым. Естественно, постоянная Хаббла обращается в ноль, когда замкнутая Вселенная достигает своего максимального размера.



Рис. 2.2. Зависимость от времени относительного масштабного фактора (слева) и постоянной Хаббла (справа) для трех моделей Фридмана

Из того факта, что Вселенная сейчас расширяется, мы приходим к выводу, что она описывается либо открытой, либо плоской моделями, либо замкнутой моделью в фазе расширения. В любом случае ее масштабный фактор до сих пор рос монотонно. График его изменения от Большого взрыва до текущей эпохи показан на рис. 2.2. Длина волны фотона, излученного давно, когда Вселенная была меньше, увеличилась с тех пор в $1/u$ раз, где u – относительный масштабный фактор в ту эпоху, когда был излучен свет. Поэтому красное смещение фотона, т. е. его z -фактор, равно $z = 1/u - 1$. Чем старше свет, излученный объектом, тем дальше объект и тем больше его красное смещение. Именно поэтому красное смещение является хорошим индикатором расстояния.

Вопрос: Как смещался бы спектр, если бы мы жили в сжимающейся замкнутой Вселенной?

Ответ: Начнем с построения графика зависимости относительного масштабного фактора от времени для этого случая, охватив период от Большого взрыва до современной эпохи. Это, естественно, часть графика, приведенного на рис. 2.3. Мы видим, что масштабный фактор сначала растет от нуля в момент Большого взрыва до некоторого значения a_{max} , большего единицы, а затем уменьшается до единицы в современную эпоху. Естественно, что в некоторой точке B во время фазы расширения масштабный

мягкий знак из уважения к роману Булгакова «Мастер и Маргарита»:

— Начисто, — крикнул Коровьев, и слезы побежали у него из-под пенсне потоками, — начисто! Я был свидетелем. Верите — раз! Голова — прочь! Правая нога — хрусть, пополам! Левая — хрусть, пополам! Вот до чего эти трамваи доводят! — и, будучи, видимо, не в силах сдержать себя, Коровьев клюнул носом в стену рядом с зеркалом и стал содрогаться в рыданиях.

Далее мы будем употреблять оба термина как равноправные.

коэффициент тоже равен единице. Длина волны света, испускаемого в точке B , вначале увеличивается в атах раз, а затем уменьшается в атах раз, и свет приходит к нам сейчас с точно такой же длиной волны, с какой он был испущен. Таким образом, любой свет, испущенный до момента времени B , наблюдался бы нами с точно такой же длиной волны, какую он имел в точке B . Это означает, что спектр любого объекта, излучившего свет между Большим взрывом и точкой B , будет иметь красное смещение. Таким образом, для любого света, испущенного до момента B , мы можем использовать те же формулы, что и в случае расширяющейся Вселенной.

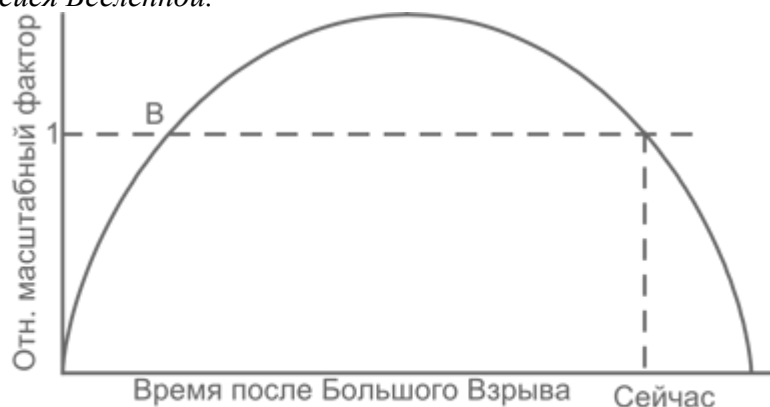


Рис. 2.3. Часть рис. 2.2, показывающая эволюцию относительного масштабного фактора в замкнутой Вселенной

Длина волны любого света, излучаемого после точки B , будет увеличиваться меньше, чем она станет уменьшаться впоследствии на этапе сжатия. Это означает, что его наблюдаемая длина волны будет короче, чем излучаемая, т. е. его спектр будет смещен в фиолетовую область. Достаточно очевидно, что максимальное синее смещение будет наблюдаться для света, излучаемого в тот момент времени, когда Вселенная имела максимальный масштабный фактор. Если формально применять формулу для красного смещения в расширяющейся Вселенной, мы получим отрицательную величину z . Более того, любое такое значение z будет соответствовать двум различным моментам времени и, следовательно, двум различным расстояниям. Это вызвано тем фактом, что Вселенная обретает соответствующий масштабный фактор дважды: во время расширения от точки B до максимального размера и при сжатии от максимального размера до современной эпохи.

Астрономы, живущие в этом мире, наблюдали бы объекты, у которых синее смещение увеличивается с расстоянием, затем при дальнейшем увеличении расстояния до объектов синее смещение уменьшается до нуля и сменяется красным смещением. Эти астрономы, несомненно, имели бы массу проблем при определении расстояний до удаленных объектов. К счастью, в соответствии с современными ограничениями на значения космологических параметров наша Вселенная никогда не будет сжиматься.

2.4.1. Стрела времени

Одна из философских проблем, связанных с моделями Фридмана, – это так называемая «стрела времени» – термин, введенный Артуром Эддингтоном. Время отличается от пространственных координат тем, что любой объект, в том числе и мы сами, должен двигаться по оси времени в определенном направлении независимо от его воли. Стрела времени направлена из прошлого в будущее. Отличить прошлое от будущего мы можем исходя из принципа причинности. Принцип причинности, вообще говоря, – философский принцип, но он очень важен для физики. Он заключается в том, что причина всегда должна предшествовать следствию.

Направление стрелы времени, связанной с принципом причинности, иногда называют

психологической стрелой времени. Различие прошлого и будущего для человека ясно видно из того, что он помнит прошлое, но не знает будущего. Естественно, это является следствием принципа причинности. Поэтому, на наш взгляд, предпочтительнее говорить о стреле времени, связанной с принципом причинности, не привлекая явно вторичные понятия из психологии.

Всегда ли существует стрела времени? В ОТО существуют решения, допускающие замкнутые времениподобные линии. Путешествуя вдоль такой линии, можно вернуться в исходную точку пространства и времени, по пути побывав в своем прошлом. Исходя из принципа причинности, физики отбрасывают такие решения, считая их нефизическими. Таким образом, в реальном физическом мире стрела времени всегда существует.

Как проявляет себя стрела времени в различных разделах физики? В механике законы движения тел симметричны относительно смены знака времени до тех пор, пока не появляется трение или другие диссипативные силы. В термодинамике все процессы делятся на обратимые, для которых не важен знак времени, и необратимые, для которых направление стрелы времени определяется возрастанием энтропии. Интересно проявляет себя стрела времени в электродинамике. Уравнения Максвелла полностью симметричны относительно изменения знака времени. Асимметрия заключена не в уравнениях, а в выделенных начальных условиях.

Покажем это на примере. Мы выстрелили заряженным шариком из рогатки, в результате чего он улетел с постоянной скоростью. В течение времени, когда он двигался ускоренно под действием сил натяжения резинки, он испускал электромагнитные волны, уходящие в бесконечность. Теперь посмотрим на этот процесс с другой стороны. Заряженный шарик движется с постоянной скоростью, после чего на него сходятся из бесконечности электромагнитные волны с тщательно подобранными фазой, амплитудой и частотой, которые его замедляют, а импульс шарика передается резинке. Не очень правдоподобная картина. Разница состоит в том, что в первом случае у нас имеются вполне естественные начальные условия, а во втором они должны быть специально подобраны с ювелирной точностью. Естественно, что эта временная асимметрия связана исключительно с причинностью. Мы рассматриваем именно начальные, а не конечные условия для того, чтобы обеспечить возможность корректно сформулировать задачу³². Поэтому электродинамика не вводит свою дополнительную стрелу времени, а использует стрелу времени, связанную с принципом причинности.

Перейдем в микромир. Достаточно убедительные теоретические соображения демонстрируют, что мир должен быть инвариантным относительно СРТ-преобразования³³, когда одновременно меняют знак времени, всех пространственных координат (при этом происходит зеркальное отражение) и электрических зарядов. Поскольку экспериментально доказано, что СР-инвариантность нарушается, это должно обозначать нарушение Т-инвариантности.

В космологии некоторые вводят свою стрелу времени – такое направление времени, при котором Вселенная расширяется. Пока было неизвестно, какой моделью описывается наша Вселенная и будет ли она расширяться вечно или начнет сжиматься, была выдвинута гипотеза, что с началом сжатия поменяется направление не только космологической стрелы времени, но и всех остальных. Другими словами, время пойдет вспять.

Одним из сторонников этой гипотезы одно время был выдающийся физик Стивен Хокинг (Хокинг, 1990), но впоследствии он отказался от идеи о том, что энтропия начнет уменьшаться при сжатии Вселенной. Тем не менее он взялся доказать, исходя из слабого

³² По терминологии математики — задачу Коши.

³³ См. сноску 68.

антропного принципа³⁴, что все три стрелы времени (термодинамическая, психологическая и космологическая) направлены одинаково. Однако мы не можем признать это убедительным доказательством, ведь ничто не мешает представить себе Вселенную с немного другими космологическими параметрами, допускающими существование разумной жизни на стадии ее сжатия. Эти разумные существа вполне могут наблюдать смену знака постоянной Хаббла. Почему для них должно поменяться направление термодинамической и психологической стрелы времени – совершенно непонятно.

Абсолютно по-другому описан этот вопрос в известной книге Якова Зельдовича и Игоря Новикова «Строение и эволюция Вселенной» (Зельдович, 1975). Без излишних философских изысков расширение Вселенной сравнивается с движением камня, подброшенного вверх. Вначале он удаляется от земли, потом приближается. В момент его остановки нет никаких оснований считать, что стрела времени изменит свое направление. Так же следует трактовать и смену знака постоянной Хаббла. Автор разделяет эту точку зрения. Впрочем, в последнее время этот вопрос стал чисто умозрительным, так как существующие ограничения на космологические параметры исключают возможность коллапса Вселенной.

2.5. Геометрия Вселенной

Решения Фридмана для уравнений Эйнштейна без космологической постоянной описывают три возможных типа Вселенной. В дополнение к различиям, которые мы рассмотрели в предыдущем разделе, они также имеют различные знаки пространственной кривизны. Это наиболее фундаментальное свойство моделей Фридмана.

Что такое пространственная кривизна? Давайте еще раз применим двумерную аналогию. Лист бумаги имеет нулевую пространственную кривизну, так как он является плоским, т. е. представляет собой часть плоскости. Плоская поверхность подчиняется правилам евклидовой геометрии (тому виду геометрии, которому учат в школе). Как следует из названия, плоская Вселенная действительно плоская и ее пространственная кривизна тоже равна нулю. Сферические поверхности, такие как поверхность земного шара, имеют положительную пространственную кривизну. Это двумерный аналог замкнутой модели.

Есть более сложные седлообразные поверхности, которые имеют отрицательную пространственную кривизну, наиболее известной из которых является так называемая псевдосфера. Они представляют собой двумерные аналоги открытой модели. В двух последних случаях, когда кривизна ненулевая, евклидова геометрия уже не работает. Другими словами, зная пространственную кривизну, мы можем определить, какое из решений Фридмана описывает реальный мир.

Как можно узнать пространственную кривизну Вселенной? Если бы Вселенная не расширялась или мы могли бы перемещаться с бесконечной скоростью, это можно было бы сделать достаточно просто. Приведем аналогию. Представим двумерных существ, живущих на поверхности сферы. Их мир не имеет границ, но имеет вполне конечную площадь – $4\pi R^2$. Любую точку можно считать центром мира. Отношение длины окружности к радиусу меньше 2π . Более того, если мы выберем произвольную точку, скажем полюс, и начнем проводить вокруг нее окружности все большего радиуса (параллели), то вначале их длина будет расти, достигнет максимума на экваторе, а потом будет падать (см. рис. 2.4). Длина внешней окружности будет меньше длины вложенной в нее внутренней. Если заменить окружности заборами, то существо, которое их начнет красить снаружи, через некоторое число покрашенных заборов обнаружит, что окружено последним забором со всех сторон, причем окружено с наружной стороны забора.

³⁴ Антропный принцип обсуждается далее в разделе 3.7.

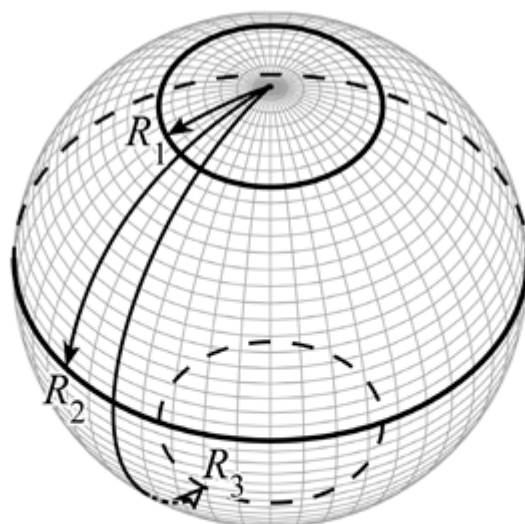


Рис. 2.4. В статической замкнутой Вселенной отношение длины круга к его радиусу меньше 2π и уменьшается при увеличении радиуса. Длина круга сначала растет, а затем уменьшается по мере увеличения его радиуса

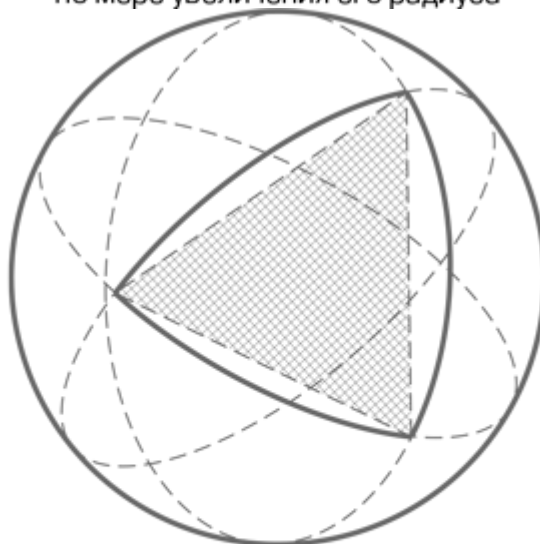


Рис. 2.5. В замкнутой Вселенной сумма углов треугольника больше чем 180° . Толстые линии показывают треугольник на сфере, заштрихованная область показывает для сравнения плоский треугольник

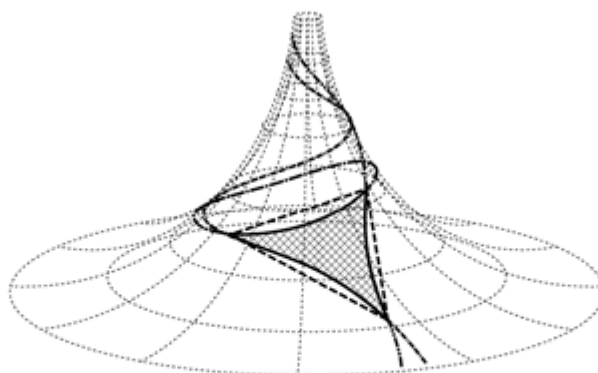


Рис. 2.6. В открытой Вселенной сумма углов треугольника меньше 180° . Толстые линии показывают треугольник на псевдосфере, пунктирные линии показывают для сравнения плоский треугольник

В трехмерном пространстве с положительной кривизной отношение площади сферы к квадрату радиуса будет меньше 4π . Площадь концентрических сфер с увеличением их радиуса вначале растет, потом падает.

Если кривизна равна нулю, то двумерные существа живут на плоскости, а трехмерные (мы) – в плоском пространстве. Работает (в идеальном случае) евклидова геометрия, отношение площади сферы к квадрату радиуса равно 4π , нет границ, объем Вселенной бесконечен.

Если кривизна отрицательна, то отношение площади сферы к квадрату радиуса будет больше 4π . Площадь концентрических сфер с увеличением их радиуса всегда растет. Нет границ, объем бесконечен.

Данные наблюдений не позволяют с уверенностью исключить ни один из этих вариантов. Но они показывают, что Вселенная либо плоская, либо достаточно близка к плоской. Этот вариант выделен и из теоретических соображений, как будет объяснено в разделе 5.

Для определения кривизны мы могли бы также рассматривать достаточно большие треугольники и измерять сумму их углов. Если она равна 180° , мы имеем дело с плоским пространством. Если она больше, кривизна положительна, как показано на рис. 2.5. Если меньше, кривизна отрицательна. Интересно, что подобный метод предложил еще Карл Фридрих Гаусс, который думал над практической реализацией этого метода, причем в качестве вершин треугольника предлагал использовать три горные вершины.

Но перейдем к реальному миру. Пространство на масштабах, в которых существует человечество, не является ни однородным, ни изотропным. Например, если мы построим треугольник на плоскости, перпендикулярной к Солнцу, точнейшие измерения показали бы, что сумма углов треугольника больше 180° . Естественно, в качестве сторон треугольника выступают лучи света в вакууме. Если же повернуть эту плоскость так, чтобы она проходила через Солнце, то сумма углов треугольника стала бы меньше 180° . Это следует из анализа метрики Шварцшильда, описывающей поле сферически симметричного тела в ОТО.

Поэтому проводить описанные здесь эксперименты имеет смысл только на масштабах, превышающих масштабы неоднородностей во Вселенной. Иными словами, на масштабах, существенно превышающих размеры нашей Галактики. Однако в идеальном случае однородной изотропной Вселенной мы можем рассматривать подобные мысленные эксперименты, чтобы лучше понять различие между разными типами расстояний, вводимых в кривом пространстве. Для реальных же наблюдений совершенно необходимы большие масштабы. И все описанные ниже наблюдения – по вспышкам сверхновых, по неоднородностям реликтового излучения, по барионным акустическим колебаниям – удовлетворяют этому требованию.

Отметим один забавный нюанс, касающийся замкнутой модели Вселенной. Если бы Вселенная не расширялась, а скорость света была бесконечной, то, посмотрев в сверхмощный телескоп, мы могли бы увидеть собственный затылок. Это явление аналогично

тому, что путешественник, идущий строго на запад, в конце концов вернется в исходную точку. С этим обстоятельством были связаны весьма наивные наблюдения, предпринятые некоторыми астрономами достаточно давно. Они наводили свой телескоп в сторону, прямо противоположную наиболее далеким из известных в то время астрономических объектов, в попытке увидеть их с другой стороны. На самом деле знакомство с релятивистской космологией не в популярном изложении избавило бы их от напрасных наблюдений. Дело в том, что даже если реальная Вселенная замкнута, она расширяется, а потом сжимается. Время, необходимое свету на то, чтобы обогнуть всю замкнутую Вселенную, как показывают расчеты, больше времени существования такой Вселенной от Большого взрыва до Большого хруста.

2.6. Масштабный фактор

Теперь, узнав о геометрии Вселенной, мы можем вернуться к обсуждению понятия масштабного фактора. Мы могли бы использовать расстояние между любыми произвольными точками в качестве масштабного фактора, но в однородной Вселенной нет избранных точек. Тем не менее существует естественный пространственный масштаб в замкнутой Вселенной Фридмана. Это радиус кривизны Вселенной, который и используется в качестве масштабного фактора азамкнутой модели. В открытой модели радиус кривизны Вселенной отрицателен, так что масштабный фактор a определяется как абсолютная величина этого радиуса. В обоих случаях величина масштабного фактора в настоящее время равна некоторому значению a_0 . Мы используем индекс 0, чтобы указать значения величин в современную эпоху.

Совершенно иначе обстоит дело у плоской модели с нулевой пространственной кривизной, в которой нет никакого естественного масштабного фактора. Чтобы обойти это препятствие, полагают $a_0 = 1$. В результате величина масштабного фактора определяется как отношение расстояния между любыми достаточно удаленными объектами (так что они не являются гравитационно связанными друг с другом) в данной эпохе к его значению сейчас. В этой книге мы будем использовать подобное отношение для всех моделей. Для такого выбора есть несколько причин. Среди прочего наша Вселенная плоская или почти плоская, и мы не знаем значения ее радиуса кривизны.

Мы обозначим это отношение буквой u . Оно совпадает с определением масштабного фактора в случае плоской модели. Для открытых или закрытых моделей ему соответствует соотношение $u = a/a_0$. Для простоты мы называем его относительным масштабным фактором. Обратная величина $1/u$ тесно связана с красным смещением z с помощью простой формулы $1/u = 1 + z$. Постоянная Хаббла равна $H = (du/dt)/u$.

2.6.1. Параметр замедления

Один из возможных способов сделать выбор между тремя моделями Фридмана – это определение так называемого космологического параметра замедления q . Параметр замедления связан со скоростью, с которой уменьшается с течением времени постоянная Хаббла (детали см. в подразделе 2.7.3). Эта величина положительна для всех трех моделей Фридмана. В замкнутой модели она больше, чем 0,5, в плоской модели равна 0,5, а в открытой модели меньше, чем 0,5, но всегда положительна.

Определение параметра замедления реальной Вселенной на основе данные о вспышках сверхновых дало неожиданный результат. Полученное значение оказалось отрицательным, это означает, что наша Вселенная в настоящее время расширяется с ускорением. Открытие принесло его авторам – Солу Перлмуттеру, Брайану Шмидту и Адаму Риссу – Нобелевскую премию по физике в 2011 г. «За открытие ускоренного расширения Вселенной посредством наблюдения дальних сверхновых». Для объяснения этого эффекта необходимо ввести новый элемент, а именно космологическую постоянную, или темную энергию.

2.7. Нерелятивистские решения Фридмана



Как мы уже упоминали в главе 1, через некоторое время после появления релятивистской космологии было обнаружено, что многие ее результаты можно получить, не прибегая к ОТО. В этом разделе мы получим математическое описание трех моделей Фридмана, используя классический ньютоновский закон всемирного тяготения, и вычислим для них параметр замедления.

2.7.1. Космологическая эволюция без космологической постоянной



Рассмотрим вначале простейшую модель, когда Вселенная равномерно заполнена пылевидной материей, т. е. материей, не имеющей давления, с плотностью $\rho(t)$. Выберем произвольную точку, которую будем считать центром Вселенной. Естественно, мы можем взять любую другую точку и назначить ее в качестве центра Вселенной, но из-за однородности Вселенной уравнения и их решения будут теми же.

Рассмотрим сферу радиуса $r(t)$ вокруг этого центра, привязанную к материи и расширяющуюся вместе с ней по закону Хаббла (2.1). Ни один атом или частица материи не могут пересечь эту сферу. Все, что было внутри сферы, остается внутри навсегда, все, что снаружи сферы, всегда будет снаружи, а то, что на поверхности, остается на поверхности. Радиус сферы мал по сравнению со значением c/H , поэтому его изменение нерелятивистское, и мы можем использовать простейший вариант закона Хаббла (2.1) $v(t) = H(t)r(t)$, где $v(t) = dr(t)/dt$ – это скорость расширения сферы с радиусом $r(t)$. Таким образом, $H(t) = dr(t)/dt r^{-1}(t)$.

Объем шара равен $4\pi r^3/3$, масса пылевидного вещества внутри этой сферы равна $M = 4\pi r^3/3 \rho$. Эта масса остается постоянной во время расширения, поэтому, вводя константу $B = 3M/4\pi$, мы получаем закон изменения плотности со временем в виде

$$\rho(t) = Br(t)^{-3}. \quad (2.8)$$

Как вы можете видеть, до сих пор не возникло никаких «математических кошмаров». Следующим шагом является получение уравнения, описывающего расширение Вселенной, и выведение из него зависимостей $r(t)$ и $H(t)$.

Прежде чем мы к этому приступим, рассмотрим куда более простую родственную задачу. Где-то в космосе есть сферически симметричная планета с массой M и радиусом R , которая не имеет никакой атмосферы и не вращается, поэтому влиянием этих факторов можно пренебречь. Ее обитатель пинает ногой, щупальцем или псевдоподием футбольный мяч массой m вертикально вверх со скоростью V . Как будет двигаться мяч? Очевидно, что он будет двигаться в радиальном направлении от центра планеты. Улетит ли он в космос или упадет обратно на поверхность планеты (рис. 2.7)?

Как мы можем узнать, что произойдет? Достаточно использовать закон сохранения энергии. Суммарная энергия мяча равна сумме кинетической и потенциальной энергий. Кинетическая энергия в любой момент равна $mv^2/2$, где v – это текущая скорость мяча. Потенциальная энергия гравитационного взаимодействия мяча и планеты равна $-GMm/a$, где G – гравитационная постоянная, a – текущее расстояние между мячом и центром

планеты. Потенциальная энергия отрицательна вблизи планеты и становится равной нулю, если мяч удаляется от планеты на очень большое расстояние. Кинетическая энергия шара всегда неотрицательна. Таким образом, для того чтобы мяч улетел в космос, его полная энергия тоже должна быть неотрицательной. Так как полная энергия сохраняется, это также относится и к его начальной энергии E , равной

$$E = \frac{mV^2}{2} - \frac{GMm}{R} = \frac{m}{2}(V^2 - v_2^2). \quad (2.9)$$

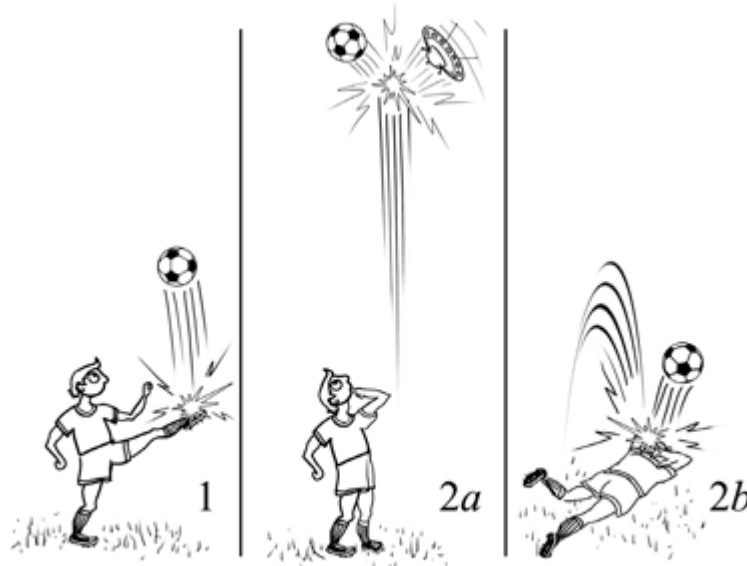


Рис. 2.7. Возможные результаты пинания ногой футбольного мяча вертикально вверх

Значение $v_2 = \sqrt{2GM/R}$

называется второй космической скоростью. Это минимальная скорость, которую необходимо иметь объекту, например мячу, чтобы выйти за пределы гравитационного притяжения массивного тела. Вторая космическая скорость для Земли составляет около 11,2 км/с. Если начальная скорость мяча меньше v_2 , он будет падать обратно на планету. Максимальную высоту подъема мяча при $V < v_2$ можно легко получить непосредственно из закона сохранения энергии. При $V = v_2$ скорость мяча будет уменьшаться с увеличением расстояния от планеты, стремясь к нулю на бесконечном удалении от нее. Если $V > v_2$, то его скорость вдали от планеты уменьшится до некоторой положительной предельной

величины, равной $\sqrt{V^2 - v_2^2}$.

Эти три случая соответствуют отрицательной, нулевой и положительной полной механической энергии мяча.

Как ни странно, эти случаи соответствуют также и трем основным сценариям космологического расширения. Вернемся к сфере из пылевидной материи и рассмотрим частицу массы m , которая все время находится на поверхности. В какой-то момент времени ее кинетическая энергия равна $mv^2/2 = mH^2r^2/2$. Гравитационная потенциальная энергия обеспечивается только взаимодействием с веществом внутри сферы и равна $-GMm/r = -4\pi G\rho mr^2/3$. Полная энергия равна

$$E = mr^2 \left(\frac{H^2}{2} - \frac{4}{3} \pi G\rho \right) = \frac{4}{3} \pi Gmr^2 (\rho_{\text{крит}} - \rho) = \frac{1}{2} mA, \quad (2.10)$$

где $A = \text{const}$ из закона сохранения энергии. Мы ввели обозначение для критической плотности материи

$$\rho_{\text{крит}} = 3H^2/8\pi G. \quad (2.11)$$

Обратите внимание, что величина $\rho_{\text{крит}}$ зависит от величины постоянной Хаббла H и изменяется во времени. В настоящее время она равна $1,88 \times 10^{-26} h^2 \text{ кг/м}^3$, где $h = H_0/(100$

(км/с)/Мпк). Используя величину h , полученную из астрономических наблюдений, можно получить $\rho_{\text{крит}} = (8,62 \pm 0,12) \times 10^{-27}$ кг/м³. Чему это соответствует? Самая разреженная среда, с которой когда-либо сталкивалось человечество, – это межпланетное пространство в Солнечной системе. Его плотность в районе орбиты Земли мала и составляет примерно 10–20 кг/м³ (6 протонов на 1 см³), что более чем в 80 млн раз больше критической плотности.

Разность между плотностью вещества ρ и критической плотностью всегда имеет тот же знак, противоположный знаку константы A . При $A > 0$ всегда выполняется условие $\rho < \rho_{\text{крит}}$. Энергия частицы (2.10) положительна, и, следовательно, частица может достичь бесконечности. Ее скорость уменьшается, стремясь к положительному предельному значению $v = \sqrt{A}$. Вселенная вечно расширяется, начиная с Большого взрыва, и без Большого хруста/хрустя. Этот случай соответствует открытой модели Фридмана. При $A = 0$ имеем $\rho = \rho_{\text{крит}}$ и в любой момент вечного расширения частица имеет нулевую энергию и может достигать бесконечности, но с нулевой предельной скоростью. Это плоская модель Фридмана. Если $A < 0$, то всегда $\rho > \rho_{\text{крит}}$ и энергия частицы отрицательна. Она не может достичь бесконечности. Рано или поздно расширение Вселенной останавливается и сменяется сжатием. Это замкнутая модель Фридмана.

Как видим, все три версии космологической модели Фридмана – открытая, закрытая и плоская – можно объяснить столь же легко, как движение камня, брошенного вверх. Чтобы улететь бесконечно далеко, скорость камня должна быть равна второй космической скорости (это соответствует плоской модели) или превышать ее (открытая модель). Камень, брошенный медленнее, сначала летит вверх, а затем начинает падать вниз (закрытая модель). Тем не менее в рамках нерелятивистской космологии мы не можем определить, что замкнутая, плоская и открытая модели имеют соответственно положительную, нулевую и отрицательную пространственную кривизну. Это возможно только с помощью релятивистской космологии, основанной на ОТО.

Подставляя уравнение (2.8) в уравнение (2.10), мы получаем уравнение Фридмана для Вселенной, заполненной пылевидной материей, без космологической постоянной и зависимости $H(r)$:

$$H^2 = \frac{A}{r^2} + \frac{8}{3} \pi G \rho = \frac{A}{r^2} + \frac{8}{3} \pi G \frac{B}{r^3}, \quad (2.12a)$$

$$\left(\frac{dr}{dt} \right)^2 = v^2 = H^2 r^2 = A + \frac{8}{3} \pi G \frac{B}{r}. \quad (2.12b)$$

Решив их, мы получаем зависимости $r(t)$ и $H(t)$:

$$\frac{dr}{dt} = Hr = \sqrt{A + \frac{8\pi}{3r} GB}, \quad (2.13a)$$

$$t = \int \frac{dr}{\sqrt{A + \frac{8\pi}{3r} GB}}. \quad (2.13b)$$

Вместе с зависимостью $\rho(t)$, определяемой формулой (2.8), они завершают описание трех возможных сценариев космологической эволюции в рамках нерелятивистской космологии.

2.7.2. Исследование решений



Рассмотрим смысл и свойства решений Фридмана. Прежде всего перейдем от констант A и B к величинам с более четким физическим смыслом. Выберем опорный момент времени в системе наблюдателя, неподвижного по отношению к окружающей среде. Назовем этот момент текущей эпохой или «сейчас». Снабдим все значения, относящиеся к этому моменту, индексом 0. Мы уже делали это раньше, когда ввели параметр Хаббла H_0 – текущее значение зависящей от времени постоянной Хаббла H . Следующей используемой величиной будет так называемый параметр плотности материи $\Omega_m = \rho/\rho_{\text{крит}}$. Как числитель, так и знаменатель этого отношения зависят от времени согласно формулам (2.8) и (2.11). Следовательно, параметр плотности вещества тоже зависит от времени. Обозначим его текущее значение Ω_{m0} . Нам также понадобится текущее значение радиуса сферы r_0 , играющее роль текущего значения масштабного фактора.

Применив формулы (2.4) и (2.7) к текущей эпохе, мы получаем:

$$B = \rho_0 r_0^3 = \Omega_{m0} \rho_c r_0^3 = 3H_0^2 \Omega_{m0} r_0^3 / 8\pi G. \quad (2.14)$$

Из (2.10) и (2.11) определим

$$A = H_0^2 r_0^2 (1 - \Omega_{m0}). \quad (2.15)$$

Из уравнения (2.15) мы еще раз убеждаемся, что случай $\Omega_m \geq 1$ соответствует $A \leq 0$, т. е. закрытой модели, в которой Вселенная в конечном итоге опять собирается в точку, случай $\Omega_m \leq 1$ соответствует открытой модели с $A \geq 0$, а $\Omega_m = 1$ соответствует плоской модели с $A = 0$.

Подставляя уравнения (2.14) и (2.15) в уравнение (2.12), мы получаем:

$$H^2 = H_0^2 \left[u^{-2} (1 - \Omega_{m0}) + u^{-3} \Omega_{m0} \right]. \quad (2.16)$$

Здесь мы ввели относительный масштабный фактор $u = r/r_0$, который может быть легко преобразован при $r \ll r_0$ в красное смещение z простым соотношением $1/u = 1 + z$.

Уравнение (2.16) полностью описывает зависимость $H(u)$ или $H(z)$. В современную эпоху $u = 1$, и оно выполняется автоматически. Проанализируем зависимость постоянной Хаббла от относительного масштабного фактора или красного смещения z .

При $\Omega_m = 1$ (плоская модель) имеем $H = H_0 u^{-3/2}$, что соответствует монотонному уменьшению H , стремящемуся к нулю при $u \rightarrow \infty$. При $\Omega_m \leq 1$ (открытая модель) постоянная Хаббла также снижается, но медленнее. При $\Omega_m \geq 1$ (закрытая модель) первый член в скобках отрицателен, а второй – положителен. Второй член уменьшается быстрее, чем первый. Таким образом, если бы эта модель допускала большие значения u , то правая часть уравнения (2.16) в конечном итоге стала бы отрицательной, что невозможно. Таким образом, относительный масштабный фактор Вселенной увеличивается до тех пор, пока постоянная Хаббла не становится равной нулю, а после этого уменьшается. Мы можем найти максимальный масштабный фактор, приравняв выражение в квадратных скобках к нулю:

$$u_{\text{max}} = r_{\text{max}}/r_0 = \Omega_{m0}/(\Omega_{m0} - 1). \quad (2.17)$$

Чтобы найти зависимости от времени, нам нужно подставить уравнения (2.14) и (2.15) в уравнение (2.13), которое сводится к

$$t = \frac{1}{H_0} \int \frac{du}{\sqrt{1 - \Omega_{m0} + \Omega_{m0} u^{-1}}} = -\frac{1}{H_0} \int \frac{dz}{(1+z)^2 \sqrt{1 + z\Omega_{m0}}}. \quad (2.18)$$

Все, что требуется, чтобы вычислить этот интеграл, – заглянуть в хороший справочник. В простейшем случае плоской модели ($\Omega_{m0} = 1$) мы получаем:

$$t = \frac{2}{3} \frac{u^{3/2}}{H_0}. \quad (2.19)$$

Значение константы интегрирования выбрано таким образом, чтобы момент $t = 0$ соответствовал Большому взрыву.

Для открытой модели ($\Omega_{m0} < 1$) мы имеем:

$$t = \frac{1}{H_0 \sqrt{1 - \Omega_{m0}}} \left[\frac{\sqrt{p(1+z)+1}}{1+z} + \frac{p}{2} \ln \left(\frac{\sqrt{p(1+z)+1}-1}{\sqrt{p(1+z)+1}+1} \right) \right], \quad (2.20)$$

где $p = \Omega_{m0}/(1 - \Omega_{m0}) > 0$.

Для закрытой модели ($\Omega_{m0} > 1$) мы имеем другое громоздкое выражение

$$t = \frac{1}{H_0 \sqrt{\Omega_{m0} - 1}} \left[s \left(\frac{1}{2} - \arctg \sqrt{s(1+z)-1} \right) - \frac{\sqrt{s(1+z)-1}}{1} \right], \quad (2.21)$$

где $s = \Omega_{m0}/(\Omega_{m0} - 1) > 1$.

Мы использовали эти формулы для построения рис. 2.2. Теперь построим его еще раз, как рис. 2.8, добавив масштабы на осях. Мы используем значение $H_0 = 68$ (км/с)/Мпк, которое, впрочем, влияет только на временной масштаб графика. Мы использовали довольно экстремальные значения $\Omega_{m0} = 0,5$ и $\Omega_{m0} = 1,5$ для открытой и закрытой моделей.

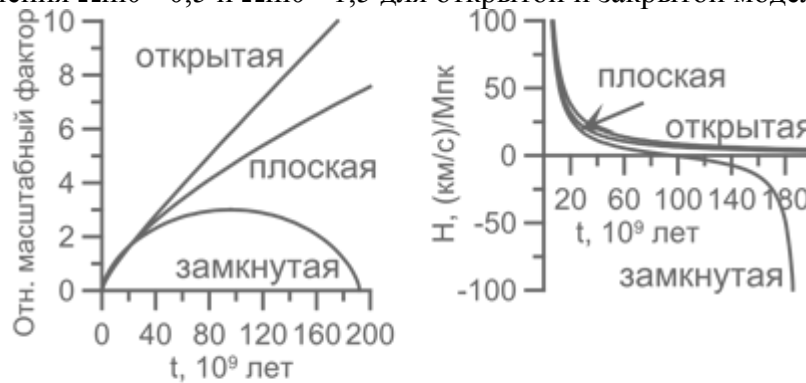


Рис. 2.8. Три модели Фридмана. Относительный масштабный фактор u (слева) и постоянная Хаббла H (справа) в зависимости от времени с момента Большого взрыва t

Уравнение (2.21) дает нам промежуток времени от Большого взрыва до момента, когда замкнутая Вселенная достигает своего максимального размера, и равный ему промежуток времени с этого момента до Большого хруста:

$$\Delta T = \frac{\pi s}{2H_0 \sqrt{\Omega_{m0} - 1}} = \frac{\pi}{2H_0} \frac{\Omega_{m0}}{(\Omega_{m0} - 1)^{3/2}} \quad (2.22)$$

Общее время жизни замкнутой Вселенной равно $2\Delta T$.

2.7.3. Параметр замедления



Некоторые полезные величины могут быть получены без каких-либо дифференциальных уравнений типа (2.12). Параметр замедления в космологии определяется как³⁵

³⁵ Строго говоря, правая часть должна содержать a вместо r , но мы используем r , потому что масштабный фактор a не может быть должным образом введен в нерелятивистской космологии, как объяснено в разделе 2.6. Кроме того, их относительное изменение одно и то же: $a/a_0 = r/r_0$, поэтому формула (2.23) с r определяет тот же параметр замедления, что и формула с a .

$$q = -\frac{\ddot{r}}{\dot{r}^2}. \quad (2.23)$$

Здесь точка над переменной означает ее производную по времени, а две точки – вторую производную по времени. Таким образом, \dot{r} является скоростью частиц на поверхности сферы, \ddot{r} – их ускорением.

Мы можем определить эту величину, используя формулу для ускорения частицы на поверхности сферы

$$\ddot{r} = \dot{v} = -\frac{GM}{r^2} = -\frac{4\pi G\rho r}{3}. \quad (2.24)$$

Параметр замедления равен

$$q = -\frac{\ddot{r}}{\dot{r}^2} = \frac{4\pi G\rho r^2}{3\dot{r}^2} = \frac{4\pi G\rho}{3H^2} = \frac{\rho}{2\rho_{\text{крит}}} = \frac{\Omega_m}{2}. \quad (2.25)$$

Здесь $\Omega_m = \rho/\rho_{\text{крит}}$ – параметр плотности материи. Можно убедиться, что расширение действительно замедляется и параметр замедления q равен 0,5 для плоской модели, превышает 0,5 для закрытой модели и находится в интервале от 0 до 0,5 для открытой модели.

Из уравнений (2.10) и (2.11) также следует, что

$$H^2 r^2 (1 - \Omega_m) = A = \text{const}. \quad (2.26)$$

Ранее мы встречались с этой же формулой, но примененной к текущему моменту времени (2.15).

Обратите внимание, что из закона Хаббла (2.1) следует

$$\dot{r} = \dot{v} = \frac{d}{dt}(Hr) = \dot{H}r + Hr\dot{r} = \dot{H}r + Hv = r(\dot{H} + H^2), \quad (2.27)$$

что означает, что

$$q = -\left(\frac{\dot{H}}{H^2} + 1\right). \quad (2.28)$$

Таким образом, замедление означает не только уменьшение H , оно означает, что q положительно и $\dot{H} < -H^2$.

Величина Hq убывает при $q > 0$ согласно формулам (2.23) и (2.27). Это означает, что абсолютная величина отклонения Ω_m от единицы увеличивается при расширении Вселенной. Эти отклонения положительны для закрытой модели и отрицательны для открытой. Только плоская модель остается все время плоской. В любом случае модели Фридмана без космологической постоянной, или темной энергии, обеспечивают увеличение величины $|1 - \Omega_m|$.

2.7.4. Материя с ненулевым давлением в расширяющейся Вселенной



Рассмотрим объем V , заполненный материей с плотностью энергии ϵ и давлением p . Оба параметра изменятся, если мы сожмем или расширим этот объем, и сделают они это согласованно. Зависимость между давлением и плотностью энергии называется уравнением состояния. Мы уже обсуждали это в разделе 1.3. Уравнение состояния называется баротропным, если давление является функцией только плотности энергии $p = p(\epsilon)$.

Начнем с получения зависимости этих величин от объема. Для случая пылевидной материи эта зависимость имеет вид (2.8). Для того чтобы получить ее для материи с баротропным уравнением состояния, мы используем закон сохранения энергии, он же первый закон термодинамики, который имеет вид

$$dE = dQ - dA. \quad (2.29)$$

Здесь $E = \varepsilon V$ – внутренняя энергия материи, dE – ее изменение, dQ – количество тепла, поглощенного этой материей, а $dA = p dV$ – механическая работа, совершенная материей в ходе ее расширения.

Термодинамический процесс с $dQ = 0$ называется адиабатическим. Он не сопровождается передачей тепла внутрь или наружу системы. Чтобы сделать процесс адиабатическим, в лабораториях используется специальное оборудование для предотвращения передачи тепла в ту или иную сторону. В повседневной жизни мы используем термос, чтобы горячие или холодные напитки хранились в практически адиабатических условиях. Но никто не нуждается в термосе, чтобы сделать адиабатическим космологическое расширение. Действительно, температура в однородной Вселенной везде одинакова, поэтому не происходит никакой передачи тепла из одного места в другое, а передача тепла наружу невозможна, ведь Вселенная не имеет никакого «снаружи».

С учетом этого уравнение (2.29) сводится к

$$dE = d(\varepsilon V) = \varepsilon dV + V d\varepsilon = -dA = -p dV, \quad (2.30)$$

или

$$V d\varepsilon = -(\varepsilon + p) dV. \quad (2.31)$$

Зная баротропное уравнение состояния $p = p(\varepsilon)$, мы можем легко найти его решение:

$$\ln V = \text{const} - \int \frac{d\varepsilon}{\varepsilon + p(\varepsilon)}. \quad (2.32)$$

Особенно просто рассмотреть случай весьма популярного среди космологов уравнения состояния

$$p = w\varepsilon, \quad w = \text{const}. \quad (2.33)$$

Из формул (2.32), (2.33) и учитывая, что $V \sim r^3$, получаем:

$$\rho = \rho_0 \left(\frac{V}{V_0} \right)^{1+w} = \rho_0 \left(\frac{r}{r_0} \right)^{3(1+w)} = \rho_0 \left(\frac{a}{a_0} \right)^{3(1+w)} = \rho_0 (1+z)^{3(1+w)}. \quad (2.34)$$

Здесь ρ_0 – плотность материи в тот момент, когда сфера имела размер r_0 или Вселенная имела масштабный фактор a_0 . В релятивистской космологии это просто настоящий момент, или «сейчас». Так, плотность материи ρ зависит от ее текущего значения ρ_0 и отношения размеров, выраженного через красное смещение z . Случай пылевидной материи без давления соответствует $w = 0$. Подставляя это значение в уравнение (2.34), мы, как и следовало ожидать, получим уравнение (2.8).

Особый случай $w = -1$ или $p = -\varepsilon$ дает интересный результат. Уравнение (2.31) гарантирует, что в этом случае плотность энергии постоянна. Расширение или сжатие Вселенной не меняет ни плотность энергии ε , ни плотность вещества ρ , ни его давление p . Этот случай описывает космологическую постоянную Λ .

2.8. Современная модификация модели

2.8.1. Космологическая постоянная наносит ответный удар

Решения Фридмана побудили Эйнштейна отказаться не только от теории статической Вселенной, но также и от идеи космологической постоянной, которую он впоследствии называл величайшей ошибкой в своей жизни, согласно воспоминаниям его коллеги – физика Георгия (Джорджа) Гамова³⁶. Тем не менее другие ученые, занимающиеся новой наукой о

³⁶ «Много позже, когда я обсуждал космологические проблемы с Эйнштейном, он заметил, что введение космологического члена было самым большим промахом, который он когда-либо сделал в своей жизни. Но этот промах, отвергнутый Эйнштейном, даже сегодня все еще используется космологами, и космологическая постоянная, обозначаемая греческой буквой Λ , поднимает свою гадкую голову снова и снова» (Гамов, 1994. С. 42).

свойствах и эволюции Вселенной в целом – космологией, не спешили отказываться от космологической постоянной. Притом что к существованию Λ -члена космологи относились скептически, они рассматривали модели как без космологической постоянной, так и с ее учетом. Долгое время первый вариант хорошо описывал все астрономические данные, но потом ситуация изменилась. Астрономические наблюдения последних десятилетий подтвердили существование космологической постоянной и позволили измерить ее величину $\Lambda = 1,19 \times 10^{-52} \text{ м}^{-2}$.

Космологическую постоянную Λ можно рассматривать как некоторый экзотический вид среды с постоянной плотностью энергии ϵ_Λ , давлением p_Λ и плотностью вещества ρ_Λ , которые не изменяются в ходе космологического расширения. Причиной такого постоянства является отрицательная работа против отрицательной силы давления, которая сохраняет постоянство плотности энергии Вселенной $\epsilon = \rho c^2$. И действительно, давление, создаваемое космологической постоянной, отрицательно и характеризуется значением

$$-p_\Lambda = \epsilon_\Lambda = \rho_\Lambda c^2 = \frac{c^4 \Lambda}{8\pi G} \approx 6 \times 10^{-10} \text{ Дж/м}^3 = 0,6 \text{ нПа}. \quad (2.35)$$

Это означает, что космологическая постоянная имеет уравнение состояния $p_\Lambda = -\epsilon_\Lambda$, что является частным случаем более общего уравнения (2.33) $p = w \epsilon$ с $w = -1$.

Кроме того, такое уравнение состояния обеспечивает антигравитацию, или гравитационное отталкивание от такой среды. Мы наблюдаем его в виде ускоренного расширения Вселенной с отрицательным параметром замедления. В ранней Вселенной космологическая постоянная была такой же, как и сейчас, и это вряд ли повлияло на эволюцию Вселенной.

В ОТО существует решение, называемое метрикой де Ситтера или решением де Ситтера, описывающее однородное изотропное пространство-время без материи, но с космологической постоянной. Мы опишем его в разделе А.1. Оно имеет интересное свойство. Плотность среды, имитирующей космологическую постоянную, остается все время постоянной: $\rho_\Lambda = \text{const}$. Вселенная де Ситтера расширяется очень быстро, и расстояние между любыми двумя пробными частицами, помещенными в нее, будет возрастать. В некотором роде это похоже на Страну чудес Льюиса Кэрролла, где вы должны бежать так быстро, как вы можете, чтобы оставаться на месте.

Честно говоря, мы не можем быть уверены, что основная компонента нашей Вселенной точно описывается уравнением состояния $p = -\epsilon$. Реальное уравнение состояния может немного отличаться. Поэтому космологи предпочитают использовать более общее название «темная энергия». Ее плотность и давление могут изменяться в ходе космологического расширения, но не очень сильно по современным оценкам. Каждый год новые астрономические наблюдения накладывают все более строгие ограничения на уравнения состояния темной энергии, однако частный случай космологической постоянной до сих пор удовлетворяет этим ограничениям.

В любом случае темная энергия является источником антигравитации, которая обеспечивает наблюдаемое астрономами ускоренное расширение Вселенной.

Введение космологической константы изменило применимость трех решений Фридмана. Теперь одного параметра плотности материи недостаточно для определения окончательной судьбы Вселенной. Например, дополнительная сила гравитационного отталкивания, которую обеспечивает космологическая постоянная, допускает существование вечно расширяющейся замкнутой Вселенной.

2.8.2. Стандартная космологическая модель

Космологи используют выражение «стандартная космологическая модель» для названия модели, которая наиболее адекватно описывает эволюцию нашей Вселенной. Но в

разное время они подразумевали при этом разные модели. Полвека назад это были три модели Фридмана с некоторыми дополнительными деталями, разработанными Георгием Гамовым и его коллегами. Теперь под этими словами мы подразумеваем расширяющуюся Вселенную с темной энергией, или космологической постоянной, и практически пылевидной материей, которая включает в себя как обычное вещество, так и какой-то таинственный вид материи, называемый темной материей. В главе 4 мы опишем все, что сейчас известно о темной материи.

Современная стандартная космологическая модель названа Λ CDM-модель (произносится лямбда-си-ди-эм). При этом греческая буква Λ означает космологическую постоянную, а аббревиатура CDM обозначает cold dark matter, т.е. холодную темную материю. Вместе эти две загадочные компоненты обеспечивают 95 % содержания нашей Вселенной. Эта модель объясняет все известные эмпирические факты и не имеет никаких противоречий с астрономическими данными. Маловероятно, что эта модель принципиально изменится, и похоже, что дальнейший прогресс в технике наблюдений будет только обеспечивать все более точные значения ее параметров.

Мы предлагаем подробное описание этой модели в приложении А, потому что оно довольно длинно и содержит много математических выкладок, хотя и относительно простых. Оно содержит все формулы и оценки величин. Здесь же мы дадим краткое изложение результатов моделирования, используя новейшие наблюдательные оценки космологических параметров.

Вселенная родилась во время Большого взрыва $13,8 \times 10^9$ лет назад и расширяется до сих пор. Расширяться она будет вечно, или все закончится так называемым Большим разрывом (Big Rip), про который мы расскажем в разделе 5.2. Вселенная расширяется с ускорением с момента, когда ее масштабный фактор составлял 0,608 от его текущего значения, что соответствует красному смещению $z = 0,645$. Этот момент соответствует времени приблизительно $7,6 \times 10^9$ лет после Большого взрыва, или $6,2 \times 10^9$ лет тому назад.

На рис. 2.9 показано, как менялись с течением времени относительный масштабный фактор и постоянная Хаббла. Обратите внимание, что постоянная Хаббла бесконечна сразу после Большого взрыва, но, в отличие от плоской или открытой модели Фридмана, со временем стремится к постоянному ненулевому значению.

На рис. 2.10 показана зависимость красного смещения от времени. Как и постоянная Хаббла, красное смещение бесконечно при Большом взрыве.

На рис. 2.11 показано, как изменились с течением времени параметры плотности материи и темной энергии для плоской Λ CDM-модели. Так как их сумма в данном случае равна единице, этот график можно также рассматривать как изменение со временем массовой доли двух главных компонентов Вселенной.

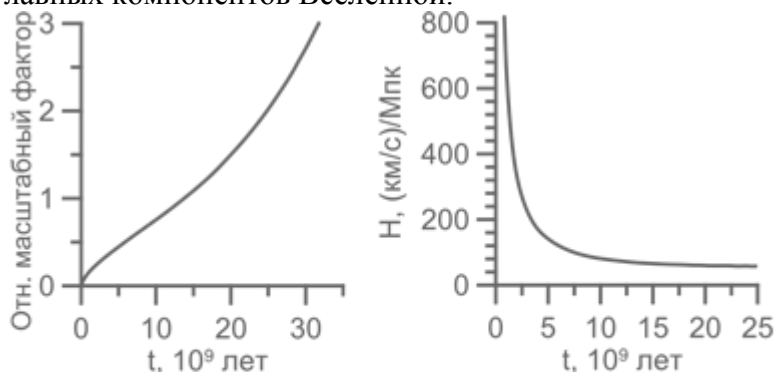


Рис. 2.9. Λ CDM-модель. Относительный масштабный фактор a (слева) и постоянная Хаббла H (справа) в зависимости от времени, прошедшего с момента Большого взрыва t

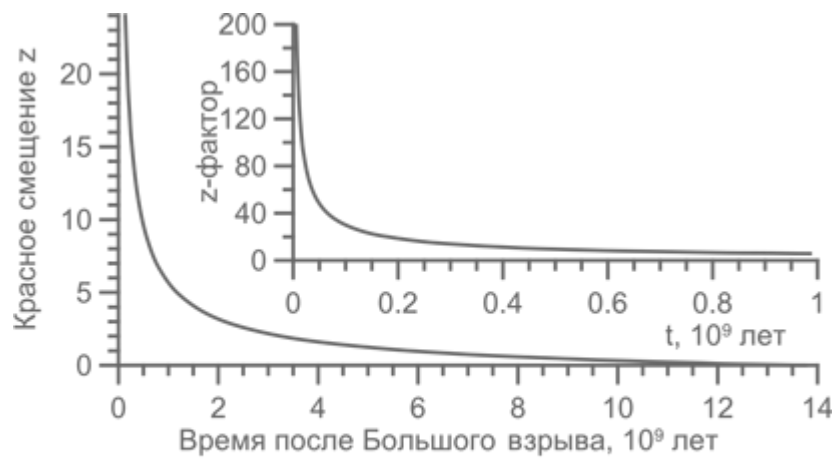


Рис. 2.10. Λ CDM-модель. Красное смещение z в зависимости от времени с момента Большого взрыва t

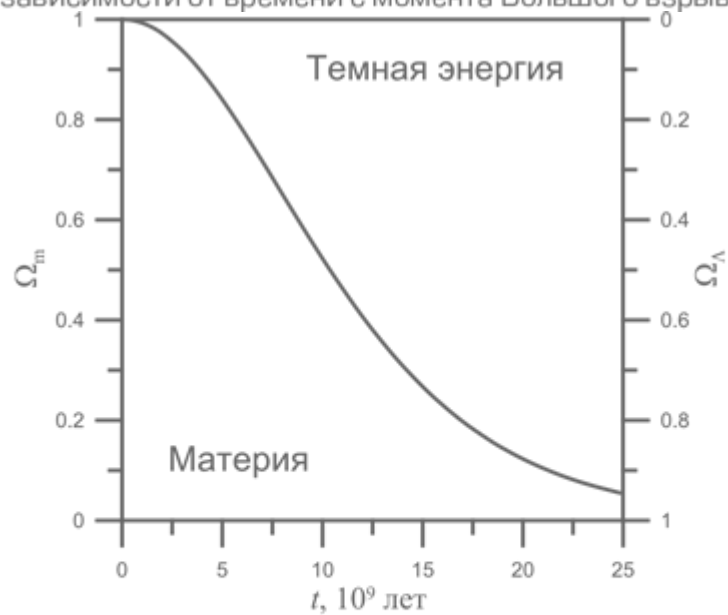


Рис. 2.11. Плоская Λ CDM-модель.

Параметры плотности вещества Ω_m и космологической постоянной Ω_Λ изменяются в зависимости от времени с момента Большого взрыва t .

Их сумма равна единице

Вопрос: В какую сторону изменяется постоянная Хаббла?

Ответ: Если бы не существовало космологической постоянной, то постоянная Хаббла непрерывно бы уменьшалась, как это получается из решения Фридмана. Если бы во Вселенной не было материи, но существовала космологическая постоянная, то, как следует из решения, полученного Виллемом де Ситтером в 1917 г., постоянная Хаббла была бы действительно постоянной. В реальной Вселенной, где присутствуют и материя, и космологическая постоянная, постоянная Хаббла уменьшается, но не достигнет нулевого значения.

Вопрос: Если галактики разбегаются из-за расширения Вселенной, почему мы не наблюдаем расширение пространства в пределах Солнечной системы?

Ответ: Приведем простую оценку. Критическая плотность Вселенной соответствует концентрации порядка 5 нуклон/м³, в то время как концентрация самого разреженного объекта Солнечной системы – солнечного ветра – на орбите Земли составляет в среднем около 8 нуклон/см³, что более чем в миллион раз больше. А между

тем эта плотность является сверхглубоким вакуумом, недостижимым в лабораторных условиях. Средняя же плотность вещества в Солнечной системе на много порядков больше. Понятно, что влияние космологического расширения просто теряется на фоне колоссальных сил взаимного притяжения, действующих в Солнечной системе. Строго говоря, согласно оценкам, сделанным в 1998 г. Фредом Куперстоком с коллегами, влияние космологического расширения привело к тому, что за время существования Солнечной системы радиус орбиты Земли увеличился на 10–24 долю, т. е. на 150 фм, что меньше размера атома водорода.

2.9. Расстояния в астрономии

Значение параметра Хаббла, полученное самим Хабблом, составляло около 500 (км/с)/Мпк, что примерно в 7 раз больше современной оценки. Ошибка была связана с неправильным определением расстояний до галактик. Дело в том, что расстояния в астрономии определяются довольно сложным образом. Нередко мы куда точнее знаем отношение расстояний до объектов, чем их абсолютные значения. Так, из закона Кеплера можно с большой точностью получить отношение диаметров орбит разных планет Солнечной системы. Однако для определения абсолютных величин нужно измерить расстояние до Солнца хотя бы одной планеты, например Земли. Поэтому астрономы ввели специальную единицу измерения расстояния, называемую астрономической единицей (а.е.), которая равна среднему расстоянию от Земли до Солнца. Через нее выражается парсек. В то время астрономы знали диаметры орбит планет Солнечной системы в астрономических единицах с куда большей точностью, чем значение самой астрономической единицы. Уточняя значение астрономической единицы (современная оценка 1 а.е. = 149 978 707 км), астрономы одновременно уточняли и абсолютные расстояния. Для внегалактической астрономии роль «линейки» играли расстояния, полученные по периодам изменения особого класса переменных звезд, называемых цефеидами. Именно они и использовались Хабблом для определения расстояния до галактик. Однако в то время было неизвестно, что существует несколько разных типов цефеид, причем цефеиды, наблюдавшиеся в других галактиках, были другого типа, чем те, которые использовались для определения масштаба расстояний в нашей Галактике. В результате оценки возраста Вселенной, основанные на значении постоянной Хаббла, полученной им самим, составляли всего пару миллиардов лет, что было меньше возраста некоторых геологических пород на Земле.

Отметим, что не стоит применять закон Хаббла $v = H_0 r$ для объектов, находящихся на больших расстояниях. Дело в том, что из-за кривизны пространства и ряда других факторов понятия расстояния и скорости становятся не столь очевидными, как в плоском пространстве. В частности, вводятся несколько видов расстояний, которые мало отличаются для близких объектов, но могут существенно отличаться для далеких. А разным расстояниям соответствуют разные скорости.

Точно ли выполняется закон Хаббла? Конечно же, нет. За примерами далеко ходить не нужно: ближайшая к нам галактика Андромеды движется по направлению к нам, т. е. ее лучевая скорость отрицательна. Закон Хаббла получен статистически и описывает только ту часть скорости, которая связана с расширением Вселенной. Кроме нее галактики участвуют в нехаббловских движениях, связанных с неоднородностями плотности, проще говоря – падают на области с повышенной плотностью. Такие области в астрономии называются аттракторами. Ближайшим к нам аттрактором является скопление галактик в созвездии Девы, дальше – так называемый Великий аттрактор (это название он получил, когда о других аттракторах еще не знали), расположенный в созвездиях Гидры, Кентавра, Павлина, Индейца и Телескопа, в противоположном от него направлении – сверхскопление Персея – Рыб, и еще дальше, позади Великого аттрактора, – сверхскопление Шепли, находящееся в созвездии Кентавра на расстоянии около 650 млн св. лет. Безусловно, аттракторы имеются и на

больших расстояниях. Существуют и области пониженной плотности – пустоты или войды. Они приводят к появлению нехаббловских движений по направлению от войдов.

Разделить хаббловскую и нехаббловскую компоненты скорости очень сложно, особенно для близких галактик. К счастью, скорости нехаббловских движений обычно не очень велики и для галактик на расстоянии 100–200 Мпк закон Хаббла выполняется с большой точностью. С его помощью определяют один из видов расстояния (их довольно много) до далеких галактик, которое называется расстоянием по красному смещению.

Но куда чаще астрономы просто приводят красное смещение, как величину, непосредственно измеряемую при наблюдениях, и не указывают рассчитанное по нему расстояние до галактик.

Красное смещение дает одно из двух дополняющих друг друга современных решений парадокса Ольберса. Свет от далеких галактик испытывает красное смещение, в результате чего падает его энергия и спектр смещается в невидимую для человеческого глаза область длин волн.

Глава 3 **Ранняя Вселенная**

3.1. Большой взрыв

Итак, к 1930-м гг. стало понятно – Вселенная расширяется, что наглядно проявляется в разбегании галактик. Но ответ на вопрос о том, имела ли Вселенная начало, называемое также Большим взрывом, был не столь очевиден, как кажется на первый взгляд. Концепция Большого взрыва была предложена Леметром в 1931 г., а сам термин был предложен Фредом Хойлом в 1949 г.³⁷

Дело в том, что значение постоянной Хаббла в прошлом могло значительно отличаться от современного. Если бы оно было больше, это означало, что оценка времени существования Вселенной является завышенной и Большой взрыв неизбежно должен был быть. С подобной ситуацией мы имеем дело во всех типах модели Фридмана, в которых постоянная Хаббла падает по мере увеличения возраста Вселенной, отсчитываемого от Большого взрыва. Закон, по которому меняется постоянная Хаббла, зависит от того, чем преимущественно заполнена Вселенная. Если Вселенная заполнена так называемой «холодной» материей, т. е. частицами и объектами, скорости которых существенно меньше скорости света, например звездами, пылью, межзвездным газом, то падение постоянной Хаббла происходит по одному закону. Если материя представлена в виде частиц, движущихся со скоростью, равной (например, фотонов – квантов электромагнитного излучения) или близкой (например, нейтрино, которое, по современным представлениям, имеет малую ненулевую массу покоя) к скорости света, то падение происходит быстрее. В любом случае в момент Большого взрыва постоянная Хаббла для модели Фридмана бесконечно велика.

Но если постоянная Хаббла была меньше, чем в настоящее время, можно допустить ситуацию, когда галактики разлетались до современного состояния в течение бесконечного промежутка времени, т. е. в таких моделях Вселенная существовала всегда и Большого взрыва просто не было. Примером таких моделей является решение де Ситтера, в котором Вселенная пуста, но существует космологическая постоянная. В этом случае размеры Вселенной экспоненциально возрастают со временем, т. е. раньше она была существенно меньше. В этой модели нет Большого взрыва. Однако против моделей без Большого взрыва

³⁷ Фред Хойл был противником идеи о том, что Вселенная имела начало, и термин «Большой взрыв» был первоначально использован в уничижительном контексте.

существует, казалось бы, убедительный аргумент. Раз галактики разбегаются, то в прошлом они располагались ближе друг к другу. Отправляясь во все более далекое прошлое, мы получаем Вселенную с очень большой плотностью материи.

Тем не менее астрономы придумали модель вечно расширяющейся Вселенной, в которой в прошлом мы наблюдали бы точно такую же картину, как и сейчас. Эта удивительная модель, предложенная Фредом Хойлом и Джаянтом Нарликармом, называется стационарной и имеет черты как статической модели Эйнштейна (ничего не меняется со временем), так и динамической модели Фридмана (Вселенная расширяется). Создатели этой теории выдвинули так называемый «идеальный космологический принцип», или абсолютный принцип Коперника. Обычный принцип Коперника утверждает, что свойства Вселенной одинаковы во всех точках пространства. Этот принцип возник из осознания того, что Земля не является центром Вселенной и ее расположение не является чем-то особенным. «Идеальный» космологический принцип добавляет к этому независимость от времени. Стремление к идеальному миру в сочетании с отсутствием в то время прямых доказательств существования Большого взрыва привело к появлению таких странных идей.

Для того чтобы при расширении Вселенной плотность не падала, понадобилось предположить, что материя возникает из ничего равномерно во всей Вселенной, причем с такой скоростью, чтобы компенсировать разрежение, вызванное расширением. Эта теория непрерывного творения материи может быть описана также в более завуалированном виде. Предположим, что во Вселенной существует неизвестное пока науке поле, названное С-полем (от английского слова creation – создание), которое, с одной стороны, обеспечивает расширение Вселенной, а с другой – может превращаться в обычную материю, обеспечивая ее непрерывную генерацию. Расчеты показали, что, согласно этой теории, в 1 м³ должен рождаться один атом водорода за миллиард лет.

Основополагающие статьи о стационарной космологии были опубликованы Германом Бонди, Томасом Голдом и Фредом Хойлом в 1948 г. Как ни странно, эта теория до сих пор имеет некоторое число сторонников во главе с Нарликармом, одним из ее авторов, которые пытаются объяснить современные космологические данные, используя стационарную модель в XXI в. Подробный рассказ о развитии этой теории можно найти в обзоре Хельги Краг (Kragh, 2012). Следует отметить, что существует весьма небольшое число ученых, отрицающих Большой взрыв.

Теория Большого взрыва была детально проработана. Это сделал уроженец Одессы Георгий (Джордж) Гамов. Советский физик, член-корреспондент Академии наук СССР, он со своей семьей бежал на Запад, где продолжал заниматься физикой. В рамках теории Большого взрыва он подробно рассмотрел все стадии, которые прошла Вселенная на раннем этапе своего существования. Теория отвечала на вопрос, какие частицы и в каком количестве заполняли Вселенную в каждый момент времени, как менялась ее температура, как происходил нуклеосинтез, т. е. образование ядер более тяжелых элементов из более легких элементов.

Это была первая космологическая модель, которая не ограничивалась решением уравнения Эйнштейна. Она использует космологическое решение Фридмана, но особое внимание уделялось тому, чем была заполнена Вселенная на разных стадиях своего развития и какие процессы при этом происходили. Содержимое Вселенной влияло на скорость ее расширения, так что и расширение Вселенной, и эволюцию заполняющей ее материи надо было исследовать одновременно.

Все предсказания теории Гамова, которые можно было проверить по астрономическим данным, подтверждались, а открытие реликтового излучения стало решающим аргументом в пользу ее правоты. С тех пор в продолжение десятилетий космологи называли теорию Гамова стандартной космологической моделью, поскольку она лежала в основе всех космологических расчетов. Отдельные детали уточнялись, но существенной переработке не подвергались. По справедливости, Гамов должен был бы разделить Нобелевскую премию по физике 1978 г. с Пензиасом и Уилсоном, но Гамов умер в 1968 г., а Нобелевскую премию

нельзя получить посмертно³⁸.

Но вернемся к стандартной космологической модели, которая сама по себе, безусловно, заслуживала Нобелевской премии. Популярное изложение выводов этой модели можно найти во многих книгах, в том числе научно-популярных. Бестселлером в свое время стала книга лауреата Нобелевской премии Стивена Вайнберга «Первые три минуты» (Вайнберг, 1981), в которой описаны первые три минуты существования нашей Вселенной, согласно теории Гамова.

Вопрос: Где именно произошел Большой взрыв?

Ответ: Нередко этот вопрос можно услышать даже от профессиональных физиков. Ответ на него прост: выберите любую точку по своему вкусу, например кончик вашего носа. Именно в этой точке произошел Большой взрыв. Впрочем, любая другая точка нашей Вселенной ничуть не хуже, поскольку в ней также произошел Большой взрыв, причем в то же самое время. История любой точки, уходящая в прошлое (еще ее называют мировой линией), рано или поздно упрется в Большой взрыв. Причиной этого вопроса, по-видимому, служат кадры научно-популярных фильмов, которые нередко иллюстрируют Большой взрыв, показанный снаружи. В реальной Вселенной Большой взрыв нельзя наблюдать снаружи, поскольку этого самого «снаружи» просто не существует. Если проводить аналогию со взрывом бомбы, то это не взрыв бомбы, наблюдаемый со стороны, а взрыв бомбы с точки зрения микробов, живущих внутри нее, хотя эта аналогия не совсем верна, поскольку бомба не является точечным объектом.

Вопрос: Применимы ли законы физики к описанию Большого взрыва?

Ответ: С точки зрения математики момент Большого взрыва является тем, что называется сингулярностью или особенностью. К Большому взрыву также применяют термин «космологическая сингулярность в прошлом». Вблизи такой сингулярности кривизна пространства-времени стремится к бесконечности.

Тут необходимо сделать небольшое отступление. Дело в том, что современная наука исходит из предположения, что повсюду в наблюдаемой части Вселенной законы физики одинаковы. Несмотря на постоянно проводимые проверки этого предположения, пока не возникло обоснованных сомнений в его справедливости. При этом слово «наблюдаемой» упомянуто не просто так, поскольку, согласно некоторым теориям, за космологическим горизонтом законы физики могут быть совершенно другими. Об этом будет подробно написано в конце этой главы.

Теперь вернемся к Большому взрыву. Современная наука не может описать состояние Вселенной сразу после него, поскольку соответствующие теории (например, квантовая гравитация) еще не созданы. Тем не менее мы надеемся, что существующие теории могут вполне удовлетворительно описать Вселенную, возраст которой существенно превышает планковскую единицу времени, приблизительно равную 10–42 с. Слова «мы надеемся» стоят здесь из-за того, что мы вряд ли когда-нибудь сможем наблюдать что-либо, относящееся к столь ранней стадии существования Вселенной.

Вопрос: Почему произошел Большой взрыв?

Ответ: Подобный вопрос легко задать, но на него трудно ответить. Большинство космологов считают, что Большой взрыв – результат квантовых эффектов, например

³⁸ Заметим, что кроме стандартной космологической модели Гамов получил и другие результаты, достойные Нобелевской премии, например создал теорию альфа-распада ядер. Трудно сказать, счел ли Нобелевский комитет этот результат недостаточно важным для Нобелевской премии или не захотел ссориться с Советским Союзом, который был бы явно не в восторге, если бы премию вручили невозвращенцу. Любопытно, что теоретически он мог также претендовать и на Нобелевскую премию по физиологии и медицине за объяснение принципов записи информации в ДНК триплетами нуклеотидов.

квантовой флуктуации или квантового туннельного перехода.

Вопрос: Как гигантская Вселенная с множеством галактик могла образоваться в результате квантовой флуктуации?

Ответ: Начнем с удивительного факта, касающегося гигантской Вселенной с миллионами галактик. Известно, что атомное ядро имеет массу меньше, чем суммарная масса составляющих его протонов и нейтронов, что, собственно, и является причиной их существования. Это явление называется ядерным дефектом (еще говорят – дефицитом) массы. Масса в соответствии с формулой $E = mc^2$ уменьшается на энергию ядерных взаимодействий, деленную на квадрат скорости света. В нашей Вселенной этот эффект незначителен. Но в гравитационном поле существует свой, гравитационный, дефицит масс. Поэтому масса Вселенной равна массе составляющей ее материи минус гравитационный дефицит массы. Для замкнутой Вселенной полную массу запомнить очень просто: она равна нулю. Гравитационный дефект массы полностью компенсирует массу материи.

А образовать путем квантовой флуктуации объект с нулевой массой уже не кажется такой невозможной вещью.

Вопрос: Почему не образуются новые вселенные внутри нашей Вселенной?

Ответ: Это вовсе не факт. Существуют гипотезы о том, что новые вселенные рождаются постоянно. Возможно, что, пока вы читали это предложение, на расстоянии менее километра от вас образовалась новая вселенная. Но для внешнего наблюдателя эта вселенная схожа с экзотической элементарной частицей. Подобные частицы Моисей Марков называл фридмонами.

Вопрос: Что было до Большого взрыва?

Ответ: На этот вопрос современная наука не может дать никакого ответа. Если кто-то утверждает, что знает ответ, он, скорее всего, ошибается. Один из элегантных способов уйти от ответа на этот вопрос состоит в том, чтобы сказать, что время появилось вместе с нашей Вселенной и понятия «до Большого взрыва» просто не существует.

3.2. Реликтовое излучение: эхо Большого взрыва

Вопрос о том, был ли Большой взрыв, окончательно отпал после открытия реликтового излучения (космического микроволнового фонового излучения, реликта) Арно Пензиасом и Робертом Уилсоном в 1965 г. Это то излучение, которое было испущено в момент рекомбинации водородной плазмы. Это самое древнее явление, которое когда-либо наблюдало человечество.

Само существование реликтового излучения являлось убедительным доказательством того, что Большой взрыв действительно имел место. Кроме того, оно дало ответ еще на один вопрос. Это вопрос о том, как выглядела Вселенная сразу после Большого взрыва. Согласно наиболее распространенной гипотезе, Вселенная в момент своего рождения была очень горячей, и эта температура падала по мере ее расширения. Альтернативная точка зрения, предложенная Яковом Зельдовичем, основывалась на том, что Вселенная родилась холодной. В этом случае ее средняя температура никогда не превышала температуры ионизации атомов водорода, она никогда не была заполнена протонно-электронной плазмой, не было момента рекомбинации, и, соответственно, не было реликтового излучения. Открытие реликтового излучения расставило все точки над *i*. Вселенная не только родилась, но и родилась горячей или стала таковой за мельчайшую долю секунды.

Итак, на самых ранних этапах своего существования Вселенная была очень горячей, но температура во время ее расширения падала. Довольно быстро образовались протоны и альфа-частицы, которые являются также ядрами водорода и гелия. Вместе с электронами они

существовали в виде высокотемпературной плазмы, которая поглощала свет и другое электромагнитное излучение Вселенной. Вселенная постепенно охлаждалась, и через примерно 380 000 лет после Большого взрыва ее температура достигла температуры ионизации водорода (3000 К). Замедлившиеся электроны объединились с замедлившимися протонами и альфа-частицами, образовав атомы водорода и гелия. Этот процесс называется рекомбинацией. Материя, заполняющая Вселенную, перешла из плазмы в газообразное состояние. Вселенная быстро стала прозрачной для света и с тех пор навсегда оставалась таковой.

Тепловое излучение того периода можно наблюдать непосредственно в виде реликта. Первоначально оно имело планковский спектр, т. е. спектр излучения абсолютно черного тела, нагретого до температуры около 3000 К. С этого времени Вселенная расширилась примерно в 1100 раз, а вместе с ней и длины волн этого излучения.

Образование звезд, галактик и квазаров сопровождалось повторным появлением плазмы, появившейся из-за их излучения. Эта так называемая реионизация произошла от 550 до 800 млн лет после Большого взрыва (z от 15 до 6,5) и оказала слабое влияние на спектр реликтового излучения.

3.2.1. Открытие реликтового излучения

Пензиас и Уилсон сделали свое открытие совершенно случайно в ходе настройки сверхчувствительной 6-метровой рупорной антенны, построенной для приема сверхслабых сигналов, отраженных от спутника «Эхо». Этот спутник представлял собой 30,5-метровую надувную полиэтиленовую металлизированную сферу и служил для подтверждения возможности передачи сигналов через космос. В какой-то степени его можно считать прообразом современных телекоммуникационных спутников. Сигналы, отраженные от этого спутника, были настолько слабыми, что для их приема Пензиасу и Уилсону нужно было устранить все возможные помехи. Помимо стандартных методов борьбы с помехами они также охладили приемник жидким гелием до температуры 4 К.

Обработав полученные данные, Пензиас и Уилсон обнаружили слабый, но постоянный и очень загадочный шум с амплитудой, в 100 раз превышающей ожидаемый уровень. Этот шум присутствовал днем и ночью и был равномерно распределен по небесной сфере. Они оценили длину его волны в 7,35 см, что не соответствовало ни одному известному источнику ни на Земле, ни на Солнце, ни в нашей Галактике. Даже после тщательных проверок всего оборудования, а также очистки антенны от голубиных гнезд и помета таинственный шум не исчезал. Именно тогда друг Пензиаса Бернارد Бурк познакомил их с теоретиками Робертом Дикке, Джимом Пиблзом и Дэвидом Вилкинсоном из Принстонского университета, которые поняли истинное значение этого открытия. Забавно, что Пензиас и Уилсон использовали радиометр, разработанный Дикке специально для поисков реликтового излучения, тем самым обойдя создателя этого прибора. Статья Пензиаса и Уилсона «Измерение избыточной антенной температуры на уровне 4080 мегациклов в секунду» принесла им в 1978 г. Нобелевскую премию по физике.

Как ни странно, Пензиас и Уилсон не были первыми, кто обнаружил реликтовое излучение. На самом деле оно было впервые обнаружено в 1941 г. Эндрю Макмилланом, а затем в 1957 г. аспирантом-радиоастрономом Пулковской обсерватории Тиграном Шмаоновым, однако ни один из них не осознал важность открытия. Некоторые историки науки утверждают, что были даже более ранние открытия (см., например, (Ассис и Невес, 1995)), самое старое из них датируется XIX в.

Эта история лишней раз подтверждает важность взаимодействия между теоретиками и экспериментаторами. Ведь, не покажи тогда Бурк Пензиасу препринт статьи Пиблза, это открытие так и осталось бы пылиться на полках архивов. Вспомнили бы о нем лишь спустя много лет, после присуждения другим людям (скорее всего, Дикке, Пиблзу и Вилкинсону) Нобелевской премии за открытие реликтового излучения, как это произошло с открытием

Шмаонова, а имена Пензиаса и Уилсона были бы известны лишь их родственникам, друзьям и коллегам да, возможно, немногочисленным исследователям истории науки. Причем Пензиас и Уилсон занимались сугубо прикладными исследованиями, связанными с решением технологической задачи, и присуждение им Нобелевской премии за столь фундаментальный результат является исключительным случаем.

3.2.2. Анизотропия реликтового излучения

Дальнейшие исследования реликтового излучения показали, что это излучение не так однородно, как казалось вначале. В 1968 г. Мартин Рис и Деннис Сиама, а в 1969 г. Рашид Сюняев и Яков Зельдович теоретически разработали два разных механизма, которые должны приводить к анизотропии³⁹ реликтового излучения. В 1977 г. Джордж Смут с коллегами экспериментально обнаружил дипольную составляющую анизотропии по данным измерений реликтового излучения с борта высотного самолета-разведчика U-2.

Что такое дипольная асимметрия? Представьте, что вы стоите на открытом воздухе в безветренный день. Вы не чувствуете давления воздуха, поскольку оно действует одинаково со всех сторон, т. е. изотропно. Теперь вы начинаете двигаться вперед и можете четко ощущать повышение давления спереди и понижение давления сзади, потому что молекулы ударяют по вам спереди сильнее и чаще, чем сзади. Это пример дипольной асимметрии, при которой имеется направление, в котором изменяется некая величина, но она неизменна в любом перпендикулярном ей направлении. Более сложной является квадрупольная асимметрия. Вы можете ее продемонстрировать, поставив два одинаковых вентилятора, которые дуют на вас спереди и сзади.

Объяснить найденную дипольную составляющую анизотропии реликтового излучения можно следующим образом: в некоторой системе отсчета эта дипольная составляющая равна нулю, но Земля движется вокруг Солнца, Солнце – вокруг центра Галактики, а Галактика падает на скопление в созвездии Девы и другие области концентрации плотности – аттракторы. При этом возникает эффект Доплера, приводящий к тому, что видимая температура реликтового излучения в направлении движения Земли повышается, а в противоположном направлении – понижается. Существует система отсчета, в которой обнуляется дипольная компонента реликтового излучения. Относительно нее Солнце движется со скоростью 371 км/с в направлении созвездия Льва. Сейчас именно эту систему отсчета используют для анализа космологических данных.

Таким образом, репутация принципа относительности Галилея, который утверждает, что законы движения одинаковы во всех инерциальных системах отсчета, «несколько подмочена», поскольку теперь у нас имеется выделенная система отсчета, которая «лучше» других систем отсчета, движущихся относительно нее с постоянной скоростью. В определенном смысле это можно было бы рассматривать как воскрешение идей давно забытой теории эфира, постулирующей, что выделенной является система, в которой эфир неподвижен. Это, однако, не означает, что мы должны вернуться к принципиально ошибочной теории эфира.

3.2.3. Космология выходит в космос

Принципиальный шаг в исследовании свойств реликтового излучения был связан с использованием космических аппаратов. К этому моменту астрономы уже вывели в космос свои инструменты, используя специальные астрономические спутники. Вывод астрономических инструментов за пределы атмосферы решил две задачи. В тех диапазонах электромагнитного излучения, где атмосфера прозрачна, например для видимого света,

³⁹ Анизотропия — это отсутствие изотропности, т.е. зависимость некоторой величины от направления.

атмосфера все-таки портит качество изображения за счет флуктуаций плотности и других явлений. Все мы знаем, что звезды на небе мерцают. Этот эффект связан исключительно со свойствами атмосферы и, естественно, мешает качественным наблюдениям звезд. Астрономы по мере возможности боролись с этой помехой, располагая телескопы высоко в горах, но к описываемому времени все, что мог дать этот метод, было давно исчерпано.

Что касается тех диапазонов, где атмосфера непрозрачна, то выход в космос открыл невиданные до тех пор перспективы. Основными из таких диапазонов являются инфракрасный, ультрафиолетовый и рентгеновский. Кое-что в этих диапазонах умудряются наблюдать и на Земле. Например, чтобы наблюдать в инфракрасном диапазоне, астрономы отправляются в Антарктиду, которая имеет не только очень низкую температуру воздуха, но и расположена на высоте нескольких километров над уровнем моря.

В случае реликтового излучения ни одна из этих причин не была принципиальной. Атмосфера прозрачна для того диапазона, в котором его наблюдают, в противном случае Пензиас и Уилсон просто ничего бы не обнаружили. Флуктуации в атмосфере могут привести к отклонениям, но на достаточно небольшой угол. Для астрономии это важно, но в то время исследователи реликтового излучения пытались обнаружить какую-либо анизотропию. Проблема была связана с другим фактором. Сейчас мы знаем, что отклонения в температуре реликтового излучения, приходящего из разных участков небесной сферы, отличаются где-то на уровне 10–4 К. Для измерения таких тонких отличий необходимо избавиться от других источников излучения с длиной волн 7,35 см. Реликтовое излучение похоже на излучение от черного тела, нагретого до температуры около 3 К, если про такое тело можно сказать «нагрето». Для нас оно, скорее, охлаждено до –270 °С. К сожалению, сама атмосфера, а также большинство тел при комнатной температуре сильно излучают на этой длине волны. Для того чтобы минимизировать их влияние, космологи установили свои инструменты на высотных воздушных шарах, но те могут одновременно измерить лишь излучение небольшого участка неба.

Именно поэтому для обнаружения дипольной компоненты реликтового излучения понадобился высотный самолет-разведчик. Но космологов больше интересовали флуктуации, не сводящиеся к движению Земли относительно реликтового излучения. Для их поиска использовали воздушные шары с приборами, которые летали продолжительное время в верхних слоях атмосферы.

Выход космологии в космос был связан с запуском в 1983 г. советского космического аппарата «Прогноз-9» с комплексом аппаратуры «Реликт-1» на борту. Он осуществил первые измерения реликтового излучения из космоса. К сожалению, недостаточная чувствительность радиометра и тот факт, что измерения проводились на фиксированной частоте 37 ГГц, привели к сильному затягиванию процесса обработки данных. Тем не менее авторам эксперимента удалось получить ограничения на уровень анизотропии⁴⁰. А в 1989 г. американцами был запущен уже целый космический аппарат COBE (сокращение от COsmic Background Explorer), предназначенный для исследования реликтового излучения. Он использовал модифицированную версию того самого дифференциального радиометра, который был установлен на борту U-2. Первые 15 минут его работы дали больше информации о спектре реликтового излучения, чем было получено за всю историю наземных измерений. В частности, было окончательно подтверждено, что спектр реликтового излучения является планковским⁴¹. Именно спутник COBE впервые обнаружил анизотропию реликтового излучения, уровень которой был принципиально важен для

⁴⁰ Температуру реликтового излучения, как и любую другую величину, можно представить в виде суммы изотропной и анизотропной составляющей. Уровень анизотропии представляет собой отношение величины анизотропного компонента к общему значению этой величины.

⁴¹ Иными словами, его спектр совпадал со спектром теплового излучения абсолютно черного тела с определенной температурой.

выбора между разными космологическими моделями.

Интересно, что, несмотря на 6-летнюю разницу в дате запуска, результаты этих двух космических экспериментов были опубликованы практически одновременно: COBE – в апреле, а «Реликта-1» – в мае 1992 г. При этом изначально в результате обработки данных эксперимента «Реликт-1» анизотропия не была обнаружена, а лишь ограничена сверху, но после того, как стали предварительно известны результаты COBE с оценкой спектра анизотропии, авторы эксперимента «Реликт-1» направили в печать новые результаты, в которых анизотропия уже присутствовала. По иронии судьбы, их статьи со старыми и новыми выводами были опубликованы в одном и том же номере журнала *Monthly Notices of Royal Astronomical Society*, что вызвало определенный скепсис.

Результаты, полученные со спутника COBE, оказались настолько важны, что в 2001 г. был запущен новый, более совершенный космический аппарат WMAP⁴² (сокращение от *Wilkinson Microwave Anisotropy Probe*), блестяще подтвердивший результаты COBE, но с несравненно более высокой точностью. А в 2006 г. главные разработчики эксперимента COBE – Джордж Смут и Джон Мэзэр – получили Нобелевскую премию по физике. Данные экспериментов COBE и WMAP легли в основу большого количества научных исследований, во многом изменив наши представления о Вселенной.

Но история исследования реликтового излучения далека от своего завершения. В 2009 г. был запущен новый космический аппарат «Планк», превосходящий космический аппарат WMAP в 10 раз по чувствительности и в три раза по угловому разрешению. Кроме того, он проводит измерения в большем числе спектральных диапазонов. 5 июля 2011 г. появилось первое изображение всего неба, полученное этим аппаратом.

«Планк» подтвердил результаты COBE и WMAP, за исключением несколько более низкой оценки постоянной Хаббла – $67,80 \pm 0,77$ (км/с)/Мпк против $69,32 \pm 0,80$ (км/с)/Мпк у WMAP. Это привело к пересмотру значений величин, которые зависят от постоянной Хаббла. Карта температурных флуктуаций⁴³ (после удаления дипольной составляющей и галактических источников), наблюдаемых миссией «Планк» приведена на рис. 3.1.

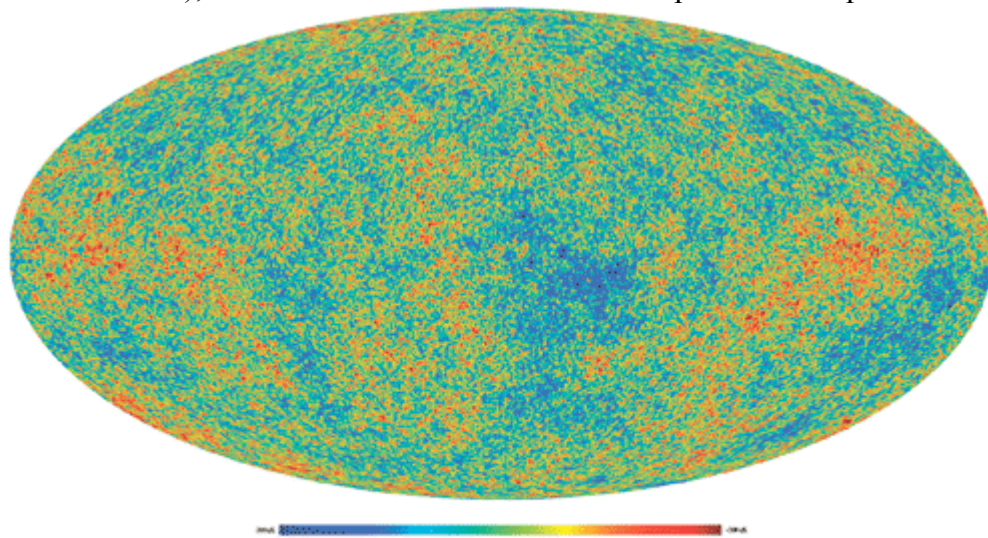


Рис. 3.1. Карта температурных флуктуаций реликтового излучения.
Изображение: Европейское космическое агентство / «Планк»

⁴² Первоначально он назывался *Microwave Anisotropy Probe* (MAP); фамилия Вилкинсон была добавлена позже в честь Дэвида Тодда Вилкинсона, который скончался на второй год миссии.

⁴³ Флуктуации — это вариации значений некоторого физического параметра в различных точках в пространстве или во времени. В нашем случае имеется в виду различие в измеренной температуры реликта в различных направлениях в небе из-за случайных причин.

3.2.4. Наземные наблюдения реликтового излучения

Успехи наблюдения реликтового излучения из космоса дополняются наземными исследованиями. Они обеспечивают данные по анизотропии реликтового излучения на меньшем угловом расстоянии, чем могли обеспечить космические аппараты COBE, WMAP и «Планк».

Еще до запуска WMAP, в 1998–1999 гг., был осуществлен эксперимент MAXIMA, представляющий собой блок болометров (приборов, измеряющих энергию падающего электромагнитного излучения), установленных на высотном воздушном шаре. Каждый из двух полетов длительностью 8 часов происходил на высоте 40 км. Угловое разрешение составляло 10 угловых минут. Для сравнения: угловое разрешение WMAP изменяется от 13,2 до 52,8 угловых минут в зависимости от частотного диапазона. Блок приемников охлаждался до температуры 0,1 К при помощи четырехслойной системы охлаждения. Внешний слой охлаждался жидким азотом, два средних – жидким гелием до температуры 2–3 К, а во внутреннем слое использовался жидкий изотоп ^3He , обеспечивающий рабочую температуру приемников. К 2000 г. эксперимент обеспечил наиболее точные измерения мелкомасштабных флуктуаций реликтового излучения, хотя и на небольшом участке неба. В частности, на основании данных эксперимента MAXIMA было определено, что плотность обычной материи во Вселенной составляет 4–5 %, что соответствует предсказаниям современной космологической модели.

С этим экспериментом тесно связан эксперимент BOOMERANG, в ходе которого в 1998 г. с помощью телескопа, поднятого над Антарктидой на воздушном шаре на 10 суток, проводилось изучение реликтового излучения. Эксперимент показал, что пространственная геометрия Вселенной должна быть плоской, и поддержал гипотезу о том, что она будет расширяться вечно. Кроме эксперимента BOOMERANG в Антарктиде проводились также и наземные эксперименты по изучению реликтового излучения. Одним из наиболее успешных экспериментов был DASI, который впервые обнаружил и измерил поляризацию реликтового излучения. Впоследствии на его месте был расположен другой прибор – QUAD, продолживший поляриметрические измерения. Наиболее же точные на сегодняшний день измерения реликтового излучения были проведены в рамках эксперимента ACBAR⁴⁴.

Что же мы имеем в результате всех этих многочисленных экспериментов? На рис. 3.1 показана карта распределения отклонений температуры реликтового излучения от его среднего значения по данным наблюдений миссии «Планк», взятая с сайта этой миссии. Этот рисунок получен уже после удаления источников, находящихся преимущественно в нашей Галактике. Для этого используются наблюдения в разных диапазонах. На этом рисунке уже убрана дипольная компонента, т. е. распределение температур приведено к системе отсчета, в которой реликтовое излучение наиболее изотропно.

3.2.5. Спектр флуктуаций реликтового излучения

Что же является причиной флуктуаций температуры реликтового излучения? Космологи исходят из предположения, что Вселенная после ее образования была практически полностью однородной. Но, как показал в свое время Евгений Лифшиц, расширяющаяся Вселенная неустойчива и малые отклонения от однородности со временем растут по степенному закону. Растут не только флуктуации плотности, но и флуктуации скоростей и температур. Естественно, все эти флуктуации связаны друг с другом. Области

⁴⁴ Это далеко не исчерпывающий список экспериментов по изучению реликтового излучения. Более полный их перечень на английском языке размещен на специальном сайте NASA (<http://lambda.gsfc.nasa.gov/>), посвященном реликтовому излучению, а также в Википедии (http://en.wikipedia.org/wiki/Cosmic_microwave_background_experiments).

повышенной плотности начинают притягивать к себе окружающее вещество, вызывая отклонения в скорости. Вещество, падая на область с повышенной плотностью, приводит к еще большему повышению контраста плотности.

За 380 000 лет, прошедших от образования Вселенной до появления реликтового излучения, относительные флуктуации хотя и развились, но оставались малыми – на уровне нескольких тысячных процента. Именно эти флуктуации мы и наблюдаем в виде флуктуаций температуры реликтового излучения. Итак, реликтовое излучение является своего рода фотографией ранней Вселенной.

Основным результатом этих многочисленных экспериментов является построение спектра мощности флуктуаций температуры реликтового излучения, приведенный на рис. 3.2, который использует данные, полученные как в космосе, так и на Земле.



Рис. 3.2. Спектр мощности температурных флуктуаций реликтового излучения. Точки показывают экспериментальные данные, их «усы» – погрешность измерений, а линия соответствует теоретической кривой, которой аппроксимированы данные

Распределение температур по поверхности небесной сферы раскладывается по сферическим гармоникам. В результате получается спектр мощности по номеру гармоники, приведенный на рис. 3.2. На рисунке правый конец спектра дополнен данными наземных измерений. Заметим, что характерный угловой масштаб неоднородностей, соответствующий 1-й гармонике, составляет $180^\circ/1$. Именно этот график служит отправной точкой для проверки различных космологических теорий. Дело в том, что его форма, а именно – высота и положение максимумов и минимумов – сильно зависит от различных космологических параметров, характеризующих исходное состояние Вселенной. Например, положение первого пика, называемого акустическим, прямо связано с кривизной Вселенной. Эти данные показывают, что или наша Вселенная плоская, или ее кривизна очень мала.

Большинство космологических параметров определяются из этого графика. Соответственно, спектр чувствителен к таким величинам, как плотность материи во Вселенной, плотность барионной (обычной) материи во Вселенной, и другим параметрам.

После окончания эпохи рекомбинации флуктуации продолжали развиваться, образуя крупномасштабную структуру Вселенной, и достаточно быстро в космологических масштабах времени вышли на уровень порядка 100 %. Действительно, даже в масштабах Солнечной системы масса сосредоточена в Солнце (99,86 %, если быть точным), а вне его и планет очень мало вещества. В галактиках часть обычной светящейся материи сосредоточена в звездах, которые концентрируются в галактики, галактики образуют скопления, но есть пустоты (войды), где галактик очень мало. В крупных масштабах вещество образует ячеистую структуру.

Итак, современные галактики, их скопления и более крупномасштабная структура произошли из флуктуаций в ранней Вселенной. Карта этих флуктуаций нам известна. Также

нам известно пространственное распределение галактик. Иногда задают вопрос о том, как сопоставить эти две карты. Это невозможно из-за того, что эти карты сильно разнесены по времени. Те флуктуации, которые наблюдаем мы, породили некоторую структуру, но информация об этой структуре просто не успела нас достичь. В то же время флуктуации, из которых образовались известные нам структуры, могли бы наблюдать в виде реликтового излучения разве что астрономы из крайне удаленных частей Вселенной.

3.2.6. Сохранение энергии

Один из основных результатов квантовой теории состоит в том, что энергия фотона пропорциональна его частоте. При расширении Вселенной увеличивается и длина волны фотона, а его частота и, следовательно, энергия падают. Так, например, фотон, излученный в период рекомбинации, утратит большую часть своей энергии, прежде чем он будет детектирован в виде реликтового излучения. Значит ли это, что закон сохранения энергии нарушается?

Когда-то в прошлом выдвигались гипотезы о том, что в космологии энергия не сохраняется. Тем не менее это не относится к рассматриваемому сейчас случаю, поскольку он основан на уравнениях Эйнштейна, которые включают в себя закон сохранения энергии. Поэтому любые их решения должны соответствовать этому закону. Следует отметить, что фотон обладает квантовой природой, а ОТО и квантовая теория не очень хорошо сочетаются. В принципе, это могло бы быть потенциальным источником неувязок, но мы докажем, что в данном конкретном случае никаких проблем попросту нет.

Рассмотрим единичный объем, заполненный фотонами в эпоху с красным смещением z . С тех пор этот объем увеличился в $(1+z)^3$ раз, а так как количество фотонов осталось прежним, плотность фотонов уменьшается в $(1+z)^3$ раз. В то же время длина их волны увеличилась в $1+z$ раз, поэтому частота и энергия каждого фотона уменьшаются в $1+z$ раз. Таким образом, плотность энергии уменьшилась в $(1+z)^4$ раз. Это именно то, что предсказывает формула (2.34): $\epsilon = \epsilon_0(1+z)^3(1+w)$, которая сводится к $\epsilon = \epsilon_0(1+z)^4$ для электромагнитного излучения с $w = 1/3$.

Однако энергия каждого фотона уменьшается в $1+z$ раз, поэтому они должны выполнять какую-то работу. Для объяснения напомним, что $w = p/\epsilon$ согласно формуле (2.33). Таким образом, ненулевое значение w означает, что работа должна выполняться против давления – так же как газ, расширяясь в цилиндре, выполняет работу, толкая поршень. Очень грубо можно сказать, что эта энергия передается гравитационному полю. Но во Вселенной нет поршней, и фотоны не сталкиваются друг с другом. Вы могли бы спросить, откуда взялось давление? Рассмотрим следующую иллюстрацию.

Заметим, что каждая единица объема окружена другими подобными объемами, все они находятся в состоянии термодинамического равновесия. Это означает, что число фотонов, выходящих из любого заданного объема и входящих в него, в среднем одинаково в любой момент времени. Так что не важно, покидает один фотон этот объем, а другой фотон входит в него, или этот фотон отражается от границы обратно в тот же объем. Поэтому для удобства можно считать, что мы имеем дело с одной расширяющейся частью пространства, ограниченной со всех сторон жесткими стенками – зеркалами.

Всякий раз, когда объект упруго отражается от движущейся стенки, его кинетическая энергия изменяется – этот эффект обычно используют игроки в большой теннис или пинг-понг. Если стенка удаляется от объекта, то его энергия уменьшается, если она движется по направлению к объекту, то его энергия увеличивается. То же самое относится и к фотонам. Поскольку они не могут двигаться медленнее или быстрее, чем скорость света, они меняют свою энергию, изменяя свою длину волны. Таким образом, энергия отдельного фотона будет уменьшаться с каждым отражением от зеркальных стенок расширяющейся ячейки и его длина волны будет соответственно увеличиваться. Это и дает множитель $1+z$. Данный эффект тесно связан с эффектом Доплера.

Это важный результат, позволяющий нам использовать концепцию фотонов в космологии, не нарушая фундаментальные физические законы.

3.2.7. Нездоровые сенсации

Научные журналы и мировые СМИ не раз публиковали сенсационные утверждения, касающиеся распределения реликтового излучения по небу⁴⁵. Например, в 2008 г. в журнале *Physical Review D* была опубликована статья Армандо Бернуи, в которой утверждалось, что карты реликтового излучения, полученные по данным WMAP, содержат асимметрию между северным и южным полушарием, причем эта асимметрия присутствует и в исходных данных.

Еще раньше, в 2005 г. в журнале *Physical Review Letters*, была опубликована статья Кейта Лэнда и Жоао Магуйежо под названием «Ось зла», в которой обсуждается совпадение осей квадрупольной и октупольной компонент⁴⁶ (2-й и 3-й сферических гармоник) реликтового излучения друг с другом и плоскостью эклиптики, т. е. с плоскостью орбиты Земли. Последнее обстоятельство было особенно настораживающее, так как намекало на систематические ошибки в методологии. Статья получила широкий резонанс, только в научной литературе она цитируется в сотнях статей. С квадрупольной компонентой связана еще одна проблема, которая обсуждалась космологами, на этот раз без привлечения средств массовой информации. Речь идет о том, что величина этой компоненты оказалась меньше значения, предсказанного современной стандартной космологической моделью, т. е. Λ CDM-моделью. Однако это малое значение может быть вызвано и исключительно случайными причинами. Оценка величины носит статистический характер, а мы, имея дело с уникальной Вселенной, можем получить величину квадрупольной анизотропии в несколько раз меньше средней оценки этой величины.

Наиболее же экстравагантное заключение было сделано американским математиком Джеффри Виксом, который, анализируя данные WMAP, пришел к выводу, что Вселенная конечна и имеет форму правильного додекаэдра⁴⁷ размером 60 млрд св. лет в поперечнике. Соответствующая статья, опубликованная в журнале *Nature* в 2003 г., была упомянута в нескольких сотнях статей. В 2010 г. был опубликован электронный препринт, в котором авторы Вахе Гурздян и Роджер Пенроуз утверждали, что в карте распределения температуры можно увидеть концентрические круги, которые являются сигналами, связанными с вселенными, предшествующими нашей. Однако работа вызвала массу критических отзывов, также опубликованных в виде электронных препринтов, авторы которых утверждают, что на карте неба нет никаких кругов, кроме тех, которые можно провести случайным образом. Общий скептицизм относительно этой теории хорошо отражен в статье научного обозревателя Би-би-си Джейсона Палмера⁴⁸.

На карте распределения температуры реликтового излучения на рис. 3.1 можно найти область с температурой приблизительно на 70 мК ниже средней температуры реликтового излучения. Она расположена в южной небесной полусфере в созвездии Эридана и имеет

⁴⁵ Естественно, что собратья Г. Проницательного и Б. Питомника, не говоря уже про Амвросия Амбруазовича Выбегалло, не отстают от своих зарубежных коллег, но мы пожалеем читателей и не будем о них писать.

⁴⁶ Первые четыре сферические гармоники обычно называют монополь ($l = 0$), диполь ($l = 1$), квадруполь ($l = 2$) и октуполь ($l = 3$).

⁴⁷ Додекаэдр — многогранник, имеющих 12 граней в форме правильных пятиугольников.

⁴⁸ <http://www.bbc.co.uk/news/science-environment-11960756>.

угловой радиус около 5° . Кроме того, она получила название «реликтовое холодное пятно» или «сверхпустота Эридана» и собственную статью в Википедии. Явление это интересное, заслуживающее изучения, но явно не ошеломляющее или требующее пересмотра парадигм и теорий. Его можно объяснить, например, влиянием гигантской пустоты (войда) или сверхпустоты (супервойда) на пути реликтового излучения через хорошо известный механизм взаимодействия реликтового излучения с гравитирующей материей, предложенный Райнером Саксом и Артуром Вольфом. Но это скучно и банально, никакой романтики. Зато профессор Университета Северной Каролины Лаура Мерсини-Хафтон считает: «Стандартная космология не может объяснить природу такой гигантской космической дыры... это явный отпечаток другой вселенной за краем нашей». Остается только узнать, где край нашей Вселенной и как именно отпечатались другая, не наша вселенная.

Как бы то ни было, если и есть что-то с названием «сверхпустота Эридана», то это можно начинать не только обсуждать, но и бояться. Писать в СМИ статьи «Сверхпустота Эридана и угроза человечеству», устраивать круглые столы и магические обряды по деэриданизации, т. е. нейтрализации вредного влияния роковой сверхпустоты. Люди любят бояться, и это прекрасно используют не только авторы фильмов ужасов.

Вопрос: В настоящее время температура реликтового излучения составляет 2,725 К. Чему она равнялась в предыдущие эпохи?

Ответ: Планковский спектр зависит от произведения длины волны и температуры. Длины волн излучения расширяются вместе с Вселенной, а его температура, соответственно, падает. Каждая эпоха характеризуется своим значением z -фактора. С эпохи, соответствующей определенному значению z -фактора, длина волны увеличилась в $1 + z$ раз, а температура, соответственно, уменьшилась во столько же раз. Значит, температура в определенную эпоху равнялась $2,725 \times (1 + z)$ К. На эпоху рекомбинации, для которой получаем температуру 2967 К.

3.3. Эволюция ранней Вселенной



В этом разделе мы рассмотрим расширение ранней Вселенной вскоре после Большого взрыва, что соответствует очень малым значениям r или масштабного фактора.

Мы можем пренебречь членом A по сравнению с гораздо большим значением $8\pi GB/2r$ в (2.12) и получить

$$t \sim \int \sqrt{r} dr \sim r^{3/2}, r \sim t^{2/3}. \quad (3.1)$$

Естественно, это полностью согласуется с уравнением (2.19). Затратив некоторые усилия, можно убедиться, что более сложные уравнения (2.20) и (2.21) также имеют подобное асимптотическое поведение при $u \rightarrow \infty$.

Таким образом, сразу после Большого взрыва Вселенная расширялась по закону $r \sim t^{2/3}$ для каждого из трех возможных сценариев. Постоянная Хаббла началась с бесконечно большого значения и уменьшалась по закону $H = 2/3t$. В открытой и плоской моделях H всегда положительна и стремится к нулю при больших t . В замкнутой модели постоянная Хаббла становится равной нулю в некоторой точке, и расширение сменяется сжатием Вселенной. Все кончается Большим хрустом через конечный промежуток времени от Большого взрыва. Перед Большим хрустом постоянная Хаббла стремится к $-\infty$. Мы видим, что эволюция ранней Вселенной практически одинакова для всех возможных сценариев.

3.4. Космологический горизонт

Космологический горизонт описывает максимально большое расстояние до астрономических объектов, которые мы можем увидеть на небе или получить от них какую-либо информацию любыми способами, включая гравитационные и электромагнитные волны или потоки каких-либо частиц. Любые сигналы от более удаленных объектов не могут достигнуть Земли за время существования Вселенной. Существование космологического горизонта является результатом комбинации двух факторов, а именно конечности скорости света и существования Большого взрыва.

Надо понимать, что чем дальше от нас находится объект, тем дольше от него идет свет и тем на более ранней стадии существования мы его наблюдаем. Таким образом, наиболее далекие из принципиально наблюдаемых объектов должны были испустить свет в момент рождения Вселенной. Этот свет шел бы до нас 13,8 млрд лет, однако из-за расширения Вселенной эти объекты находятся не на расстоянии 13,8 млрд св. лет, а на расстоянии втрое большем, т. е. около 40 млрд св. лет. Соответствующий расчет приведен в разделе 3.5. Более далекие объекты просто не видны, они находятся за космологическим горизонтом – границей видимой части Вселенной. Если на объектах, лежащих за космологическим горизонтом, существует наблюдатель, то он также не может получить информацию от нас. Это – еще одно решение парадокса Ольберса: мы можем наблюдать свет только от объектов в видимой части Вселенной с конечным, хотя и очень большим числом звезд.

Космологический горизонт соответствует максимальному расстоянию, от которого свет может дойти до нас. Вспоминая раздел 1.2, мы видим, что он соответствует краю нашего светового конуса прошлого, как показано на рис. 3.3. Все, что ограничено космологическим горизонтом, находится в нашем абсолютном прошлом, а все, что за ним, находится во внешней области. Естественно, мы можем получить любую информацию только от объектов внутри светового конуса.



Рис. 3.3. Космологический горизонт

В отличие от рис. 1.5, мы имеем дело не с плоским пространством-временем Минковского, а с реальной Вселенной, которая имеет четкую границу времени в прошлом – Большой взрыв. На рис. 3.3 по вертикальной оси отложено время, вершина соответствует текущей эпохе, принимаемой за начало отсчета, а Большой взрыв находится на уровне $-13,8 \times 10^9$ лет. По горизонтальной оси отложено радиальное расстояние от нас. Так как нас

интересует качественный, а не количественный анализ, мы используем такой переменный масштаб вдоль горизонтальной оси, чтобы край светового конуса представлял из себя прямую линию.

Из этого графика мы можем сделать три важных вывода. Во-первых, космологический горизонт конечен. Во-вторых, он увеличивается со временем, и объекты, которые находятся за его пределами, в конечном итоге окажутся в нем. В-третьих, мы видим отдаленные объекты на более ранних стадиях их эволюции, чем близкие.

На самом космологическом горизонте во всех направлениях мы должны были бы наблюдать момент рождения Вселенной, поскольку свет от него как раз дошел бы до нас за время существования Вселенной. Однако на начальных стадиях своего существования Вселенная была заполнена плазмой и поэтому была непрозрачна для света. Только после рекомбинации Вселенная стала прозрачной и практически все время оставалась таковой. Поэтому самое древнее, что мы можем наблюдать во Вселенной, – это свет, излученный в момент рекомбинации, т. е. реликтовое излучение.

Многих интересует вопрос о том, бесконечна ли Вселенная. Решения Фридмана уравнения Эйнштейна в отсутствие космологической постоянной описывают три возможных типа Вселенной, один из которых в любой момент эволюции Вселенной имеет конечный объем. Однако в любом случае мы видим только часть Вселенной, ограниченную космологическим горизонтом, поэтому вопрос о том, конечна или бесконечна недоступная для нас часть Вселенной, является чисто философским, поскольку мы никогда не сможем узнать, что происходит за пределами космологического горизонта.

3.5. Расстояние до космологического горизонта



В этом разделе мы оценим расстояние до космологического горизонта для моделей Фридмана.

Возраст Вселенной, по оценкам в рамках Λ CDM-модели, составляет около $T = 13,8 \times 10^9$ лет. Если бы Вселенная всегда была прозрачна для излучения, мы могли бы увидеть в качестве самого далекого объекта сам Большой взрыв. Свет шел бы от него время T , пройдя расстояние cT , т. е. $13,8 \times 10^9$ св. лет. Но это не расстояние до космологического горизонта. Ведь те части Вселенной, которые свет прошел давно, после прохождения света успели расшириться, и расстояние до края наблюдаемой части Вселенной стало больше, чем cT . Это особенно важно для участков, которые фотон прошел вскоре после Большого взрыва, на раннем этапе эволюции Вселенной. Для них мы можем использовать уравнение (3.1). Если какой-то участок свет проходил в момент, когда возраст Вселенной равнялся t , то к настоящему времени этот участок расширился в $(T/t)^{2/3}$ раз.

Каждый интервал времени dt , который фотон преодолел в момент, когда возраст Вселенной был t , переводится в пространственный интервал $c dt$, который к настоящему моменту из-за космологического расширения увеличился до $(T/t)^{2/3} c dt$. В результате расстояние до края наблюдаемой части Вселенной на текущий момент можно оценить как

$$L = c \int_0^T (T/t)^{2/3} dt = 3cT. \quad (3.2)$$

Это расчетное расстояние до космологического горизонта близко к 40 млрд св. лет. Фактическое расстояние меньше из-за непрозрачности ранней Вселенной до рекомбинации. Это самое далекое из того, что можно видеть. Впрочем, существует также вероятность того, что в один прекрасный день мы сможем обнаружить гравитационные волны, испущенные до рекомбинации, но на данный момент никто не может быть уверен в этом.

3.6. Инфляционное расширение Вселенной

Слово «инфляция» хорошо знакомо любому современному человеку. Особенно если учесть, что ее часто путают с девальвацией. Эти понятия связаны, но все-таки не тождественны. Девальвация – снижение покупательной способности денег, а инфляция – увеличение (буквально – раздувание) денежной массы.

На ранних стадиях существования Вселенной, когда денег еще не было, раздувалась сама Вселенная. Если говорить серьезно, то инфляционная стадия – это период с 10–36 до 10–33 с от Большого взрыва, в течение которого Вселенная, по самым скромным оценкам, увеличилась примерно в 1026 раз. Соответственно, ее объем (если он конечен) увеличился в 1078 раз. Заметим, что за прошедшие после окончания инфляции 13,8 млрд лет Вселенная расширилась примерно во столько же раз.

Существование инфляционной стадии существования Вселенной не следует из какой-либо физической теории. Более того, у нас нет и, возможно, в обозримом будущем не будет никаких прямых доказательств существования этой стадии. Однако подавляющее большинство серьезных космологов радостно встретили эту теорию, появившуюся в конце 1970-х – начале 1980-х гг.

Это связано с тем, что эта теория предлагала красивое решение нескольких независимых проблем, беспокоящих ученых. Эти конкретные проблемы мы назовем чуть позже, а пока заметим, чем космология на рубеже 1980-х гг. отличалась от космологии времен Хаббла и Гамова. Прежде всего, она стала куда более точной наукой. Повышение точности было связано с существенным прогрессом в астрономии, где использовались все более мощные наземные телескопы, новые методы измерения и обработки данных.

Прошли времена, когда ответы на многие вопросы были в основном качественными. Точность по порядку величины уже перестала удовлетворять ученых. Типичная точность в космологии на начало 1980-х гг. составляла десяток или несколько десятков процентов. В XXI в. точность продолжала улучшаться. В первом десятилетии XXI в. ученые добились того, что погрешности космологических параметров не превышали 10 %. Тогда многие писали о том, что космология наконец-то стала точной наукой. Сейчас ошибки определения многих космологических параметров составляют несколько процентов.

Но повышение точности существенно ужесточило требования к космологическим моделям, которые должны были удовлетворять все большему числу все более жестких ограничений. К концу 1970-х гг. появились проблемы, связанные с тем, что старая стандартная космологическая модель Гамова стала испытывать трудности с объяснением экспериментальных значений. И когда появилась теория инфляции, которая смогла решить несколько разноплановых проблем, она была воспринята как спасительное решение. Перечислим наиболее важные из этих проблем.

Первой назовем проблему плоскостности Вселенной. До появления данных по анизотропии реликтового излучения у астрономов не было надежных механизмов для оценки кривизны Вселенной. В какой-то степени вопрос о кривизне Вселенной – это вопрос об отношении плотности материи к критической плотности (о темной энергии тогда еще не было разговоров), которое обозначается $\Omega_m = \rho_m / \rho_{\text{крит}}$ ⁴⁹. Плоская модель соответствует значению $\Omega_m = 1$, причем это значение не меняется со временем. Закрытая модель реализуется при значениях $\Omega_m > 1$, а открытая – при значениях $\Omega_m < 1$. При этом решения Фридмана, на которых основывалась теория Гамова, обладают следующим свойством: любые отклонения Ω_m от 1 увеличиваются со временем. Соответственно, для закрытой модели Ω_m становится все больше, а для открытой – все меньше. Оценка масс галактик в нашей Вселенной позволила дать нижнюю оценку величины Ω_m . Верхнюю

⁴⁹ На сегодняшний день правильнее говорить о полной плотности $\Omega = \Omega_m + \Omega_\Lambda$, где Ω_Λ — параметр плотности темной энергии, о которой мы расскажем в главе 5.

оценку Ω_m дают не только астрономические наблюдения, но и то простое соображение, что Вселенная все еще расширяется. При большой начальной плотности Вселенной за время своего существования она либо начала бы сжиматься, либо даже успела коллапсировать.

Полученные ограничения на параметр Ω_m оказались достаточно широкими, но из них следовало, что значение Ω_m через планковское время⁵⁰ после образования Вселенной могло отличаться от 1 не более чем на 10–59, независимо от знака этого отличия. У космологов возник естественный вопрос: почему так получилось? Вряд ли подобное могло произойти случайно. Значит, у природы должен существовать какой-то механизм, подгоняющий плотность материи к критической плотности. Такая тонкая подгонка (по-английски *fine tuning*) отсутствовала в стандартной космологической модели, хотя должна была бы быть ее важной деталью.

Вторая проблема, требовавшая решения, была связана с высокой степенью изотропности реликтового излучения. К тому моменту еще не были получены данные об анизотропии реликтового излучения, но было понятно, что после исключения дипольной компоненты относительная анизотропия $\Delta T/T \ll 0,001$, где ΔT – флуктуации температуры реликтового излучения, а $T = 2,725$ К – ее среднее значение.

Реликт был излучен, когда Вселенной было около 380 000 лет. Все флуктуации плотности вещества или температуры после этого момента не могли существенно повлиять на реликтовое излучение. Но флуктуации, произошедшие до этого момента, могли немного изменить температуру и ускорить или замедлить время начала рекомбинации водорода.

Рассмотрим области, из которых было испущено реликтовое излучение. Они находятся на поверхности, которая в космологии называется поверхностью последнего рассеяния. А теперь рассмотрим эти области в двух противоположных направлениях на небесной сфере. Из анализа решения Фридмана следует, что эти области не могли иметь причинную связь, т. е. процессы, происходящие в одной из них, никак не могли повлиять на другую, и наоборот. Оценки показывали, что на карте распределения температур реликтового излучения угловые размеры причинно связанных областей должны были быть порядка 1° (см. рис. 3.4). Тем не менее высокая степень соответствия температур реликтового излучения на существенно больших угловых расстояниях свидетельствует о том, что физические процессы в этих областях протекали практически одинаково. Это ставило в тупик космологов того времени.

⁵⁰ Иными словами, через $5,4 \times 10^{-44}$ с. Про планковскую систему единиц см. в разделе 5.2.



Рис. 3.4. Размер причинно связанной области в эпоху рекомбинации без учета инфляции (не в масштабе)

Третий фактор, наименее важный, на наш взгляд, состоял в следующем. В то время была популярна теория великого объединения⁵¹, которая не только допускала возможность существования некоторых экзотических частиц вроде магнитных монополей, но и предсказывала необходимость их образования в ранней Вселенной. В то же время все попытки обнаружить подобные объекты во Вселенной не дали никаких результатов.

Основная идея инфляции заключалась в том, что на очень ранней стадии развития Вселенной в течение очень малого времени существовал какой-то фактор, действующий как эффективная космологическая постоянная. При этом Вселенная описывалась решением де Ситтера и расширялась экспоненциально, успев за ничтожную долю секунды расшириться в гигантское число раз, а постоянная Хаббла в течение какого-то времени была практически постоянна⁵². Затем этот фактор исчез, и далее Вселенная продолжала развиваться по стандартному сценарию.

Идея инфляции позволила элегантно решить три указанные выше проблемы, а также некоторые другие, например проблему аномально высокой энтропии Вселенной, проявляющуюся в большом количестве фотонов в пересчете на один барион во Вселенной.

Первая проблема решалась тем, что тонкая подстройка осуществлялась автоматически в ходе инфляционного расширения. Дело в том, что для решения де Ситтера с материей Ω_m изменяется прямо противоположным образом, чем для решения Фридмана: любые отклонения от 1 со временем уменьшаются. Соответственно, Вселенная могла образоваться со значением Ω_m , достаточно сильно отличающимся от 1, но за время инфляции оно настолько приблизилось к этому значению, что не успело ощутимо отойти от него до сих пор. Более конкретно, его отклонение от 1 за время инфляции уменьшилось в 10^{52} раз. Положение первого акустического пика говорит о том, что кривизна Вселенной сейчас незначительна. Этот факт можно считать косвенным подтверждением теории инфляции.

Вторая проблема решалась тем, что за счет инфляции все точки поверхности

⁵¹ Теория великого объединения — пафосное название теории из физики элементарных частиц, которая пыталась объединить электромагнитные, слабые и сильные взаимодействия в одно целое.

⁵² Напомним, что в модели Фридмана постоянная Хаббла изменяется со временем.

последнего рассеяния⁵³ оказались причинно связанными. Чтобы разобраться с этим, сделаем несложные вычисления. Пусть за период инфляционной стадии Вселенная расширилась в 1026 раз, а после ее окончания – еще во столько же раз. Всего – в 1052 раз. Размеры видимой части Вселенной мы оценили в 40 млрд св. лет, что соответствует $3,8 \times 10^{26}$ м. После окончания инфляционной стадии, перед началом фридмановского расширения, размеры наблюдаемой в настоящее время части Вселенной были порядка 1 м. Соответственно, до начала инфляционной стадии эта область имела размер порядка 10–26 м, что существенно меньше размеров атомного ядра.

Предположим, что перед инфляционной стадией Вселенная описывалась решением Фридмана⁵⁴, и получим, что к началу инфляции в момент времени t_1 свет от Большого взрыва прошел путь $3ct_1$. Это, по определению, и будет размер причинно связанной области на тот момент. За период инфляции пространство расширилось в 1026 раз. В результате после окончания инфляционной стадии размеры причинно связанной области были более 1 м⁵⁵. Понятно, что эти оценки не могут заменить подробное рассмотрение распространения света на разных стадиях эволюции Вселенной, но из него следует тот же вывод: все реликтовое излучение исходит из причинно связанных областей.

Это также решает третью проблему. Предположим, что какие-то экзотические частицы родились либо вместе с Вселенной, либо до начала инфляционной стадии. Пусть одна из таких частиц попала в наши 10–26 м (это все еще существенно меньше размеров атомного ядра). Тогда в настоящий момент мы имеем все ту же одну экзотическую частицу внутри космологического горизонта, т. е. в части Вселенной, доступной для наблюдения. Вот только радиус этого горизонта теперь 40 млрд св. лет. Это явно исключает возможность ее наблюдения. Это же относится и к другим экзотическим объектам, например белым дырам или голым сингулярностям.

3.6.1. Модели инфляции

Вполне понятно, что космологи не могли пройти мимо теории, одним махом решающей большую часть существующих проблем. Первый вариант теории инфляции был предложен в 1980 г. американским физиком Аланом Гутом. Однако теория Гута обладала рядом недостатков; в частности, одним из ее следствий были большие вариации плотности. Другой вариант теории инфляции, свободный от этой проблемы, был предложен в 1982 г. советским физиком Андреем Линде и независимо американскими физиками Андреасом Альбрехтом и Паулем Штейнхардтом. В дальнейшем эта теория была развита Алексеем Старобинским, Стивенем Хокингом, Вячеславом Мухановым и Геннадием Чибисовым, а также рядом других ученых.

Основной вопрос, необходимый для теории инфляции, – определить фактор, игравший роль эффективной космологической постоянной в период инфляции. Подобно классической эйнштейновской космологической постоянной, этот фактор должен обеспечивать дополнительную плотность энергии Вселенной. При этом при инфляционном расширении эта плотность практически не менялась. Как было показано в разделе 2.7.4, для настоящей космологической постоянной эта плотность строго сохраняется. Но, в отличие от Λ -члена Эйнштейна, этот фактор должен исчезнуть к концу инфляционной стадии. Можно

⁵³ Это название дано области, где было излучено наблюдаемое реликтовое излучение.

⁵⁴ Мы не имеем ни малейшего представления о том, какой была метрика Вселенной до инфляции. Тем не менее качественный результат будет справедлив для любого разумного предположения.

⁵⁵ Коэффициент 1026 был определен из условия, что размеры причинно связанной области на момент окончания инфляции были больше, чем область, соответствующая нынешнему космологическому горизонту.

предложить много различных вариантов такого фактора, которые практически не будут отличаться по своим проявлениям. В частности, это связано с тем, что инфляция хорошо «заметает за собой следы», так что очень трудно в постинфляционный период определить причину инфляции. Основные отличия между различными механизмами инфляции проявляются в том, каким образом Вселенная выходила из этой стадии.

Самый первый вариант инфляции, предложенный Гутом, предполагал, что в ранней Вселенной произошел переход от состояния «ложного» вакуума в «истинный» вакуум, имеющий меньшую плотность энергии. С тех пор Вселенная пребывает в состоянии «истинного» вакуума.

Проиллюстрируем понятие «ложного» и «истинного» вакуумов с помощью простой аналогии. Представьте себе пруд, наполненный водой, и канаву рядом. Дно пруда выше, чем дно канавы. Таким образом, потенциальная энергия воды, находящейся в канаве, ниже, чем воды в пруду. В этой картинке вода соответствует Вселенной, высота – ее плотности энергии, пруд представляет собой состояние ложного вакуума, а канава соответствует истинному вакууму.

Существует некоторое возвышение земли между ними (плотина), которое не дает воде просто перетечь из пруда в канаву. Тем не менее вода может либо медленно просачиваться через плотину, либо прорваться сквозь эту дамбу. В первом случае переход происходит медленно и постепенно, во втором случае он будет быстрым и внезапным. В обоих случаях, если есть сколь угодно слабая утечка или малейший шанс прорыва, через достаточно длительное время вся вода окажется в канаве. Точно так же наша Вселенная может перейти из состояния ложного вакуума в состояние истинного. При этом какое-то время Вселенная проведет в состоянии ложного вакуума, в этот период плотность ее энергии будет больше, чем в конечном состоянии. Эта дополнительная плотность энергии и будет работать временно исполняющим обязанности космологической постоянной, но недолго.

Если говорить еще точнее, то картина может выглядеть чуть иначе. Состояния истинного и ложного вакуума могут меняться в процессе эволюции Вселенной. Скажем, сразу после Большого взрыва Вселенная находилась в состоянии, соответствующем минимуму плотности энергии вакуума. По мере ее расширения и понижения температуры появилось другое состояние, в котором плотность энергии вакуума через некоторое время стала меньше, чем в исходном состоянии Вселенной. Переход в него мог произойти либо путем квантового туннелирования, либо в виде классического перехода. Проиллюстрируем это на примере, в котором «ложный» и «истинный» вакуум отличаются величиной некоего скалярного поля⁵⁶.

Пусть плотность энергии вакуума W зависит от некоего скалярного поля ϕ . Зависимость $W(\phi)$ всегда симметрична относительно знака ϕ , но ее форма зависит и от температуры. При сверхвысоких температурах эта зависимость, показанная на рис. 3.5, качественно похожа на параболу и имеет минимум в точке $\phi = 0$.

⁵⁶ Скалярное поле — это поле какого-либо параметра, имеющего величину, но не имеющего направления, например температуры или давления.

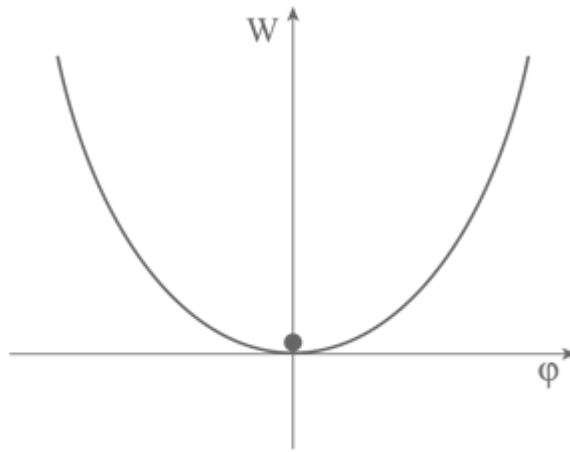


Рис. 3.5. Зависимость плотности энергии вакуума W от величины скалярного поля ϕ .

Вселенная покоится в глобальном минимуме

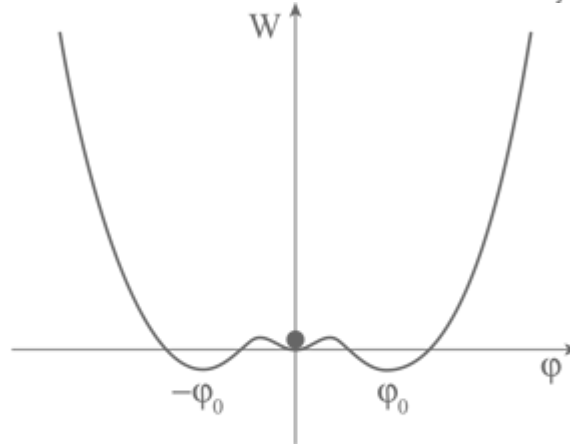


Рис. 3.6. Энергия вакуума в скалярном поле. Вселенная покоится в локальном минимуме. Она может туннелировать в любой из двух глобальных минимумов

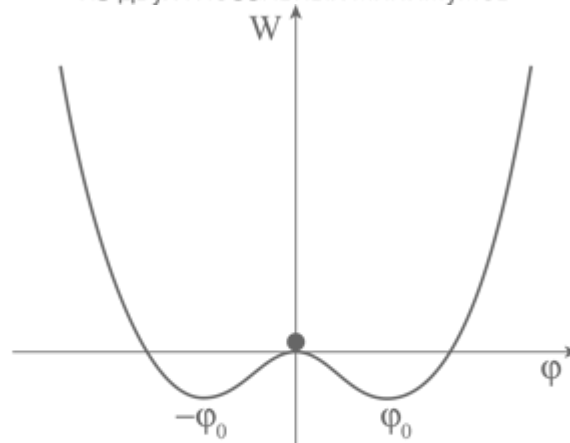


Рис. 3.7. Энергия вакуума в скалярном поле. Вселенная находится в неустойчивом локальном максимуме и может «скатиться» классическим, т. е. неквантовым, путем в любой из двух глобальных минимумов

При понижении температуры (по-прежнему очень высокой, существенно

превышающей шуточные оценки температуры в аду⁵⁷) эта зависимость может превратиться в зависимость, в котором глобальный минимум соответствует ненулевому значению параметра φ . Понятно, что будет два минимума, соответствующих значениям $\varphi = \pm \varphi_0$. Есть два варианта перехода в это состояние, схематически изображенные на рис. 3.6 и 3.7. В первом варианте исходный минимум $\varphi = 0$ остается локальным минимумом. В этом случае Вселенная может перейти в новое состояние только путем квантового туннельного перехода, так как между двумя минимумами есть потенциальный барьер. Во втором варианте исходный минимум становится локальным максимумом, и тогда Вселенная может «скатиться» в любой из двух минимумов классическим образом.

Другой вариант, появившийся немного позже (Линде, 1990), основывался на предположении, что Вселенная в момент образования содержала какое-то массивное скалярное поле. Это поле затухло к моменту окончания инфляции, но до этого момента его величина уменьшалась очень медленно. При этом оно оказывало на пространство-время воздействие, близкое к космологической постоянной. Медленное затухание поля обеспечивалось быстрым расширением Вселенной и описывалось соответствующим решением уравнения Эйнштейна.

Естественно, рассматривались и другие причины появления инфляционной стадии, в том числе и весьма экзотические. Упомянем одну из таких версий. В некоторых теориях элементарных частиц получается, что наше пространство-время кроме четырех привычных для нас измерений (три пространственных координаты и время) содержит еще некоторое количество дополнительных пространственных измерений, которые мы не можем обнаружить экспериментально. Один из вариантов теории струн, называемый М-теорией, предсказывает существование 11 измерений, из которых 7 – скрытые. Физики рассматривают вариант, при котором Вселенная сразу после рождения имела большее количество пространственных измерений, причем дополнительные измерения не отличались от привычных для нас измерений. Затем последовал период, когда Вселенная экспоненциально расширялась по трем привычным для нас измерениям (это и есть инфляция) и экспоненциально сжималась вдоль остальных семи пространственных измерений. Эти процессы были связаны, и в какой-то степени можно сказать, что инфляция продолжалась до наступления компактификации дополнительных измерений. Под этими словами понимается то, что размеры Вселенной в этих направлениях стали настолько малы, что само существование этих измерений невозможно обнаружить. Обычно, когда физики говорят о самой маленькой длине, они имеют в виду так называемую планковскую единицу длины, приблизительно равную $1,6 \times 10^{-35}$ м. Считается, что современная физика неприменима к масштабам, меньшим планковских. Более подробно про планковские единицы будет рассказано в разделе 5.2.

Первая аналогия, приходящая в голову при рассмотрении компактификации, – это губка, сжимающаяся до такой степени, что становится практически плоской. Однако это плохая аналогия. Дело в том, что если Вселенная имеет бесконечные размеры вдоль какой-либо координаты, то, во сколько бы раз Вселенная вдоль нее не сжалась, она все равно останется бесконечной. Если же Вселенная вдоль этой координаты не бесконечна, то она все равно не имеет границ, в отличие от губки. В этом случае мы имеем дело с циклической координатой вроде географической долготы.

Поэтому более правильной будет другая аналогия. Лист бумаги является двумерным объектом. Если мы свернем его в трубочку, причем такую, что диаметр трубочки будет равен планковской длине, мы получим объект, который с практической точки зрения является одномерным. Одна из его координат стала циклической и компактифицировалась. Согласно описываемой гипотезе, со Вселенной произошло то же самое: семь (или другое количество)

57 Физическую оценку температуры в аду (на английском) можно найти на сайте <https://www.lhup.edu/~dsimanek/hell.htm>.

координат компактифицировались.

Обратим внимание, что количественные характеристики инфляции, приведенные в начале данного раздела, основаны на некоторых вариантах теории инфляции и не могут быть проверены экспериментально. Например, в теории массивного скалярного поля время начала инфляционной стадии равно нулю, так как Вселенная уже родилась в этой стадии. Поэтому в дальнейшем эти значения вполне могут измениться на несколько порядков, поскольку самое привлекательное, что есть в теории инфляции, – это не детали, а сама идея. Хотя какие там «несколько порядков» – в модели хаотической инфляции, вызванной скалярным полем с массой квантов 1022 эВ, размеры Вселенной увеличиваются не в 1026 раз, а в 10260000000000 раз.

Вопрос: *Интуитивно кажется, что при той плотности вещества, которая имела место после Большого взрыва, должно быть гигантское гравитационное замедление времени. Можно ли интерпретировать инфляцию как результат резкого ускорения времени после определенной стадии расширения?*

Ответ: *Да, существует гравитационное красное смещение, оно же замедление времени. Оно подтверждено как астрономическими наблюдениями (например, спектром Сириуса В), так и прямыми опытами Паунда и Ребке. Время на первом этаже здания течет медленнее, чем на втором. Но в однородной Вселенной нет первых и вторых этажей. Все точки равноценны, и время течет с одинаковой скоростью во всех точках, так как гравитационный потенциал везде одинаковый. Ведь гравитационное красное смещение связано с разностью гравитационных потенциалов, а не с его постоянным значением. Кроме того, любые решения, основанные на ОТО, учитывают все подобные эффекты.*

3.7. Поливерсум и антропный принцип

Сделаем еще одну оценку. Хотя у нас нет никаких оснований предполагать какой-то определенный размер Вселенной в момент начала инфляции, возьмем «с потолка» размер в 1 мм. Он превосходит характерный размер видимой части Вселенной на момент начала инфляции (10–26 м) в 1023 раз. Соответственно, в объеме Вселенной помещается около $(10^{23})^3 = 10^{69}$ объемов того участка, из которого выросла наблюдаемая часть Вселенной. Поэтому в настоящий момент во Вселенной насчитывается приблизительно 1069 частей Вселенной, не связанных друг с другом причинно и не наблюдаемых друг из друга. Даже если вместо 1 мм мы возьмем 1 микрон (10–6 м) или даже 1 ангстрем (10–10 м), то все равно мы получим гигантское количество независимых друг от друга частей Вселенной, соответственно 1060 или 1048.

Подобные соображения привели к представлению о том, что во Вселенной может действительно существовать гигантское количество независимых частей. Для описания этой идеи вместо английского слова «Universe», обозначающего Вселенную, используются другие слова: «Multiverse» или «Omniverse». В этих словах приставка uni-, означающая «единственный», заменена приставкой «multi», обозначающей «много», и «omni», обозначающей «все». В данной книге мы будем использовать термин «Поливерсум», который использовал известный польский фантаст Станислав Лем.

Интересные результаты получились при объединении идей инфляции и спонтанного нарушения симметрии, за открытие которой Еитиро Намбу получил Нобелевскую премию по физике в 2008 г. Идея спонтанного нарушения симметрии используется в физике элементарных частиц. С ней напрямую связан так называемый бозон Хиггса, обнаруженный на Большом адронном коллайдере в Швейцарии⁵⁸.

⁵⁸ Бельгиец Франсуа Энглер и Питер Хиггс из Великобритании получили Нобелевскую премию по физике 2013 г. «За теоретическое обнаружение механизма, который помогает нам понять происхождение массы»

Дадим очень краткое описание этой идеи. Обычно в физике считается, что симметричные уравнения должны иметь симметричные решения. Например, шарик, положенный в траншею с профилем, показанный на рис. 3.5, окажется в самой нижней ее точке. При этом мы считаем, что от координаты вдоль траншеи ничего не меняется. Гравитационный потенциал симметричный, полученное решение тоже симметрично. Если же профиль траншеи будет таким, как показано на рис. 3.7, то симметричное решение будет неустойчивым. В этом случае шарик случайным образом попадет либо в левую, либо в правую яму. Таким образом, будет реализовано одно из двух возможных несимметричных решений.

Если мы говорим не о скалярном, а о векторном поле, имеющем направление, то число возможных несимметричных решений будет бесконечным. Представьте, что мы имеем дело не с траншеей, а с лункой, полученной в результате вращения профиля, изображенного на рис. 3.7, вокруг вертикальной оси. Понятно, что шарик скатится и попадет в какую-то точку на круговой канаве, но неизвестно, в какую именно. Другой пример: на горизонтальной поверхности мы ставим вертикально длинную тонкую палку. Понятно, что она упадет, но в какую сторону – мы не знаем. Вы можете проверить это в домашних условиях, пытаясь поставить карандаш вертикально на его острие.

В некоторых теориях физики элементарных частиц возникают симметрии, которые не реализуются в реальном мире. Теория предсказывает безмассовые частицы, а в реальности они массивны. Теория предсказывает равенство масс двух частиц, а в реальности одна тяжелее другой. Один из вариантов заключается в том, что симметрия существует, но спонтанно нарушена. Когда мы обсуждали переход Вселенной из состояния с «ложным» в состояние с «истинным» вакуумом, мы вводили некоторое скалярное поле, от которого зависела плотность энергии вакуума. Если теперь мы представим, что от этого же поля зависят и параметры элементарных частиц, причем при значении $\phi = 0$ достигается симметрия, предсказываемая теориями, то в результате перехода Вселенной в состояние со значением $\phi \neq 0$ эта симметрия нарушается. Причем мы не можем заранее сказать, в какую именно сторону. Если же вместо скалярного поля ϕ присутствовало какое-то векторное поле, которое характеризуется не только величиной, но и направлением, то количество возможных способов нарушения симметрии становится бесконечным.

Итак, предположим, что инфляция связана с переходом от «ложного» вакуума к «истинному», который, в свою очередь, связан со спонтанным нарушением симметрии. Более того, предположим, что в разных частях Вселенной, не связанных причинно, результаты спонтанного нарушения симметрии могут быть разными. Части Вселенной, выросшие из этих кусков, будут иметь разное нарушение симметрии. Это означает разную физику, а именно разные константы взаимодействия, разные свойства элементарных частиц, в экстремальном случае – даже разное число измерений пространства. Возвращаясь к понятию «Поливерсум», мы получим не просто гигантское количество независимых друг от друга частей Вселенной, но частей Вселенной с разной физикой.

Может показаться, что это – результат буйства фантазии. Однако природа позаботилась о том, чтобы у нас была очень простая и наглядная модель Поливерсума. Кусок железа или другого ферромагнетика состоит из различных участков, называемых доменами, внутри которых все магнитные моменты атомов выстроены параллельно. В другом домене они тоже выстроены параллельно, но в другом направлении. Границы между доменами – так называемые доменные стенки – имеют дополнительную плотность энергии по сравнению с самими доменами. Если железо не находилось во внешнем магнитном поле, то направление магнитных моментов внутри доменов можно считать результатом спонтанного нарушения симметрии. Доменная структура ферромагнетиков и сегнетоэлектриков известна в физике более сотни лет. Представим, что Вселенная тоже состоит из отдельных доменов, внутри

субатомных частиц, подтвержденного в последнее время обнаружением предсказанной элементарной частицы в экспериментах ATLAS и CMS на Большом адронном коллайдере в ЦЕРН».

которых физические законы постоянны. Однако в разных доменах они различны. Их разделяют доменные стенки, имеющие дополнительную плотность энергии. Размеры наблюдаемой части Вселенной (диаметр космологического горизонта) существенно меньше размеров таких доменов. Остается только пожалеть, что физикам-экспериментаторам никогда не удастся использовать свои приборы для изучения объектов из другого домена.

В такой картине Поливерсума новыми гранями заиграл так называемый антропный принцип. Этот принцип, имеющий прямое отношение к космологии, относится не столько к науке, сколько к философии. Более того, ссылки на него можно найти не только в научной работе или философском трактате, но и в богословских трудах. Опишем кратко его основные положения.

Многие ученые не раз писали, что разумная жизнь, представленная во Вселенной по крайней мере человечеством, оказалась возможна благодаря серии невероятно удачных обстоятельств. Небольшое изменение параметров взаимодействия или масс элементарных частиц привело бы к тому, что не только была бы невозможна разумная жизнь, но и вся картина мироздания была бы совершенно иной. Естественно возник вопрос: почему Вселенная так приспособлена для появления разумной жизни? Ответ богословов нетрудно предвидеть. Но физикам очень трудно было предложить свой вариант ответа.

На помощь пришли следующие философские соображения. Для того чтобы обсуждать вопрос удобства нашей Вселенной для создания разумной жизни, нужна не только Вселенная, удовлетворяющая данному критерию, но и собеседники, которые это обсуждают. Другими словами, если Вселенная плохо приспособлена для появления разумной жизни, в ней не появятся разумные существа и, соответственно, некому будет пожаловаться на ее плохое устройство. То, что вы читаете эту книгу, связано не только с тем, что автор ее написал, а вы решили прочесть, но и с тем, что Вселенная со всеми ее взаимодействиями, константами и другими параметрами сделала возможным существование и авторов, и читателей. Если у нас есть много вариантов строения Вселенной, то обсуждение этого вопроса возможно только в тех из них, в которых есть кому его обсуждать.

С научной точки зрения важно наличие большого числа возможностей. До появления теории инфляции антропный принцип пытались применить к вопросу, почему плотность Вселенной не сильно отличается от критической плотности. Чтобы обеспечить большое число возможных вариантов, выбирали одну из двух возможностей: либо Вселенная испытывает большое, возможно очень большое, количество циклов рождения и уничтожения, либо в результате квантовых флуктуаций рождается очень большое число вселенных, независимых друг от друга. В первом случае антропный принцип позволяет выбрать удачный цикл, во втором случае – подходящую вселенную.

Идея Поливерсума с доменной структурой позволяет реализовать внутри него много разных возможностей, практически независимо друг от друга. И если то, что единственная Вселенная оказалась удачно устроенной, вызывало удивление, то куда меньшее удивление вызывает то, что мы можем найти хотя бы один подходящий кусок Вселенной из огромного количества вариантов с разными физическими законами и разными параметрами взаимодействия.

Невероятно сложно сорвать джекпот, купив один лотерейный билет, но это точно получится, если ты купил 1060 билетов.

3.7.1. Кому во Вселенной жить хорошо?

Итак, по мнению многих людей, среди которых есть и ученые, мы живем во Вселенной, очень хорошо приспособленной для существования жизни в известном нам виде. В доказательство этого они приводят аргументы, относящиеся к компетенции разных наук. Хотя от многих этих аргументов можно отмахнуться ввиду их несерьезности, некоторые из них заслуживают внимания.

Начнем с физического аргумента. Разность масс покоя нейтрона и протона должна

быть чрезвычайно точно подобранной величиной. Если эта разность станет чуть меньше и сравнится с массой покоя электрона, то в атоме водорода электрон будет реагировать с протоном с образованием нейтрона, и атомарный водород не сможет стабильно существовать в природе. Все «нормальные» звезды должны будут прекратить существование; жизнь в такой вселенной станет невозможной. Если же разность масс протона и нейтрона станет немного больше, чем есть теперь, будет невозможным образование дейтерия – тяжелого водорода, ядро которого состоит из протона и нейтрона. При этом в природе не сможет возникнуть ни один химический элемент, начиная с гелия и дальше. Очевидно, и в такой вселенной жизнь никогда не смогла бы возникнуть. Между тем эта разность масс протона и нейтрона составляет лишь десятую долю процента от массы каждой из этих частиц. И просчет в этой десятой доле на сотые в ту или в другую сторону имел бы роковые последствия для всей Вселенной. Так, тесно связанными оказываются сразу три независимые величины: массы протона, нейтрона и электрона. Кстати, среди прочих элементарных частиц именно это соотношение оказывается подобранном с такой скрупулезной точностью, почему эти частицы и служат основой вещества. Подобные рассуждения касаются и многих других физических констант, например постоянной тонкой структуры.

А вот пример химического аргумента. Молекула воды имеет ярко выраженный дипольный момент. Благодаря этому свойству вода является универсальным растворителем, способным переносить множество солей на уровне ионов. Из-за электрической поляризации молекулы воды образуют между собой тонкие связи, именуемые водородными. Эти связи возникают, когда атом водорода одной молекулы, будучи в значительной мере лишен электронной оболочки, притягивается к отрицательно заряженному атому кислорода (или другому атому), входящему в состав иной молекулы. Водородные связи возникают в кристаллах льда, обеспечивая его ажурную легкую конструкцию, притом еще нескольких разных видов. Потому мы не находим другого вещества с таким малым молекулярным весом, которое было бы столь тугоплавким, как лед. Водородные связи обеспечивают и относительно малую разницу между температурами плавления и кипения для воды. Потому вода встречается на Земле во всех трех агрегатных состояниях и становится возможным ее круговорот, сопровождаемый постоянной очисткой. Только на водяной основе может строиться жизнь.

Есть и астрономические аргументы. Например, благодаря оптимальному расстоянию до Солнца на Земле поддерживается средняя температура около 15 °С, комфортная для живых существ.

Правда, иногда в попытках найти проявления «тонкой подстройки» доходят до абсурда, утверждая, например, что угол наклона оси вращения Земли к плоскости ее орбиты также подобран тончайшим образом.

3.7.2. Что же утверждает антропный принцип?

Рассмотрим более подробно несколько формулировок антропного принципа. В 1968 г. астрофизик Брэндон Картер проанализировал все эти совпадения, позволяющие жизни существовать, и выдвинул гипотезу, что все они представляют собой проявление некоего общего так называемого антропного принципа. Наиболее известная его формулировка гласит: «То, что мы ожидаем наблюдать, должно быть ограничено условиями, необходимыми для нашего присутствия как наблюдателей». Он же впервые ввел этот термин в 1973 г. Тем не менее сам принцип уже существовал к этому моменту. Ранние формулировки принципа можно найти в книге А. Уоллеса, изданной в 1903 г. К примеру: «...такая большая и сложная Вселенная, как мы ее знаем, может быть абсолютно необходимой... чтобы создать мир, точно приспособленный во всех деталях для

существования человека»⁵⁹.

Безусловно, «антропный принцип» – далеко не единственный термин для описания взаимодействия человека и Вселенной. Но даже сам антропный принцип существует в различных формулировках, существенно отличающихся друг от друга по сути: слабый и сильный антропные принципы и принцип самоотбора, сформулированные Картером, принцип целесообразности Розенталя, принцип соучастия Уилера, финальный антропный принцип Типлера и др. Приведем популярные формулировки антропного принципа.

Слабый антропный принцип. Наблюдаемые значения всех физических и космологических параметров не являются в равной степени вероятными, но принимают значения, ограниченные требованием существования мест, где может развиваться жизнь, и требованиями того, что Вселенная должна иметь достаточный для этого возраст. В классической формулировке Картера речь шла конкретно о жизни на углеродной основе, за что его сторонников обвиняют в «углеродном шовинизме». Иными словами, Вселенная, не допускающая существования жизни, принципиально ненаблюдаема. Слабую версию антропного принципа в исходной формулировке критикуют за то, что она не допускает существования иных форм жизни. Более того, диапазон констант, допускающих развитие углеродно-основанной жизни, может быть намного менее ограниченным, чем утверждается. Именно по этой причине мы исключили слово «углеродная» как необязательную конкретизацию.

Сильный антропный принцип. Фундаментальные законы и константы Вселенной специально настроены так, чтобы мог возникнуть осмысляющий их наблюдатель. Эта формулировка, по словам Мартина Риса, «весьма отдаёт телеологией», т. е. признанием того, что эволюция Вселенной имеет некую заранее вложенную в нее цель (или предопределение). Сильную версию критикуют за то, что она ни верифицируема, ни фальсифицируема, т. е. не может считаться научной гипотезой.

Финальный или окончательный антропный принцип. Во Вселенной должны появиться разумные обработчики информации, и, однажды появившись, они никогда не исчезнут. Эту версию обсуждают более детально; к примеру, Барроу и Типлер утверждают, что, хотя она и является физическим утверждением, тем не менее «тесно связана с моральными ценностями»⁶⁰.

Естественно, сторонники сильного антропного принципа из числа физиков хотели бы избежать ссылок на Бога и телеологию. На первый взгляд кажется, что это невозможно, но в действительности такой путь существует. Он связан с введением понятия Поливерсума, которое мы изложили в начале этого раздела, или как альтернатива возможностью квантового рождения множества вселенных с различными физическими свойствами. В любом случае предполагается, что наша Вселенная не единственная, а только одна из многих (может быть, даже из бесконечного числа) возможных вселенных. В каждой из таких вселенных свои физические законы и универсальные константы. В нашей Вселенной эти законы и константы случайным образом получились такими, что способствуют появлению разума, даже предопределяют это событие, но ничего телеологического, «божественного» тут нет – чистая случайность. В других вселенных законы и константы могут быть таковы, что наш тип жизни или вообще никакая жизнь там возникнуть не может. Могут существовать и совершенно «пустые» вселенные, где константы электромагнитных, ядерных и гравитационных взаимодействий или топологические и метрические свойства пространства-времени таковы, что там вообще не возникают никакие частицы.

Ярым приверженцем гипотезы Поливерсума был Станислав Лем. В насмешку над сильным антропным принципом он даже выдвинул в 1971 г. «принцип шартрезского

⁵⁹ Уоллес А. Место человека во Вселенной. — СПб, 1904. С. 267–290.

⁶⁰ Barrow, John D.; Tipler, Frank J. (1988). *The Anthropic Cosmological Principle*. Oxford University Press. P. 23.

ликера», согласно которому именно указанный напиток, а не человек, являлся главным продуктом точной настройки Вселенной. Справедливости ради отметим, что нечто подобное встречается в романе братьев Стругацких «Понедельник начинается в субботу», впервые изданном в 1964 г.⁶¹ (Стругацкий, 2015): «...человек – это только промежуточное звено, необходимое природе для создания венца творения: рюмки коньяка с ломтиком лимона». Вместе с тем аргументы Лема (Лем, 2004) в пользу существования множественных вселенных (Поливерсума) весьма убедительны: «Согласно действующей теории Большого взрыва, возникновение Космоса было рождающим взрывом, который сотворил одновременно материю, время и пространство. Мощное излучение миротворящего взрыва оставило свои следы в Космосе до нашего времени, так как в нем везде присутствует остаточная радиация звездного фона. В течение примерно 20 млрд лет существования Космоса излучение его первой минуты существования успело остыть до нескольких градусов выше абсолютного нуля. Однако интенсивность этого остаточного излучения не должна быть однородной на всей небесной сфере. Космос возник из точки с бесконечно большой плотностью и в течение 10–35 с раздулся до объема мяча. Уже в тот момент он был слишком большим и расширялся слишком быстро, чтобы оставаться совершенно однородным. Причинные связи событий ограничены наибольшей скоростью взаимодействия, т. е. скоростью света. Такие связи могли протягиваться только в областях размером 10–25 см, а в Космосе размером с мяч поместилось бы 1078 таких областей. Итак, то, что происходило в одних областях, не могло влиять на события в других. Тем самым Космос должен был расширяться неоднородно, без сохранения той симметрии, тех везде одинаковых свойств, какие мы наблюдаем. Теорию Большого взрыва спасает гипотеза о том, что в творящем взрыве возникло одновременно огромное количество вселенных. Наш Космос был только одним из них. Теория, согласующая однородность (гомогенность) действительного Космоса с невозможной однородностью его расширения посредством той предпосылки, что Пракосмос не был Универсумом, а был ПОЛИВЕРСУМОМ, была объявлена в 1982 г. Гипотезу Поливерсума можно найти в моей книге «Мнимая величина», которую я написал десять лет назад (в 1972 г.)».

В 1983 г. Картер заявил, что антропный принцип в его исходном виде был предназначен лишь для того, чтобы предостеречь астрофизиков и космологов от возможных ошибок в интерпретации астрономических и космологических данных, вызванных биологическими ограничениями наблюдателя. Он также добавил предостережение о том, что обратное верно и для биологов-эволюционистов; Картер утверждал, что при интерпретации эволюционных данных необходимо учитывать астрофизические ограничения процесса. Обдумав это, Картер пришел к выводу, что эволюционная цепочка может содержать только одно или два маловероятных звена, учитывая доступный интервал времени.

Таким образом, антропный принцип, возникнув в рамках классической науки, выходит за рамки чисто научной проблемы, представляя значительный интерес для богословия и философии. За 50 лет своего существования он претерпел множество формулировок, зачастую полностью изменяющих его суть, опровергался и вновь формулировался и затронул не только философов, ученых и богословов, но и вызвал большой интерес общественности. Хотя на данном этапе он представляет собой проблему философского характера, возможно, в будущем, с развитием науки, он получит научное решение, как это было с большим количеством других вопросов, сформировавшихся в рамках философии, но разрешенных научными методами, как то: атомистическая концепция, вопрос о наличии планет за пределами Солнечной системы и многие другие. В любом случае этот вопрос остается открытым и еще долгое время не утратит своей актуальности.

С точки зрения интеллектуальной беседы основная прелесть антропного принципа

⁶¹ Иными словами, до того как Картер сформулировал идею антропного принципа. Заметим, что Борис Стругацкий был профессиональным астрономом и знал о рассуждениях, лежавших в основе этого принципа.

состоит в том, что он может стать темой обсуждения, в котором участвуют ученый, философ, богослов и просто умный человек. Существует специальный веб-сайт⁶², посвященный антропному принципу. Он содержит подборку литературы, включающую более 300 наименований. Среди такого обилия ссылок заинтересовавшиеся этим вопросом смогут найти много разных подходов, включая довольно экстремальные.

3.7.3. Пульсирующая Вселенная

В том или ином виде антропный принцип вдохновил в том числе и сторонников так называемого циклического развития Вселенной, которые рассматривают другой механизм множественности миров. Представьте, что вы либо живете до создания теории Поливерсума, либо не разделяете эту гипотезу. Вдобавок вы не сторонник гипотез о том, что вселенные непрерывно появляются путем квантового рождения. Другими словами, для вас Вселенная едина и законы физики одинаковы во всех ее частях. При каких условиях в этой Вселенной возможно существование разумной жизни без привлечения сверхъестественных сил? Ответ прост: чтобы выиграть в лотерею, надо покупать билеты. Чем больше билетов – тем больше шансов выиграть. Поэтому возникла идея обеспечить несколько шансов на выигрыш, возможно даже бесконечное количество. В связи с этим возникли идеи циклической или пульсирующей Вселенной.

Представьте себе замкнутую космологическую модель, которая начинается с Большого взрыва, затем следует расширение, сменяющееся коллапсом и космологической сингулярностью в будущем. Космологическая сингулярность имеет практически официальное английское название Big Bang, обычно переводимое как Большой взрыв, хотя более точно было бы перевести его как «Большой бух». Аналогично сингулярность, которая произойдет в будущем, имеет английское название Big Crunch, которое дословно переводится как «Большой хруст», но мы иногда используем вариант имени Коровьева «Большой хрусть» в подражание звуку ломающегося от сжатия предмета. На русский язык это обычно переводят как «Большое сжатие», но этот термин лишен экспрессии, сопоставимой с английским термином.

В пульсирующей Вселенной за «хрусть» следует «бух» для новой версии Вселенной, потом опять «хрусть», опять «бух» и т. д. В результате мы имеем большое, а может, даже бесконечное число версий Вселенной, выстроенных вдоль оси времени. Можно говорить о цепи реинкарнаций Вселенной, если вам нравятся подобные сравнения.

Сколько времени проходит между концом одной версии Вселенной и началом следующей? Вопрос бессмысленный, поскольку в этом промежутке не существует Вселенной, а следовательно, и времени. Если допустить, что разные версии Вселенной могут иметь принципиально разные физические законы, мы получим нечто вроде модели Поливерсума, в которой разные миры разделены не в пространстве, а во времени. Наша версия Вселенной «вытащила выигрышный билет» в лице нас с вами.

Исторически идея пульсирующей Вселенной предшествовала идее Поливерсума, и следует признать, что по сравнению с идеей Поливерсума она имеет ряд недостатков. Во-первых, если Вселенная начинается с Большого взрыва и заканчивается Большим сжатием, то с точки зрения физики мы не можем рассматривать периоды времени до Большого взрыва и после Большого сжатия. Никто не может запретить это делать философам, но, вообще говоря, следующая версия Вселенной настолько же не связана с нашей, как и другие вселенные, рождавшиеся при квантовых флуктуациях. Почему не связана? Если бы следующая Вселенная была связана с нынешней, то и нынешняя должна была бы быть связана с предыдущей. Поскольку нет никаких способов это проверить либо доказать отсутствие такой связи, такая гипотеза не является научной.

⁶² <http://anthropic-principle.com>.

Второй аргумент против этой гипотезы заключается в следующем соображении. Почему Вселенная родилась однородной и изотропной, мы не знаем, поскольку нам неизвестны причины и механизм ее рождения. Вполне возможно, что она не была однородной и изотропной, а стала такой в результате инфляции, по крайней мере в масштабах наблюдаемой нами части.

Но, как следует из анализа гравитационной устойчивости изотропных решений, проведенного Евгением Лифшицем, на стадии сжатия она становится особо нестабильной. Флуктуации нарастают настолько, что ожидать, что Большое сжатие будет описываться однородной изотропной моделью, было бы неоправданным упрощением. В ОТО известно общее решение вблизи космологической сингулярности, найденное Владимиром Белинским, Евгением Лифшицем и Исааком Халатниковым и независимо от них Чарльзом Мизнером. Это очень сложное решение, имеющее колебательный характер и содержащее бесконечное число периодов времени, в течение которых Вселенная сжимается по двум осям и расширяется по третьей, причем в каждом периоде эти оси расположены по-своему. Уже из этого описания видно, что Большое сжатие будет совсем не похоже на изображаемую в научно-популярных фильмах картину Большого взрыва, но с обращенным знаком времени. Тогда возникает естественный вопрос: почему Вселенная, столь не изотропная перед своей кончиной, рождается столь изотропной? Следует признать, что это возражение не против самой идеи пульсирующей Вселенной, а против применения к ней моделей Фридмана.

А теперь приведем третий и главный аргумент. При существующих оценках космологических параметров наша Вселенная будет расширяться вечно, и никакого Большого сжатия в ней не наступит. Впрочем, это не означает, что не было предыдущих схлопнувшихся Вселенных, но тогда следует признать, что наша Вселенная выделена.

Таким образом, идея о пульсирующей Вселенной не дает никаких существенных преимуществ, не согласуется с наблюдениями и имеет ряд собственных недостатков.

3.8. На пути к таблице Менделеева

3.8.1. Первичный нуклеосинтез

Чем могла быть заполнена Вселенная, кроме привычных для нас галактик и звезд? Звезды и галактики сформировались во Вселенной относительно поздно; в ранней Вселенной они не существовали. На ранних этапах Вселенная представляла собой достаточно однородную среду. Вот только состав этой среды менялся в зависимости от возраста Вселенной и, соответственно, ее температуры. Так, например, был период, когда основным содержимым Вселенной было электромагнитное излучение. Протоны, электроны и другие частицы, из которых состоят привычные для нас атомы, составляли лишь небольшую часть общей плотности Вселенной. Сейчас, напротив, плотность энергии материи существенно превышает плотность энергии излучения. Был период, когда Вселенная состояла из смеси протонов и нейтронов, которые при столкновениях образовывали атомные ядра легких элементов.

Часть химических элементов образовалась непосредственно на ранних стадиях существования Вселенной, когда она была достаточно однородной. Этот процесс называется первичным нуклеосинтезом. Речь идет о тех самых первых трех минутах, описанных в книге Вайнберга (Вайнберг, 1981). После их окончания Вселенная содержала следующие элементы: $1\text{H} - 75\%$, $4\text{He} - 25\%$, $2\text{H} - 3 \times 10^{-5}$, $3\text{He} - 2 \times 10^{-5}$, $7\text{Li} - 10^{-9}$. Числа означают массовую долю отдельных элементов. Это было главным результатом космологических исследований Гамова.

Буквы с числами являются обозначениями изотопов. Буквы соответствуют обозначению химического элемента в периодической таблице и указывают число протонов в ядре, которое соответствует порядковому номеру элемента в таблице. Числа соответствуют

атомному весу изотопа в атомных единицах, т. е. общему числу протонов и нейтронов в ядре. Изотопы обычно произносятся как латинское название элемента с последующим числом, указывающим на его вес. Например, изотоп ^{238}U (произносится как уран-238) имеет 92 протона (число равно порядковому номеру урана в таблице Менделеева) и 146 нейтронов (рассчитано, как 238 минус 92).

Эта система наименований никогда не используется для изотопов водорода, называемых их собственными именами: ^1H называется протий, ^2H – дейтерий, а ^3H – тритий. Ядро протия – это просто одиночный протон, у дейтерия его называют дейтроном. Есть только один изотоп другого элемента, конкретно ^4He , ядро которого имеет собственное имя. Его называют альфа-частицей, да и то только тогда, когда он является побочным продуктом какой-то ядерной реакции или когда говорится о потоке альфа-частиц; во всех других случаях его по-прежнему называют ядром гелия-4.

Как появились ядра всех этих изотопов? Начнем с ядра с массой 1, а именно ^1H , которое является не чем иным, как протоном p^+ . Изначально после Большого взрыва отношение числа нейтронов к числу протонов было близко к 1. После стадии первичного нуклеосинтеза оно упало до примерно 1/7. Это было связано с распадом нейтронов на протоны, электроны и нейтрино.

Существует только одно ядро с массой 2: дейтерий (^2H). Обратите внимание, что дейтерий лишь условно стабилен и его очень легко разрушить.

Существует два вида ядер с массой 3: гелий-3 (^3He) и тритий (^3H), однако только первое из них стабильно. Тритий естественным образом распадается на гелий-3 с периодом полураспада 12,3 года. Тем не менее гелий-3 имеет очень большое поперечное сечение⁶³ для захвата нейтронов с образованием ядер трития.

Массу 4 имеет одно ядро: гелий-4 (^4He), также известное как альфа-частица. Оно очень стабильно, и его трудно расщепить. Это наиболее распространенный продукт, получаемый путем ядерного синтеза.

Не существует стабильных изотопов с массой 5.

Массу 6 имеют два ядра: литий-6 (^6Li) и бериллий-6 (^6Be). Реакции, в результате которых образуются эти ядра, куда чаще приводят к появлению альфа-частицы и двух нуклонов⁶⁴. Бериллий-6 имеет период полураспада 5×10^{-21} с, а литий-6 является лишь незначительно стабильным, в звездах он распадается при столкновениях ядер.

Литий-7 образовывался при слиянии трития с альфа-частицей. Еще один элемент с массой 7 – это бериллий-7, но, поскольку единственным стабильным изотопом бериллия является ^9Be , этот изотоп превращается в ^7Li путем захвата электрона.

Эти данные мы сгруппировали в табл. 3.1. Величина $t_{0,5}$ – это период полураспада изотопа, т. е. время, необходимое для распада половины исходного числа его ядер. Используются стандартные обозначения для элементарных частиц: n – это нейтрон, p^+ – протон, e^- – электрон, $\bar{\nu}_e$ – электронное нейтрино, e^+ – позитрон (антиэлектрон), $\bar{\nu}_e$ представляет собой электронное антинейтрино. Верхний индекс в виде знаков «+» или «-» обозначает электрический заряд частицы, измеренный в элементарных зарядах. Нижний индекс «e» в символе нейтрино означает его вид или аромат (см. сноску 23). Надчеркивание – стандартное обозначение античастицы. Число в конце некоторых реакций – их энергетический выход. Положительный выход означает, что вырабатывается больше энергии, чем потребляется, и реакция является энергетически выгодной, отрицательный энергетический выход означает обратное. Мы не указывали эту величину, если не могли

⁶³ Поперечное сечение является мерой вероятности прохождения некоторой ядерной реакции. Чем больше поперечное сечение, тем более вероятна реакция.

⁶⁴ Нуклон — собирательное название для частиц, из которых состоят атомные ядра, т.е. протонов и нейтронов.

найти достоверную информацию о ней.

Таблица 3.1

Изотопы, образовавшиеся при первичном нуклеосинтезе

Изотоп	p ⁺	n	t _{0,5}	Реакции
¹ H	1	0	Устойчивый	$n + e^+ \rightarrow \bar{\nu}_e + {}^1\text{H}$ $n + \nu_e \rightarrow {}^1\text{H} + e^-$
² H	1	1	Условно устойчивый	${}^1\text{H} + {}^1\text{H} \rightarrow {}^2\text{H} + e^+ + \nu_e$
³ H	1	2	12,3 лет	${}^2\text{H} + {}^2\text{H} \rightarrow {}^3\text{H} + p^+ + 4,03 \text{ МэВ}$ ${}^3\text{He} + n \rightarrow {}^3\text{H} + p^+$
³ He	2	1	Устойчивый	${}^2\text{H} + {}^2\text{H} \rightarrow {}^3\text{He} + n + 3,27 \text{ МэВ}$ ${}^3\text{H} \rightarrow {}^3\text{He} + e^- + \bar{\nu}_e + 18,6 \text{ кэВ}$
⁴ He	2	2	Устойчивый	${}^2\text{H} + {}^3\text{He} \rightarrow {}^4\text{He} + p^+ + 18,3 \text{ МэВ}$ ${}^2\text{H} + {}^3\text{H} \rightarrow {}^4\text{He} + n + 17,59 \text{ МэВ}$
⁶ Li	3	3	Условно устойчивый	${}^3\text{He} + {}^3\text{H} \rightarrow {}^6\text{Li}$ ${}^4\text{He} + {}^2\text{H} \rightarrow {}^6\text{Li}$
⁶ Be	4	2	$5 \times 10^{-21} \text{ с}$	${}^3\text{He} + {}^3\text{He} \rightarrow {}^6\text{Be} \rightarrow {}^4\text{He} + p^+ + p^+$
⁷ Li	3	4	Устойчивый	${}^4\text{He} + {}^3\text{H} \rightarrow {}^7\text{Li}$ ${}^7\text{Be} + e^- \rightarrow {}^7\text{Li}$
⁷ Be	4	3	53 дня	${}^4\text{He} + {}^3\text{He} \rightarrow {}^7\text{Be}$
⁸ Li	3	5	838 мс	${}^7\text{Li} + n \rightarrow {}^8\text{Li}$ ${}^7\text{Li} + {}^2\text{H} \rightarrow {}^8\text{Li} + p^+$
⁸ Be	4	4	$7 \times 10^{-17} \text{ с}$	${}^4\text{He} + {}^4\text{He} \rightarrow {}^8\text{Be} - 91,8 \text{ кэВ}$

Посмотрим внимательно на табл. 3.1 и сделаем некоторые выводы. В результате первичного нуклеосинтеза самыми тяжелыми ядрами в ранней Вселенной были изотопы лития и бериллия с массой 7 атомных единиц, производимые в реакциях $4\text{He} + 3\text{H} = 7\text{Li}$ и $4\text{He} + 3\text{He} = 7\text{Be}$. Однако из всех изотопов бериллия устойчивым является только ⁹Be. Поэтому со временем практически весь бериллий перешел в литий в ходе реакции захвата электрона: ${}^7\text{Be} + e^- = 7\text{Li}$. Что касается ядер с массой 6 единиц, то они образуются по одной из схем $3\text{He} + 3\text{H} = 6\text{Li}$, $3\text{He} + 3\text{He} = 6\text{Be} = 4\text{He} + p^+ + p^+$, $4\text{He} + 2\text{H} = 6\text{Li}$, две из которых могут вести к образованию устойчивого изотопа ⁶Li. Тем не менее в этих реакциях, как правило, образуется ⁴He, а лишняя пара нуклонов отторгается (для изотопа ⁶Be это происходит за $5 \times 10^{-21} \text{ с}$). Именно по этим двум причинам по концентрации изотоп ⁷Li существенно превосходит ⁶Li. Кроме того, литий производится неохотно, а распадается при температурах, легко достижимых в ядрах звезд, вследствие чего его содержание во Вселенной не очень велико.

При первичном нуклеосинтезе образовалась большая часть существующего в природе гелия, который называют первичным. Астрономам удалось из наблюдений определить процент первичного гелия, который соответствовал предсказаниям теории Гамова. Понятно, что состав Вселенной не менялся до того момента, как появились первые звезды, в которых начались реакции синтеза, т. е. реакций образования ядер более тяжелых элементов из более легких. Химический же состав первых звезд соответствовал содержанию первичных элементов. Астрономы наблюдают галактики, состоящие из очень ранних звезд. По

интенсивностям излучения спектральных линий различных химических элементов определяется средний химический состав галактики. Показателем того, насколько сильно изменился химический состав, является отношение содержания кислорода к содержанию водорода, которое в астрономии называют металличностью⁶⁵. Звезды, в которых синтез незначительно изменил химический состав, характеризуются низкой металличностью. Самые первые звезды должны были иметь нулевое значение металличности. Астрономы построили график зависимости содержания гелия, лития и дейтерия от металличности галактик и экстраполировали эту близкую к линейной зависимость на нулевое значение металличности. В результате получился химический состав, соответствующий предсказаниям теории Гамова.

3.8.2. Звездный нуклеосинтез

Почему же процесс первичного нуклеосинтеза закончился на литии? Дело в том, что в природе нет устойчивых ядер с массой 5 и 8 атомных единиц массы. В любом сочетании пяти протонов и нейтронов одна из частиц оказывается лишней и выбрасывается из ядра, которое упорно хочет остаться альфа-частицей. А образующийся при слиянии двух ядер ${}^4\text{He}$ изотоп ${}^8\text{Be}$ имеет период полураспада 7×10^{-17} с, причем распадается он на две альфа-частицы, из-за чего никак не смог повлиять на первичный нуклеосинтез.

Более тяжелые элементы образуются через углерод, производимый в звездах в так называемом цикле Бете, или тройном альфа-процессе: $4\text{He} + 4\text{He} + 4\text{He} = 12\text{C}$. Он проходит в две стадии $4\text{He} + 4\text{He} \rightarrow 8\text{Be} - 91,8 \text{ кэВ}$; $8\text{Be} + 4\text{He} \rightarrow 12\text{C} + 7,37 \text{ МэВ}$. Скорость этой реакции пропорциональна кубу концентрации гелия, и поэтому образование углерода идет очень медленно; сколь-либо заметное количество углерода накапливается десятки тысяч лет. Первичный же нуклеосинтез занял всего три минуты, после чего температура стала слишком низкой.

Тройной альфа-процесс требует, чтобы изотоп ${}^8\text{Be}$ создавался быстрее, чем он распадается, что возможно только при экстремальных температурах и давлениях. Такие условия стали доступны только после появления первых звезд. После того как образовался углерод, запускается цепочка реакций производства более тяжелых изотопов: $12\text{C} + 4\text{He} \rightarrow 16\text{O} + 7,16 \text{ МэВ}$; $16\text{O} + 4\text{He} \rightarrow 20\text{Ne} + 4,73 \text{ МэВ}$; $20\text{Ne} + 4\text{He} \rightarrow 24\text{Mg} + 9,32 \text{ МэВ}$; $24\text{Mg} + 4\text{He} \rightarrow 28\text{Si} + 9,98 \text{ МэВ}$; $28\text{Si} + 4\text{He} \rightarrow 32\text{S} + 6,95 \text{ МэВ}$; $32\text{S} + 4\text{He} \rightarrow 36\text{Ar} + 6,64 \text{ МэВ}$; $36\text{Ar} + 4\text{He} \rightarrow 40\text{Ca} + 7,04 \text{ МэВ}$; $40\text{Ca} + 4\text{He} \rightarrow 44\text{Ti} + 5,13 \text{ МэВ}$; $44\text{Ti} + 4\text{He} \rightarrow 48\text{Cr} + 7,70 \text{ МэВ}$; $48\text{Cr} + 4\text{He} \rightarrow 52\text{Fe} + 7,94 \text{ МэВ}$; $52\text{Fe} + 4\text{He} \rightarrow 56\text{Ni} + 8,00 \text{ МэВ}$.

${}^{40}\text{Ca}$ является последним стабильным изотопом в этом списке. Позже ${}^{36}\text{Ar}$, ${}^{44}\text{Ti}$, ${}^{48}\text{Cr}$, ${}^{52}\text{Fe}$ и ${}^{56}\text{Ni}$ распадаются, образуя остальные элементы вплоть до ${}^{56}\text{Fe}$. Еще более тяжелые элементы образуются в результате захвата нейтронов, который идет либо медленно (s-процесс), либо быстро (r-процесс). S-процесс производит элементы вплоть до свинца, а r-процесс происходит при вспышках сверхновых и производит остальную часть таблицы Менделеева. Все эти процессы происходят на разных этапах эволюции Вселенной.

Как в ранней Вселенной, так и внутри звезд могут образовываться элементы не тяжелее железа. В то же время на Земле существуют залежи более тяжелых элементов, например урана. Откуда же они взялись? Считается, что более тяжелые элементы синтезируются во время взрывов новых и сверхновых звезд. Из частей сброшенной во время взрыва оболочки могут образоваться новые звездные системы. Так и произошло с нашим Солнцем, которое образовалось из остатков взрыва предыдущей звезды. Астрономы называют такие звезды звездами второго поколения.

Расчеты показывают, что наблюдаемое обилие тяжелых элементов требует по меньшей

⁶⁵ В астрономии металлом считается любой элемент тяжелее гелия. Химики шокированы.

мере двух последовательных вспышек сверхновых и Солнце – это молодая звезда третьего поколения. Таким образом, Солнце вместе с Землей, да и мы с вами появились из хлама, оставшегося после взрыва сверхновой, которая сама уже была «секонд-хендом». Мы упоминали, что изучение науки может быть вредным для вашего эго?

Почему же в нашем Солнце так много водорода и гелия (более 80 %), если оно – звезда второго или третьего поколения? Разве весь водород и гелий не «выгорели» в предыдущей звезде, превратившись в углерод и более тяжелые элементы? Весь водород не переходит в другие элементы потому, что его концентрация во внешних слоях звезды больше, чем в центре, да и в центре она не падает до нуля. Просто ядро «отравляется» продуктами синтеза, т. е. концентрация водорода в нем становится меньше, чем нужно для поддержания баланса гравитационного и светового давлений, что и является причиной взрывов сверхновых. Таков механизм всех вспышек сверхновых, кроме самых мощных вспышек типа Ia, о которых мы поговорим в подразделе 5.1.1.

Но в центре остается еще очень много водорода. Ядра до железа ^{56}Fe синтезируются путем слияния более легких ядер в недрах массивных звезд, синтез тяжелых и сверхтяжелых ядер идет путем нейтронного захвата в предсверхновых звездах и при взрывах сверхновых. Сверхтяжелые элементы не образуются в обычных звездах, поскольку этот процесс энергетически невыгоден, но при взрыве сверхновой образуется избыток энергии, которая частично расходуется на эти процессы. Поскольку взрывы сверхновых длятся недолго, тяжелых элементов вырабатывается относительно мало.

Замечательным свойством теории Гамова оказалось то, что она была открытой, т. е. допускала уточнения на основе новых более поздних теорий. Так, например, теория ядерных сил была разработана в конце XX в. Соответствующая теория, называемая квантовой хромодинамикой, основана на том, что барионы состоят из трех фундаментальных частиц, называемых кварками, а мезоны⁶⁶ – из двух. Барионы – это протоны, нейтроны и все более тяжелые частицы, испытывающие ядерные силы, называемые в науке сильным взаимодействием. Переносчиками ядерных сил являются частицы, называемые глюонами. Благодаря этому открытию в стандартную космологическую модель добавилось представление о том, что на ранней стадии существования Вселенной, до появления протонов и нейтронов, она была заполнена кварк-глюонной плазмой.

3.8.3. Проблема антиматерии

Среди физиков существует общее убеждение, что все в мире должно быть симметричным, если не доказано иное. Таким образом, предполагается, что во Вселенной должно быть равное число частиц и античастиц. Действительно, когда рождаются элементарные частицы, они рождаются парами: рождение каждой частицы сопровождается рождением ее античастицы.

Почему Вселенная заполнена материей, а не материей пополам с антиматерией? В противном случае некоторые галактики состояли бы из материи, а некоторые – из антиматерии. По их излучению невозможно было бы различить, из чего они состоят, поскольку квант света, фотон, обладает уникальным свойством: его античастица совпадает с ним самим. Но между областями из материи и антиматерии должны существовать границы, на которых происходили бы процессы, которые наблюдали бы астрономы.

Если где-то в космосе встречаются частица и ее античастица, происходит

⁶⁶ Мезоны — нестабильные субатомные частицы, получаемые в очень высокоэнергетических реакциях. Они играют важную роль в объяснении ядерных сил. Наиболее известный мезон — пион (пи-мезон). Еще две частицы традиционно называются мезонами исключительно из-за своей массы: мюон (мю-мезон) и тау (тау-мезон). Они не имеют ничего общего с ядерными силами и, по сути, являются лептонами с избыточным весом.

аннигиляция⁶⁷, при которой обе эти частицы исчезают, а вместо них появляется два или три фотона. Простейшим примером аннигиляции является аннигиляция пары электрон-позитрон. Если их скорости существенно меньше скорости света, то энергия как электрона, так и позитрона будет равна примерно 500 кэВ. Соответственно, если происходит двухфотонная аннигиляция, то энергия каждого из фотонов также будет равна 500 кэВ.

Обнаружив излучение с такой энергией, мы понимаем, что видим результат аннигиляции. Источник подобного излучения зафиксирован, например, в центре нашей Галактики. Но излучение не слишком сильное, из чего видно, что позитроны в нашей Галактике встречаются очень редко. Если бы галактики из вещества и галактики из антивещества – «антигалактики» – встречались во Вселенной, то в области между ними соприкасались бы и аннигилировали межгалактический газ и пыль от галактики с «антигазом» и «антипылью» от «антигалактики». Но поскольку таких мощных источников, связанных с аннигиляцией, найти не удалось, приходится признать, что в видимой части Вселенной антивещество практически отсутствует.

В чем же причина этой асимметрии между частицами и античастицами? Почему первых много, а вторых мало? Неужели Вселенная образовалась так, что в ней было больше вещества, чем антивещества? Можно предложить другой ответ. Эксперименты на ускорителях показали, что в природе нет полной симметрии между частицами и античастицами. В частности, нарушается четность⁶⁸ при слабых взаимодействиях.

Даже если в момент образования Вселенной в ней не было ни частиц, ни античастиц, они вскоре появились в процессах образования пар частица – античастица при столкновении фотонов. Частицы и античастицы заполняли Вселенную. Они взаимодействовали друг с другом, образуя новые частицы. Но за счет нарушения четности число частиц и античастиц могло слегка отличаться. Предположим, что частиц было на одну миллиардную долю больше, чем античастиц. При расширении и остывании Вселенной практически все античастицы проаннигилировали с частицами, а из оставшейся одной миллиардной части образовалась вся материя, которую мы можем наблюдать.

Андрей Сахаров выдвинул гипотезу о том, что обсуждаемая асимметрия могла возникнуть из-за сочетания трех факторов: нарушения CP-симметрии, несохранения барионного заряда (т. е. барион может распадаться на лептоны⁶⁹), а также расширения Вселенной, которое препятствует установлению теплового равновесия.

Существуют и другие возможные объяснения. Согласно одному из них, предполагается, что существует одинаковое количество материи и антиматерии, но они почему-то разнесены в пространстве. Однако оно не подкреплено какими-либо эмпирическими данными.

⁶⁷ Аннигиляция — реакция между частицей и античастицей, превращающая их обоих в фотоны с чрезвычайно высокой энергией, равной суммарной энергии исходных частиц.

⁶⁸ Четность — это симметрия по отношению к инверсии всех пространственных координат, что эквивалентно зеркальному отражению. Нарушение четности было открыто Янг Чжэньнином и Ли Чжэндао, которые были удостоены за это Нобелевской премии по физике в 1957 г. В 1980 г. Джеймс Кронин и Вал Фитч получили Нобелевскую премию за открытие нарушения CP-инвариантности — преобразования, при котором помимо пространственной инверсии меняется знак всех электрических зарядов. Этот более сложный вариант симметрии называется комбинированной четностью. В настоящее время считается, что должна выполняться CPT-симметрия, при которой к названным преобразованиям добавляется изменение направления течения времени. Из CPT-симметрии и нарушения CP-инвариантности следует, что не существует никакой симметрии относительно обращения времени. Некоторые исследователи выдвигают гипотезу о нарушении CPT-инвариантности и связанном с этим явлении, называемом спонтанным бариогенезисом.

⁶⁹ Лептон — это легкая элементарная частица, которая не участвует в сильном взаимодействии. Наиболее известные лептоны — это электрон и различные сорта нейтрино.

Глава 4 Темная материя

4.1. Революция приближается

За века своего существования физика нарисовала картину мира. Тела состоят из молекул, те – из атомов, атомы имеют компактное ядро, окруженное электронным облаком. Ядро, в свою очередь, состоит из протонов и нейтронов, скрепленных вместе мезонами. Но за два последних десятилетия неожиданно выяснилось, что 95 % того, чем заполнена Вселенная, не состоит ни из молекул, ни из атомов, ни из нуклонов. Иными словами, все это время физики изучали лишь 5 % нашей Вселенной. Предвещающий революцию «залп Авроры» произошел внезапно, и не все физики поняли его важность. Если 30 лет на вопрос: «Чего во Вселенной больше всего?» правильным ответом считалось: «Водорода», то сейчас правильным ответом считается: «Темной энергии и темной материи». Само по себе изменение ответа несущественно – в физике не раз бывали подобные ситуации. Гораздо хуже то, что на вопрос: «Что такое водород?» мы можем долго и уверенно отвечать с демонстрацией опытов. На вопросы же «Что такое темная энергия?» и «Что такое темная материя?», положив руку на сердце, мы должны ответить: «Не знаем». Фактически все, что мы о них знаем, – это сам факт их существования (да и то некоторые в нем сомневаются) и кое-какие свойства этих загадочных сущностей.

Физика уже сталкивалась с новым полем деятельности, с новыми явлениями, которые надо было исследовать и объяснить. Но каждый раз эти явления лежали «внутри физики» и для их исследования использовали стандартный подход, приносивший успех в течение столетий. Проводили опыты, выдвигали гипотезы, строили теории, основанные на математическом аппарате, сравнивали их с результатами опытов и, наконец, вырабатывали новые парадигмы. Вызов, брошенный физике сейчас, не вписывается в привычную схему. Дело в том, что о существовании темной энергии мы знаем только из космологии, а о существовании темной материи – из астрономии и космологии. Совершенно непонятно, каким образом можно ставить опыты по изучению темной энергии.

С темной материей ситуация несколько иная. Во многих лабораториях ведутся эксперименты по поиску темной материи. Однако существует возможность, что темная материя принципиально не может быть обнаружена в таких экспериментах. В этом случае физики будут вынуждены полагаться исключительно на инструментальный и методы астрономии, а также результаты астрономических наблюдений. Будет невозможно проведение эксперимента. Вдобавок даже с наблюдениями есть проблемы. Мы можем наблюдать множество галактик, но всего одну Вселенную. Для астрономических данных мы имеем повторяемость и репрезентативность, возможность применения статистических методов. Но не в космологии.

Можно провести такую аналогию. Каждый раз, когда физики обнаруживали на своем пути забор, скрывающий неизвестное, они находили способы его проломить, перелезть через него или в крайнем случае проковырять в нем дырочку. Возможно, забор, возникший на этот раз, окажется куда выше и прочнее, и узнать что-то о том, что находится за ним, физикам удастся разве что по наблюдениям отклонений полета птиц, пролетающих в вышине. Конечно, ситуация может оказаться не столь печальной, если частицы темной материи удастся зафиксировать в наземных, точнее подземных, экспериментах.

Вернемся к космологии. Наука не стоит на месте, и сейчас под термином «стандартная космологическая модель» мы понимаем уже другую теорию. Она сочетает отдельные элементы теории Гамова и неизвестные в те времена новые понятия, такие как «темная энергия» и «темная материя». Современная стандартная космологическая модель называется еще Λ CDM-моделью. Как мы уже говорили в разделе 2.8, буква Λ (лямбда) обозначает

космологическую постоянную, а CDM – это сокращение от английских слов «cold dark matter» – «холодная темная материя». Из этой главы вы узнаете, почему материя темная и холодная, хотя, забегаая вперед, можно сказать, что она холодная в том смысле, что скорости составляющих ее частиц существенно меньше скорости света.

Перейдем от философии к сухим фактам. По данным нескольких независимых источников (они будут описаны дальше в этой главе), мы получаем следующее процентное распределение плотности содержимого Вселенной. Больше всего во Вселенной темной энергии – $69,11 \pm 0,62 \%$, затем идет темная материя – $25,89 \pm 0,57 \%$, затем – обычная барионная материя – $4,86 \pm 0,10 \%$. На долю излучения и нейтрино остается менее $0,1 \%$. Это соотношение показано на рис. 4.1.

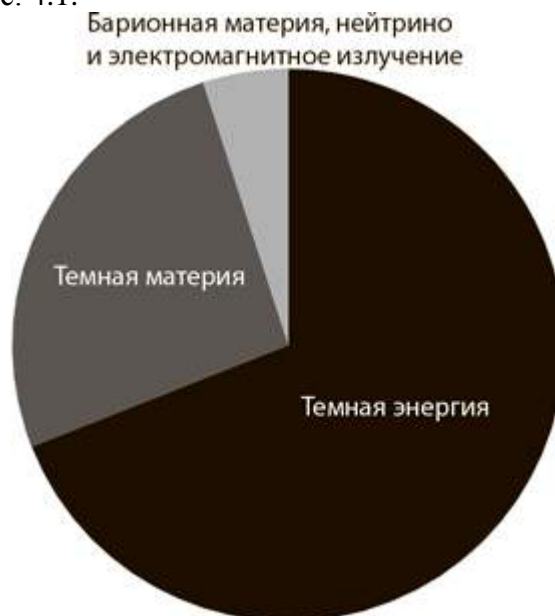


Рис. 4.1. Современная оценка состава Вселенной

Кроме того, полная плотность нашей Вселенной близка к критической плотности, равной $9,31 \times 10^{-27}$ кг/м³, что соответствует плотности энергии 1 эрг на 100 м³. Отклонение полной плотности от критической составляет $0,9^{+0,9+0,2}_{-1,0-0,3} \%$

по результатам пяти лет наблюдения WMAP, дополненным другими данными.

Заметим, что такое маленькое значение убедительно свидетельствует в пользу теории инфляции. Таким образом, умножив критическую плотность на процент темной материи во Вселенной, можно получить ее среднюю массовую плотность. Аналогично можно рассчитать среднюю плотность обычной материи и темной энергии.

Далее мы подробнее расскажем, на основании чего были сделаны выводы о том, что в картину мироздания необходимо добавить темную материю и темную энергию. И начнем с темной материи, поскольку о ней известно все-таки немного больше, чем о темной энергии.

4.2. Свидетельства существования темной материи

Пора наконец объяснить, что понимается под термином «темная материя». Начнем с того, что перечислим основные свойства темной материи, известные в настоящее время:

- темная материя взаимодействует с обычной гравитационно, т. е. притягивает ее;
- возможно, она участвует также в слабом взаимодействии с обычной материей, но это лишь предположение;
- она не участвует в электромагнитном взаимодействии, поэтому не обладает зарядом, не способна поляризоваться, не взаимодействует с электромагнитными полями и прозрачна для света и радиоволн, что означает, что она невидима;
- она не участвует в сильном взаимодействии, поэтому не накапливается в атомных

ядрах;

- темной материи во Вселенной в пять раз больше обычной;
- все галактики окружены гало из темной материи;
- скорость темной материи намного меньше скорости света. Такую темную материю называют холодной;
- мы не знаем, что это такое, но уверены, что она не состоит из барионов, образующих обычную (барионную) материю.

4.2.1. Вириальная масса

Понятно, что эта информация стала известна не сразу. Первые представления о темной материи появились в работе Фрица Цвикки 1933 г. Речь тогда шла об обычной материи, которая по каким-то причинам не излучала свет. Иными словами, в дополнение к светящейся материи, сосредоточенной в звездах, должна существовать темная материя, не излучающая свет. Понятно, что в работе Цвикки, написанной через год после открытия нейтрона Джеймсом Чедвиком, речь никак не могла идти про небарионный характер темной материи, так как само понятие барионов только появилось. Тогда считалось, что темная материя представляет собой пыль, несветящийся газ, впоследствии рассматривался вариант большого количества массивных планет размером с Юпитер или мелких метеоров – другими словами, любых привычных для астрономов несветящихся объектов. Сейчас существование подобных объектов также допускают, их называют барионной темной материей. Однако ключевым является слово «барионная», поскольку в распределении плотности она относится к обычной материи.

Цвикки пришел к выводу о существовании темной материи следующим образом. Он исследовал движения отдельных галактик, входящих в скопление Волосы Вероники, содержащего около 1000 галактик. Затем он воспользовался теоремой вириала, связывающей средние потенциальную и кинетическую энергии для замкнутых гравитационно связанных систем, и получил независимую оценку массы системы.

К его удивлению, значение оказалось в 160 раз больше массы, полученной по анализу светимостей. Правда, как выяснилось впоследствии, Цвикки ошибся почти в четыре раза из-за того, что использовал неправильное значение постоянной Хаббла, принятое в то время. Современная оценка отношения вириальной массы этого скопления к массе составляющих его звезд близка к 40.

Впоследствии и при исследовании других скоплений, связанных гравитационно, вириальная масса оказывалась существенно больше массы светящейся компоненты. Оказалось, что типичный объект подобного рода содержит 85 % темной материи, 13 % горячего межзвездного газа и 2 % звезд. Таким образом, отношение полной массы к массе светящейся в оптическом диапазоне компоненты составляет около 50, а отношение масс темной и барионной материи в скоплениях – около 6. Естественно, что эти значения меняются от скопления к скоплению. Что касается горячего газа, то его массу можно определить по параметрам испускаемого им рентгеновского излучения. В частности, температура рентгеновского излучения связана с вириальной массой и позволяет получить ее независимую оценку.

Наиболее близкое к нам скопление – это Местная группа, состоящая из нашей Галактики с ее спутниками (Магеллановы Облака, карликовая галактика в созвездии Стрельца и др.), галактики М31 (Андромеды) с ее спутниками (М32, М110 и др.) и галактики М33 (Треугольника) с ее спутником – карликовой галактикой в созвездии Рыб. Всего же в нее входит более 50 отдельных галактик. Полная вириальная масса Местной группы, по данным Игоря Караченцева и Ольги Кашибадзе, составляет $(1,29 \pm 0,14) \times 10^{12} M_{\odot}$, где M_{\odot} – масса Солнца⁷⁰. Масса галактики Андромеды составляет $7,1 \times 10^{11} M_{\odot}$, масса нашей

⁷⁰ Символ \odot астрономы используют для обозначения Солнца.

Галактики примерно равна $5,7 \times 10^{11} M_{\odot}$ (ее особо трудно измерить, так как мы видим ее изнутри), а масса галактики Треугольника существенно меньше и равна $5 \times 10^{10} M_{\odot}$. Суммарная масса всех остальных галактик не превосходит $10^{10} M_{\odot}$. Существуют и большие по величине оценки массы Местной группы. В то же время масса светящейся материи в двух самых больших галактиках Местной группы оценивается в $2 \times 10^{11} M_{\odot}$. Как видим, и здесь большая часть полной массы приходится на несветящуюся материю.

4.2.2. Кривые вращения галактик

Как астрономы определили массы других галактик? Наиболее простой способ заключается в построении кривой вращения данной галактики. Это скорость, с которой звезды вращаются вокруг центра галактики в зависимости от расстояния до этого центра.

Пусть звезда вращается по круговой орбите радиуса r . Обозначим $M(r)$ массу части галактики, заключенной внутри сферы радиуса r . Если эта масса сосредоточена в центре или распределена сферически симметрично, то скорость вращения звезды $v(r)$ определим из условия равенства силы притяжения к центру и центробежной силы. Естественно, мы

получим формулу Кеплера для движения по круговой орбите $v(r) = \sqrt{GM(r)/r}$.

Измерив зависимость $v(r)$, мы можем восстановить зависимость $M(r)$. При этом следует учесть, что, если бы галактика не содержала темной материи, ее масса была бы сосредоточена в ее диске, т. е. ее гравитационное поле не было бы сферически симметричным. Поэтому, строго говоря, формула для скорости не совсем верна и могла бы использоваться только для оценки. Однако, как оказалось, основная часть массы галактики связана с темной материей, распределение которой, как считают астрономы, достаточно симметрично, поэтому формула Кеплера вполне адекватна.

Осталась одна небольшая деталь: научиться измерять зависимость $v(r)$. Не для всех галактик это возможно. Если плоскость галактики перпендикулярна направлению на Землю, то скорости вращения звезд имеют только тангенциальные компоненты и не могут быть измерены существующими методами. Если же плоскость галактики наклонена, то скорости вращения звезд имеют еще и радиальные компоненты. В этом случае их можно определить по эффекту Доплера. На рис. 4.2 показана галактика, вращающаяся против часовой стрелки так, что спиральный рукав в точке А движется на нас, а в точке С – от нас. Рисунок сделан в галактической плоскости, наблюдатель на Земле расположен внизу. Эти скорости вращения складываются со скоростью, с которой центр галактики, расположенный в точке В, удаляется от нас. В результате в точке А спектры излучения будут дополнительно сдвинуты в фиолетовую область по сравнению с точкой В, а в точке С – в красную область. Анализируя наблюдаемый спектр галактики, можно определить направление вращения галактики и скорость вращения ее частей. Далее, зная угол наклона плоскости галактики к направлению на Землю, мы можем определить форму кривой вращения. Угол наклона определяется из предположения, что диск галактики круглый, а наблюдаемая эллиптичность связана с ее наклоном. Чем больше угол наклона, тем точнее можно определить кривую вращения. В этом смысле идеальными являются галактики, видимые с ребра.

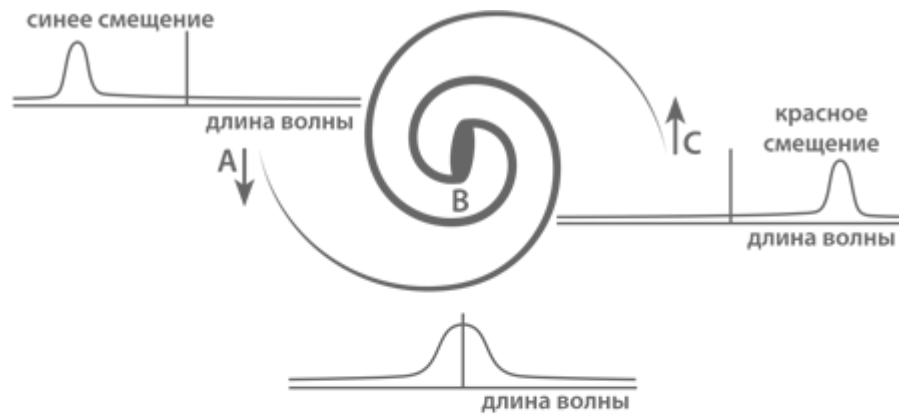


Рис. 4.2. Скорость вращения галактики можно оценить с помощью измерений положения линии (H α) спектра излучения атомов водорода. На спектрах различных частей галактики показано доплеровское смещение спектральной линии излучения из-за ее вращения. Вертикальная линия показывает положение линии при наблюдении центра галактики

Естественно, что для того, чтобы получить кривую вращения, мы должны рассмотреть с помощью телескопа разные части галактики. Это можно сделать только для не очень далеких галактик. Для галактик со слишком маленькими угловыми размерами мы не можем получить кривую вращения. Вместо этого мы можем определить ширину линий излучений галактики. В основном она связана с доплеровским сдвигом света, излученного разными частями галактики. В результате вместо кривой вращения мы можем получить только оценку характерной средней величины скорости вращения. Ширина линий излучения активно используется во внегалактической астрономии, но для иллюстрации существования темной материи кривые вращения куда нагляднее.

На рис. 4.3 показано изображение галактики М33 (Треугольник), входящей в Местную группу, т. е. одной из самых близких к нам галактик. На него наложена кривая вращения этой галактики таким образом, что масштаб расстояний совпадает с масштабом изображения. Обратим внимание, что кривая вращения приведена для области, существенно превосходящей видимые размеры галактики. Как это было сделано? Для этого использовались наблюдения небольших водородных облаков, вращающихся вокруг галактики вне ее видимой области. Естественно, закон Кеплера для них выполняется точно так же, как и для звезд. На рисунке кроме реальной кривой вращения изображена теоретическая кривая вращения, которую имела бы эта галактика, если бы вся ее масса была сосредоточена в светящейся компоненте. Легко понять, что за пределами видимой части галактики $M(r)$ доля светящейся материи становится постоянной и $v(r)$ в отсутствие темной материи падала бы по закону $v \sim r^{-1/2}$. В то же время реальная кривая вращения, напротив, продолжает возрастать далеко за пределами видимой области, показывая, что там должно существовать нечто, вносящее вклад в общую массу галактики. Это и есть темная материя. Согласно существующим представлениям, все галактики окружены гало из темной материи (см. рис. 4.4), размеры которого существенно превосходят размеры видимой части галактики.

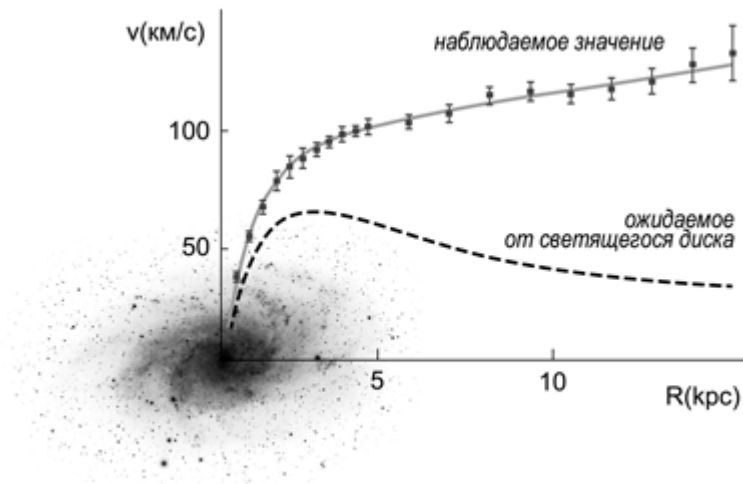


Рис. 4.3. Кривая вращения галактики М33
темная
материя

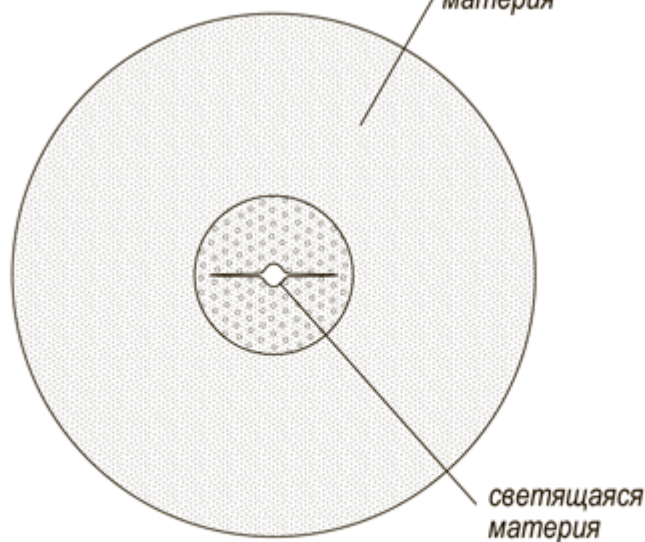


Рис. 4.4. Светящиеся части каждой галактики —
диск и балдж (на рисунке — белые) и звездное гало (темно-серый) —
окружены гораздо большим темным гало (светло-серый)

Если мы посмотрим на кривые вращения чуть более далеких галактик, то увидим, что $v(r)$ иногда выходит на постоянное значение в широких интервалах изменения r . Такие кривые вращения называются плоскими. Забавно, что в Facebook даже была создана специальная группа сторонников того, что все кривые вращения можно считать плоскими. Эта группа с незатейливым названием «Кривые вращения галактик – плоские» выпустила по этому поводу свой меморандум. Вскоре после этого в той же соцсети появилась группа противников подобного обобщения, справедливо указывающая, что далеко не все кривые вращения галактик можно считать плоскими. Она также выпустила свой меморандум, а ее лидеры организовали серию научных семинаров по всему миру с целью развеять этот миф. К счастью, в научном мире справедливость той или иной гипотезы не определяется количеством лайков в социальных сетях.

Существует одна галактика, кривую вращения которой нельзя определить описанным выше способом. Это – наша Галактика, которую мы видим изнутри. Тем не менее кривая вращения нашей Галактики также получена астрономами, правда с меньшей точностью, чем для близлежащих галактик. Из параметров орбиты Солнца вокруг центра Галактики (радиус

– 26 400 св. лет, период – 230 млн лет) по закону Кеплера нетрудно рассчитать массу материи, заключенную внутри орбиты Солнца, – она равняется $1,0 \times 10^{11} M_{\odot}$. Полная же масса нашей Галактики составляет около $10^{12} M_{\odot}$.

4.2.3. Отношение масса – светимость

Другой способ определения содержания темной материи связан с использованием отношения массы M светящегося объекта к его светимости L , которая обозначается Y (греческая буква ипсилон). Поскольку массы звезд и галактик в астрономии традиционно меряются в солнечных массах, а светимости – в светимостях Солнца, эта величина измеряется в единицах отношения солнечной массы к солнечной светимости, равной $Y_{\odot} = 5133 \text{ кг/Вт}$ ⁷¹. В давние времена астрономы при оценке масс исходили из того, что Солнце – типичная звезда. Они были почти правы, поскольку наиболее типичная звезда нашей Галактики – карлик с массой, вдвое меньшей массы Солнца. Поэтому, если светимость какого-то объекта, состоящего из звезд, в N раз превышала светимость Солнца, считалось, что его масса в N раз больше солнечной. Присутствие темной материи повышает массу, но не дает вклад в светимость. Поэтому исследования отношения массы к светимости для разных объектов позволяют говорить о наличии темной материи. Вблизи Солнца, где 99 % звезд слегка легче Солнца, $Y = (2,5-7) Y_{\odot}$, для звезд в галактическом диске $Y = (1-1,7) Y_{\odot}$, типичное значение для галактик $Y = (2-10) Y_{\odot}$.

Понятно, что если значение Y существенно больше, чем у типичного объекта того же типа, такой объект должен содержать большое количество темной материи. Хотя по этому параметру невозможно понять, идет ли речь о барионной или небарионной темной материи. В качестве примера такого объекта вновь рассмотрим скопление галактик в созвездии Волосы Вероники, в котором Цвикки и обнаружил темную материю. Для него отношение массы к светимости Y доходит до 400. Высокие значения этой величины часто встречаются у карликовых сферических галактик, например в галактике в созвездии Дракона $Y = (330 \pm 125) Y_{\odot}$. Активное скопление AC 114 имеет еще более низкую удельную светимость: $Y = (700 \pm 100) Y_{\odot}$. Особым случаем является открытая в 2006 г. карликовая дисковая галактика Segue 1 в созвездии Льва, барионная масса которой составляет всего 1000 масс Солнца, а светимость – 300 светимостей Солнца. Для нее отношение массы темной материи к массе барионной материи оценивается от 200 до 2000 и даже 2500. Такой разброс в оценках связан с тем, что непонятно, вращается ли эта галактика.

Еще более интересна открытая годом ранее галактика VIRGOH121, находящаяся в созвездии Девы на расстоянии 50 млн св. лет, практически полностью состоящая из темной материи. Она является первой из так называемых темных галактик. Для нее отношение массы к светимости составляет около 500. Она была открыта по наблюдениям в линии нейтрального водорода с длиной волны 21 см, причем ширина линии указывала на большую скорость вращения и, соответственно, большую массу $10^{10}-10^{11} M_{\odot}$. Общая масса водорода в этой галактике существенно меньше и равна $2 \times 10^8 M_{\odot}$. Снимки этого участка неба в оптическом диапазоне не показывали ничего – даже специальные наблюдения космического телескопа «Хаббл» позволили обнаружить всего несколько сотен звезд.

Как видим, галактиками с наибольшими отношениями массы к светимости являются либо карликовые, либо темные галактики. И те и другие трудны для обнаружения, и нам известно гораздо меньше таких галактик по сравнению с нормальными галактиками. Тем не менее своим присутствием они увеличивают отношение массы к светимости Вселенной,

⁷¹ Так что надо более 5 т солнечного вещества, чтобы произвести 1 Вт мощности. Если бы наиболее распространенная 60-ваттная лампа накаливания работала с той же эффективностью, ее вес был бы порядка 300 т — столько, сколько весят шесть танков, два тепловоза или нагруженный самолет C-5 Galaxy.

которое сейчас оценивается в $100 Y_{\odot}$.

4.2.4. Слияния галактик

Но темные галактики оказались не единственным неожиданным подтверждением существования темной материи. В 2002 г. группа американских астрономов под руководством Максима Маркевича обнаружила, что одно из наиболее горячих скоплений галактик 1E 0657-56 на самом деле представляет собой результат столкновения двух скоплений галактик. Этот объект получил название «Пуля» (Bullet). При столкновении звезды и темная материя прошли сквозь друг друга, а горячий газ в результате столкновения потерял скорость и остался посередине. При этом температуры газа в двух скоплениях составляли 70 и 100 млн градусов, а относительная скорость – около 2700 км/с. В 2004 г. те же самые астрономы, исследуя это скопление, получили ограничения на сечение взаимодействия темной материи и восстановили распределение плотности материи по эффекту слабого гравитационного линзирования, о котором мы расскажем немного позже. Это показано на рис. 4.5, где цветом изображена температура, полученная по наблюдениям в рентгеновском диапазоне, а линиями – уровни плотности. Нетрудно заметить, что области максимальной плотности и максимальной температуры пространственно разделены. К 2006 г. был промоделирован процесс столкновения двух скоплений, приводящий к наблюдаемой картине распределения как плотности материи в целом, так и горячего газа – источника рентгеновского излучения. Модель подтвердила существование темной материи на доверительном уровне 8σ ⁷². Анимированный видеоролик с результатами моделирования можно посмотреть на сайте космической рентгеновской обсерватории Chandra⁷³, на основании данных которой и было сделано это открытие. Впоследствии аналогичный результат был получен для другого скопления – MACS J0025.4-1222.

⁷² Доверительный уровень 8σ означает, что вероятность того, что нет никакой темной материи и наблюдаемые распределения были вызваны случайными флуктуациями, равна вероятности события, когда Земля столкнется с другой планетой в любой заранее выбранный день (но это предположительно произошло один раз).

⁷³ http://chandra.harvard.edu/photo/2006/1e0657/1e0657_bullett_anim_lg.mpg.

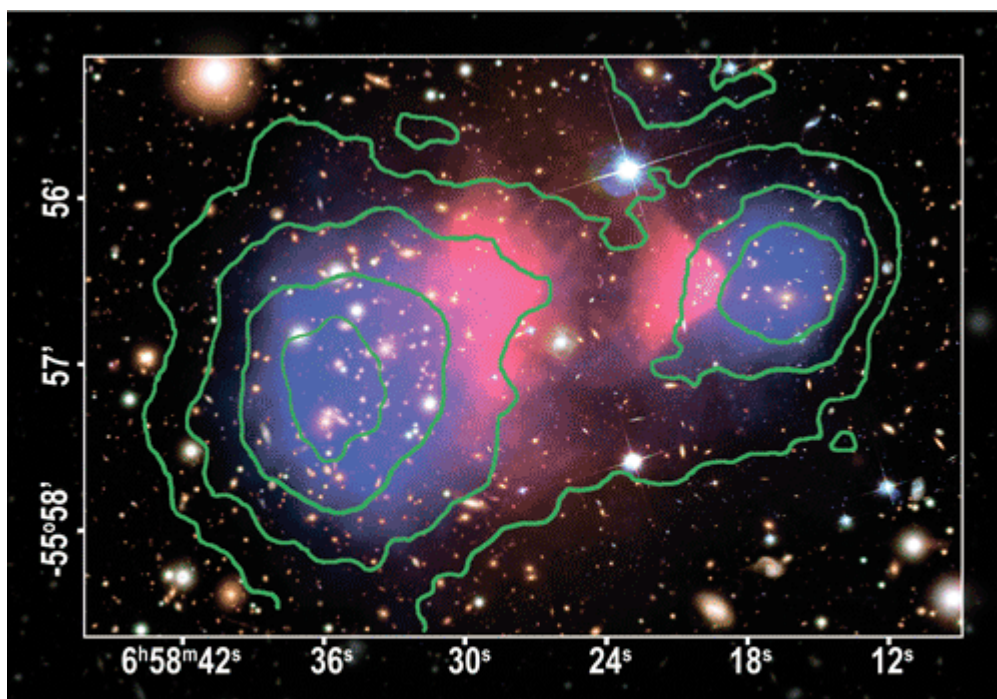


Рис. 4.5. Скопление «Пуля». Зеленые линии показывают изоденсы — уровни одинаковой плотности, красный и синий цвета соответствуют рентгеновскому излучению от более холодных и более горячих областей

4.2.5. Космические потоки

Все свидетельства существования темной материи сводятся к определению массы по ее гравитационному воздействию на окружающие объекты. Понятно, что это — единственный способ обнаружить темную материю, взаимодействующую только гравитационно. Такую темную материю называют зеркальной материей. Согласно наиболее распространенной гипотезе, в качестве такой материи могли бы выступать не открытые еще массивные частицы, называемые стерильными нейтрино. Исследуя кривые вращения, мы исследуем гравитационное воздействие на масштабах галактики, находя вириальную массу — на масштабе скопления. Сейчас мы посмотрим на результат гравитационного взаимодействия на больших масштабах, исследуя крупномасштабные нехаббловские движения галактик. С одной стороны, эти движения можно трактовать как падение галактик на области с повышенной плотностью материи. С другой, их можно рассматривать как результат развития начальных флуктуаций плотности и скорости во Вселенной, которые развивались в тесной взаимосвязи друг с другом. В результате флуктуации плотности развились в известную нам структуру Вселенной, а флуктуации скорости — в описываемые нехаббловские движения галактик. В этом методе галактики рассматриваются не как носители массы, а как пробные частицы в общем гравитационном поле Вселенной.

Скорость такого нехаббловского движения галактики, называемая пекулярной скоростью галактики, равняется разности ее истинной скорости и скорости, определенной по закону Хаббла (напомним, что речь идет только о лучевых, т. е. радиальных, скоростях). Истинная скорость галактики известна нам с большой точностью по измерению красного смещения. Что же касается скорости хаббловского разбегания, ее определить заметно сложнее, поскольку для этого требуется иметь независимую оценку расстояния до галактики. Откуда ее взять? Для близких галактик мы можем использовать методы оценивания расстояния по цефеидам или по вершине ветви красных гигантов⁷⁴, которые являются

⁷⁴ Это относится к деталям диаграммы Герцшпрунга — Рассела «цвет — светимость» для звезд.

своего рода «стандартными свечами» во внегалактической астрономии. Но для более-менее удаленных галактик, где отдельные звезды не видны в телескоп, этими методами уже не удастся воспользоваться. Расстояние до таких галактик определяется косвенно, используя статистические зависимости. Для определения расстояний до эллиптических галактик используется так называемый метод фундаментальной плоскости, а для спиральных – соотношение Талли – Фишера. Эти методы позволяют оценить абсолютную светимость или размер галактики по параметрам ее радиоизлучения. Зная видимую звездную величину или размер галактики, можно оценить расстояние до нее. Используются также оценки расстояния по флуктуации поверхностной яркости галактики или по вспышкам сверхновых. Эти зависимости дают оценку расстояния с точностью порядка 10 % (в лучших вариантах).

Но и тут не обошлось без противоречий с Λ CDM-космологией. В 2009 г. появилась работа, в которой была получена оценка характерных пекулярных скоростей, почти вдвое превышающая теоретические предсказания. Некоторые авторы поспешили раздуть из этого сенсацию и объявить об опровержении Λ CDM-модели. Впрочем, оценки скорости нехаббловского движения, полученные автором этой книги для той же области, оказались заметно меньше и вполне соответствовали предсказаниям теории. Дело в том, что в соотношение Талли – Фишера, по которому определяются расстояния до спиральных галактик, входит ряд параметров, измеряемых со значительными погрешностями. Особенно это касается ширины линии атомарного водорода, связанной со скоростью вращения галактик, которая может иметь погрешность порядка 20 %, а то и больше. На наш взгляд, влияние этих погрешностей либо неправильный выбор модели крупномасштабного движения и привели к получению завышенной оценки пекулярных скоростей.

Определив по пекулярным скоростям общее поле скоростей крупномасштабных нехаббловских движений галактик, астрономы восстанавливают распределение полной плотности материи, включая темную материю⁷⁵. Для этого был разработан ряд методов, наиболее удачным из которых является так называемый метод POTENT. Восстановленные с его помощью карты распределения плотности материи показывают хорошее качественное согласие с картами инфракрасных источников, что свидетельствует в пользу правильности его результатов. В частности, на этих распределениях отчетливо видны все известные аттракторы, положение которых соответствует их наблюдаемому положению. Более того, были получены оценки масс этих аттракторов, которые оказались существенно больше оценок масс светящейся компоненты, что указывает на большую долю темной материи.

Кроме того, поскольку развитие флуктуаций происходило при определенных значениях космологических параметров, исследование нехаббловских движений дает возможность получить независимые оценки этих параметров. В частности, автором этой книги, посвятившим не один год исследованиям крупномасштабных нехаббловских движений плоских спиральных галактик, видимых с ребра, была среди прочих получена оценка плотности материи $\Omega_m = 0,26$, совпадающая с оценками, полученными другими, куда более точными методами.

4.2.6. Темпы роста флуктуаций плотности

Со скоростью роста крупномасштабной структуры Вселенной связано еще одно подтверждение существования темной материи. К концу 1970-х гг. еще не была открыта степень анизотропии реликтового излучения, но уже стало понятно, что она очень мала. В связи с этим возник вопрос: каким образом флуктуации, крайне слабые в эпоху

⁷⁵ Этот шаг довольно сложен, потому что эта проблема часто имеет более чем одно решение (как правило, бесконечное число решений). В математике такие задачи называются обратными задачами, и все они являются некорректными с точки зрения математики. Понятие корректной математической задачи было введено Жаком Адамаром и требует среди прочего однозначности и сходимости решения.

рекомбинации, успели к настоящему моменту развиться и образовать хорошо наблюдаемую крупномасштабную структуру Вселенной? Даже вопрос формирования отдельных галактик был далеко не очевидным. После того как измерили флуктуации реликтового излучения на уровне тысячных долей процента, вопрос не разрешился. Примерно в это же время появились первые сообщения о том, что нейтрино имеют ненулевую массу покоя. Это позволило временно снять остроту данного вопроса. Идея состояла в том, что помимо флуктуаций реликтового излучения, связанных с обычной материей, имелись также существенно большие флуктуации плотности массивных «холодных» нейтрино, т. е. движущихся существенно медленнее скорости света. Обычная материя после рекомбинации начала падать в гравитационные ямы, образованные нейтрино, что и позволило сформировать крупномасштабную структуру. Современные оценки массы нейтрино заставляют говорить о нейтрино как о горячей материи, но в то время это было еще неизвестно.

Заметим, что после окончания рекомбинации наступил долгий период, длительностью около 300 млн лет, получивший у космологов название «темные века». Дело в том, что в эту эпоху отсутствовали источники света, так как рекомбинация уже закончилась, а звезды еще не появились. Поэтому никакой информации, относящейся к этой эпохе, у нас нет. Соответственно, о том, как развивались флуктуации, мы можем судить только на основании теоретических моделей.

Отметим, что модели, основанные на ненулевой массе нейтрино, были своего рода прообразами современной Λ CDM-космологии. Они еще не включали космологическую постоянную, но уже имели холодную темную материю в виде нейтрино. Любопытно, что сейчас нейтрино также рассматриваются в качестве кандидата на роль темной материи. Но это – другие нейтрино, не привычные для физики электронные нейтрино, а некие экзотические очень массивные нейтрино, еще не открытые экспериментально. При этом существуют варианты, что эти гипотетические нейтрино являются стерильными, т. е. не вступают ни в какие взаимодействия, кроме гравитационного. В этом случае их просто невозможно идентифицировать экспериментальным путем.

Идея обычных нейтрино как катализатора роста крупномасштабной структуры Вселенной продержалась недолго. Очередное понижение верхней оценки анизотропии реликтового излучения привело к тому, что эта модель уже не вписывалась в наблюдения. Но после появления идеи о существовании космологической постоянной проблема опять стала решаемой.

В настоящее время наиболее плодотворным методом исследования образования структур является компьютерное моделирование, в котором моделируется гравитационное взаимодействие большого количества (миллиарды и больше) точечных масс. Для расчетов используются кластеры из большого числа процессоров. Результаты моделирования однозначно показывают, что в отсутствие темной материи галактики не успели бы сформироваться. Модели также используются для получения распределений темной материи внутри галактик и скоплений. Пример результатов такого моделирования показан на рис. 4.6.

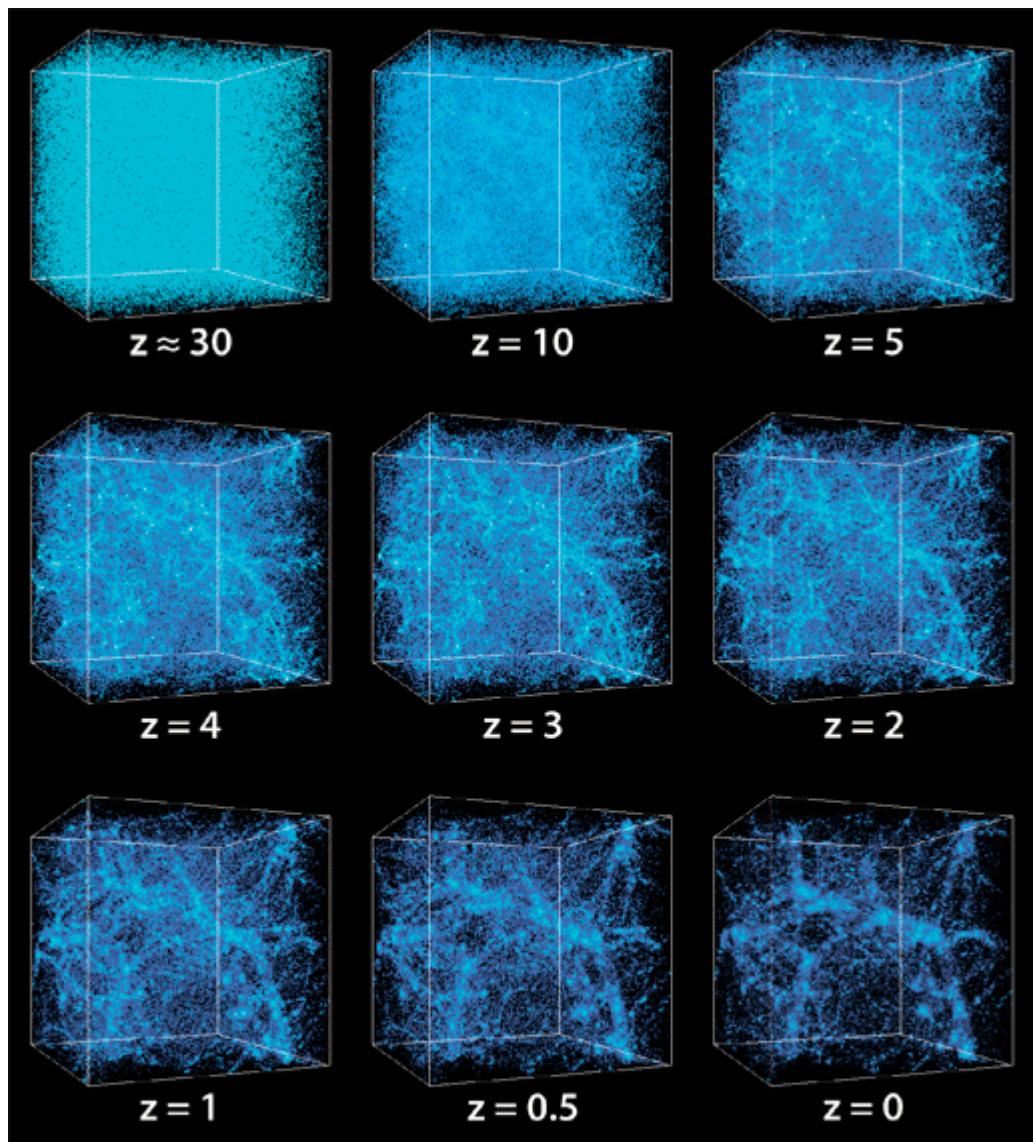


Рис. 4.6. Формирование крупномасштабной структуры во Вселенной. Моделирование было выполнено в Национальном центре суперкомпьютерных приложений Андреем Кравцовым (Чикагский университет) и Анатолием Клыпиным

(Университет штата Нью-Мексико). Визуализация Андрея Кравцова

Самая старая звезда, известная сегодня, – это HD 140283, которая случайно оказалась по соседству с нами (190 св. лет от Солнца). Ее возраст оценивается в $(14,5 \pm 0,8) \times 10^9$ лет, т. е. она родилась в первые несколько сотен миллионов лет существования Вселенной. В центре нашей Галактики есть 23 звезды с сопоставимым возрастом, так что они должны быть довольно распространенными. Впрочем, это может просто означать, что наши методы оценки возраста звезд не очень хорошо работают с такими старыми звездами. Самой старой (и самой дальней) галактикой, которую мы наблюдали когда-либо, является довольно большая (только в 25 раз меньше Млечного Пути) галактика GN-Z11, обнаруженная в марте 2016 г., имеющая $z = 11,1$, что соответствует самому началу эпохи реионизации. В отличие от старых звезд, мы абсолютно уверены в правильности оценки возраста этой галактики, который оставляет в лучшем случае всего несколько сотен миллионов лет для ее формирования.

Моделирование показало, что без темной материи формирование наблюдаемой крупномасштабной структуры заняло бы гораздо больше времени. Оно также показывает

распределения темной материи в галактиках и скоплениях.

Единственная проблема, возникшая в результате моделирования, – это проблема нехватки галактик-спутников. В компьютерных симуляциях, в отличие от реальных наблюдений, вокруг массивных галактик присутствует большее количество карликовых галактик. Есть две точки зрения на эту проблему. Оптимисты говорят, что вычисления, использующие большее количество точек, дают немного лучшие результаты, чем более старые, и вообще компьютерное моделирование может быть не очень адекватно для описания таких мелких деталей. Дело в том, что даже число звезд в нашей Галактике того же порядка, что число точек в этих симуляциях. С другой стороны, астрономы активизировали поиск галактик-спутников и обнаружили немалое их количество, но говорят, что такие объекты очень трудно обнаружить. Так что вполне возможно, что эта проблема носит чисто технический характер. Пессимисты считают, что по-прежнему существует расхождение в количестве галактик-спутников и проблема остается актуальной.

В любом случае следует помнить, что компьютерное моделирование почти всегда предполагает некоторое упрощение вроде подгонки констант или игнорирования некоторых явлений и страдает от ошибок округления, поэтому его результаты следует принимать с долей скепсиса. Они никогда не должны рассматриваться как замена реальных экспериментальных данных, а скорее, как намек на некоторые модели или явления, которые могли бы быть пропущены без моделирования.

Рост флуктуаций связан с еще одним важным для космологии вопросом. Упомянутое в разделе 2.4.1 направление термодинамической стрелы времени гарантирует непрерывное увеличение энтропии Вселенной. Почему же мы не рассказывали о том, что она неизбежно приближается к своей тепловой смерти? Гипотеза о тепловой смерти Вселенной обычно приписывается Уильяму Томсону, первому барону Кельвину (в русскоязычных странах его часто называют лордом Кельвином), со ссылкой на работу 1852 г. «Об универсальной тенденции в природе к диссипации механической энергии» (*On a Universal Tendency in Nature to the Dissipation of Mechanical Energy*). Полный английский текст этой короткой статьи нетрудно найти в интернете. Впрочем, эта статья не содержит в явном виде упоминаний о тепловой смерти Вселенной. Наиболее близкое по смыслу утверждение, содержащееся в этой работе, гласит: «В течение конечного промежутка времени в прошлом и в будущем Земля должна быть непригодной к существованию человека в современном понимании, если только не произошли или не произойдут процессы, невозможные с точки зрения законов протекания таких процессов в настоящее время». Среди авторов гипотезы тепловой смерти Вселенной также упоминаются Рудольф Клаузиус, Герман фон Гельмгольц и Уильям Ранкин.

Наиболее полно эта гипотеза была сформулирована в аннотации к работе Томсона 1862 г. «О возрасте тепла Солнца» (*On the Age of the Sun's Heat*), которую также нетрудно найти в сети. Вот ее формулировка: «Второе начало термодинамики включает в себя определенный принцип необратимых процессов в Природе. Таким образом, показывается, что, хотя механическая энергия неуничтожима, существует универсальная тенденция к ее диссипации, приводящей к повышению и рассеянию тепла, прекращению движения и снижению потенциальной энергии во всей материальной Вселенной. Результатом неминуемо станет состояние всеобщего покоя и смерти, если бы Вселенная была конечной и подчинялась существующим законам. Однако невозможно предположить предел заполненной материей части Вселенной, и, следовательно, наука указывает скорее на бесконечный процесс преобразования в бесконечном пространстве потенциальной энергии в осязаемое движение и далее в тепло, чем на единый конечный механизм, работающий как часы и останавливающийся навсегда. Также невозможно представить либо начало, либо продолжение жизни без превосходящей созидающей силы, и, следовательно, никакие выводы динамической науки касательно будущего состояния Земли не могут рассматриваться в духе пессимистических прогнозов о судьбе разумных существ, которыми она в настоящее время населена». Как правило, в популярных изложениях гипотезы

тепловой смерти Вселенной приводятся только третье и четвертое предложения. Отметим также, что в основной части статьи такие глобальные утверждения отсутствуют.

В современном изложении гипотеза тепловой смерти Вселенной предсказывает, что за конечное время Вселенная перейдет в состояние с максимальной энтропией, которое обычно связывают с однородным распределением всех термодинамических параметров. В сочетании с идеей неизменности мира эти соображения были серьезной проблемой для физиков второй половины XIX в. Оттуда они переключались в философскую и научно-популярную литературу, причем в чрезмерно упрощенном виде, а также закрепились в общественном сознании просвещенных слоев населения. Предпринимались разные попытки решить эту проблему в те времена. Например, Людвиг Больцман считал, что Вселенная в основном находится в состоянии тепловой смерти, но в ней время от времени возникают гигантские флуктуации, в одной из которых мы и живем.

С точки зрения физики проблема тепловой смерти Вселенной давно решена. Дело в том, что обычно при изложении термодинамики не рассматривают внешние поля, в том числе гравитационное. Максимум его рассматривают как источник заданной потенциальной энергии, например в распределении Больцмана. Однако частицы являются не только пробными телами во внешнем гравитационном поле, но и его источниками. Это приводит к гравитационной неустойчивости, родственной упомянутой в самом начале книги неустойчивости Рэля – Тейлора.

В результате даже в достаточно большом объеме вещества в неизменной Вселенной максимальному значению энтропии будет соответствовать совсем не однородное распределение, а гравитационное сгущивание частиц. Как мы видели, на момент рекомбинации материя во Вселенной была распределена куда более однородно, чем в настоящее время. Таким образом, распределение плотности материи изменялось в прямо противоположную сторону, чем предсказывается гипотезой о тепловой смерти Вселенной. Рассмотрим масштабы поменьше. Из первоначального облака сформировались Солнце и планеты, так что сейчас Солнечная система куда более неоднородна, чем 5 млрд лет тому назад.

Дополнительными факторами являются расширение Вселенной, стабилизирующее некоторые неустойчивости, а также появление черных дыр, которые тоже обладают энтропией, пропорциональной площади их горизонта событий. В некотором смысле их можно считать хранилищами энтропии, поскольку тело, падая в черную дыру, увеличивает энтропию этой черной дыры, при этом общая энтропия Вселенной увеличивается, но энтропия части Вселенной вне черных дыр может и уменьшиться.

Таким образом, на данный момент в науке нет проблемы тепловой смерти Вселенной. Она существует только в общественном сознании. Этому есть несколько причин. Первой причиной является то, что многие авторы научно-популярной и даже научной литературы просто пересказывают то, чему их учили. Вторая причина связана с тем, что при изложении физики в институтах для большей понятности и из-за недостатка времени приходится давать несколько упрощенные представления о тех или иных вопросах. Как правило, при этом делается оговорка о том, что именно не принимается во внимание, которая быстро забывается читателем или слушателем. В данном случае речь идет об отсутствии гравитационного поля.

Нетривиальное влияние этого поля можно проиллюстрировать и другими примерами. Всем известно, что внутри проводников напряженность электростатического поля равна нулю. На самом деле правильная формулировка этого утверждения содержит оговорку об отсутствии гравитационных и инерционных сил. Если проводник находится в гравитационном поле Земли, то в нем возникает очень слабое электростатическое поле, направленное сверху вниз и имеющее напряженность gme/e , где m_e и e – соответственно масса и заряд электрона, а g – ускорение свободного падения. Благодаря этому полю свободные электроны внутри проводника не падают вниз с ускорением свободного падения.

4.2.7. Гравитационное линзирование

Еще одно свидетельство существования темной материи – так называемое гравитационное линзирование. Массивные объекты не только притягивают к себе окружающие тела, но и отклоняют лучи света, проходящие рядом. Если свет проходит на расстоянии r от звезды массой M , его угол отклонения, измеренный в радианах, равен $\varphi = 4GM/c^2r$. Эта величина получена в рамках ОТО, аналогичный угол, полученный в рамках ньютоновской механики, будет вдвое меньше. Правда, в учебниках по физике обычно не пишут о том, что в ньютоновской механике притягиваются также и безмассовые частицы. Дело в том, что безмассовые частицы не имеют массы покоя, но имеют динамическую массу, которую можно определить по формуле $E = mc^2$. Двукратное отличие между предсказаниями ньютоновской механики и ОТО связано с тем, что безмассовые частицы обязаны двигаться со скоростью света, когда плохо работает ньютоновская механика. Причину именно двукратного отличия мы объяснили в подразделе 1.3.2. Угол отклонения света стал первым предсказанием ОТО, проверенным экспериментально. Во время полного солнечного затмения 1919 г. экспедиция Эддингтона подтвердила предсказания ОТО о том, что луч света, проходящий мимо края диска Солнца, отклоняется на $1,75''$.

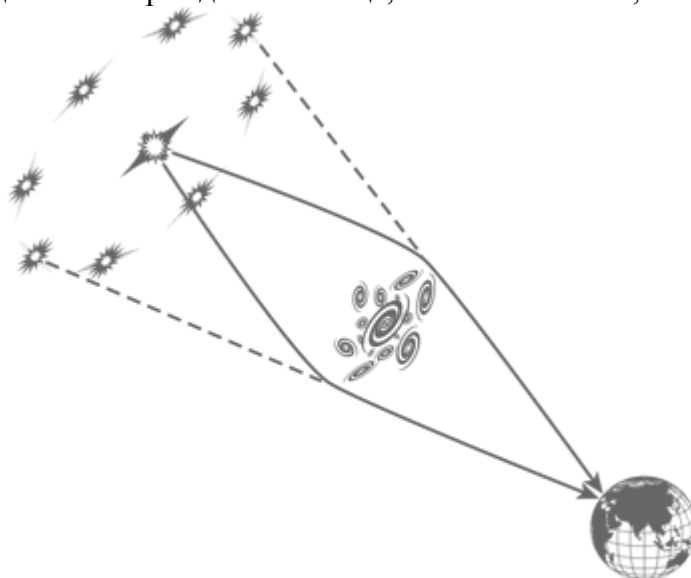


Рис. 4.7. Сильное гравитационное линзирование

Если бы свет распространялся прямолинейно, мы бы видели далекие астрономические объекты в определенных положениях на небе. Но из-за искривления световых лучей в гравитационном поле мы видим их немного смещенными. Это и называется гравитационным линзированием, поскольку в этом случае гравитационное поле выступает в роли своеобразной линзы. Различают несколько типов гравитационного линзирования. На рис. 4.7 показана схема сильного гравитационного линзирования. В этом случае свет, отклоняясь в гравитационного поле массивного объекта, находящегося между источником и наблюдателем, достигает наблюдателя несколькими путями. Наблюдатель, не знакомый с гравитационным линзированием, продлив по прямой пришедшие к нему лучи света, мог бы прийти к неправильному выводу о том, что видит несколько разных объектов. Но они обладают свойствами, которые позволяют доказать, что это – один и тот же объект. Объекты находятся на одном и том же удалении от наблюдателя, а их кривые блеска, т. е. зависимость светимости от времени, повторяют друг друга с некоторым временным сдвигом.

Первая гравитационная линза, которую астрономы так и называют – «Первая линза», была открыта в 1979 г. Деннисом Велшем, Робертом Каршвеллем и Рэйем Вэйменем. Это был линзированный квазар Q0957+561, выглядящий на небе как два квазара, которые находились на угловом расстоянии $6''$ друг от друга. Эти квазары имели одинаковое красное смещение $z = 1,41$, а также идентичные спектральные характеристики (профили

спектральных линий, отношения потоков в разных областях спектра и др.). Роль линзы в системе играет находящаяся перед квазаром галактика YGKOW G1 с красным смещением $z = 0,36$.

Сейчас известны десятки гравитационных линз, дающих в основном двойное изображение. Однако встречаются и гравитационные линзы, дающие четыре изображения, например линза «Крест Эйнштейна», открытая в 1985 г., и «Лист клевера», открытая за год до этого. Особый случай представляет недавно обнаруженная SN Refsdal, которая является единственной известной гравитационно линзированной сверхновой. Это поистине уникальное сочетание двух очень редких классов объектов: сверхновых и гравитационных линз. Она была впервые обнаружена в конце 2014 г. как гравитационная линза с четырьмя изображениями, расположенными крестообразно, и вскоре после этого исчезла. Затем она во второй раз появилась на том же месте через год. Это позволило впервые непосредственно измерить разность во временах распространения света по двум различным путям, что является важным достижением. Существует также единственная известная гравитационная линза CLASS B1359 + 154, дающая шесть изображений одного объекта. Обнаруженная в 2000 г., она имеет экстремально большое красное смещение 3,325.

Отметим интересную деталь. Число изображений в гравитационной линзе всегда должно быть четное. В обычных же оптически неоднородных средах число изображений всегда нечетное. Так, например, известен мираж тройного солнца, при котором на небе видны три изображения Солнца. Крайне редко встречается вариант, когда изображений пять. При этом число прямых изображений всегда на одно больше, чем обратных, т. е. зеркально отраженных.

Если бы линзирующий объект был сферически симметричен и точно располагался между источником и наблюдателем, мы вместо конечного числа изображений далекого объекта наблюдали бы кольцо, окружающее истинное положение объекта. Такое кольцо называется кольцом Эйнштейна, оно дает изображение в виде почти замкнутой круговой дуги или, гораздо реже, полного круга. Такая ситуация возникает, когда линзированный объект очень компактен. Но, поскольку в природе не встречается идеально сферически симметричных объектов, очень тонкое кольцо Эйнштейна от небольшого объекта вряд ли когда-либо удастся увидеть. Вместо него мы видим конечное четное число изображений.

Отдельно рассматривается случай так называемого микролинзирования, вызываемого не только более близкой галактикой, но и конкретными звездами этой галактики. В этом случае угол отклонения настолько мал, что отдельные изображения нельзя разделить. Микролинзирование проявляется в виде временного повышения яркости далекого объекта, иногда довольно существенного. В этом случае аналогия с линзой особенно удачна. Некоторые специалисты по микролинзированию утверждают, что по кривым блеска во время микролинзирования в отдельных случаях можно предполагать наличие у звезды-линзы массивных планет.

С точки зрения поиска темной материи большой интерес представляет так называемое слабое линзирование. В случае любого линзирования в результате прохождения света от далеких объектов через гравитационное поле их изображение не только смещается и изменяет яркость, но и деформируется. При слабом линзировании возникает одно изображение далекого объекта, но вытянутое в направлении, перпендикулярном по отношению к центру линзирующего объекта. В частности, если линзирующий объект достаточно компактный (например, галактика), то изображения более далеких объектов образуют дуги с центром в этой галактике. Эти дуги близки к участкам кольца Эйнштейна.

Если же линзирующий объект расположен достаточно далеко от луча зрения, дуги обнаружить не удастся. В этом случае путем статистической обработки определяется преимущественное направление, в котором вытянуты наблюдаемые объекты и по которому определяется направление на линзирующий объект, а по степени деформации – его масса. Строго говоря, речь идет не о массе отдельной галактики, а об интегральной плотности материи вдоль луча зрения. Именно с помощью этого метода на рис. 4.5 были проведены

линии постоянной плотности, называемые изоденсами.

Основное достоинство слабого линзирования состоит в том, что, в отличие от сильного линзирования, оно происходит всегда. При рассмотрении слабого гравитационного линзирования с z -фактором больше 0,1 уже необходимо принимать во внимание космологические эффекты. Поэтому по данным слабого гравитационного линзирования можно получить ограничения на значения космологических параметров. Таким образом, слабое гравитационное линзирование служит своеобразным мостом между исследованиями темной материи на масштабах галактик и скоплений и на космологических масштабах.

4.3. Из чего состоит темная материя?

Теперь можно перейти к естественно возникающему вопросу о том, что из себя представляет небарионная темная материя. Существует экстравагантная гипотеза о том, что в качестве темной материи может выступать большое количество черных дыр небольших масс, которые проявляют себя только гравитационно. Эта гипотеза не получила сколь-либо широкого распространения, и мы упоминаем о ней только потому, что это – практически единственный вариант, когда темная материя состоит из макроскопических объектов. Во всех остальных случаях считается, что она должна состоять из каких-то массивных частиц. Поскольку она не может состоять из барионов, а все остальные более массивные известные элементарные частицы нестабильны, речь может идти только о неоткрытых до сих пор частицах.

Единственное, что нам известно об этих частицах, – это их название. Дело в том, что в науке принято давать названия гипотетическим объектам просто для удобства. Частицы, из которых состоит небарионная темная материя, получили название WIMP – weakly interacting massive particles, т. е. слабо взаимодействующие массивные частицы. В русском языке нет официального термина для этих частиц, но в разговорной речи космологи используют слово «вимп», являющееся калькой с английской аббревиатуры WIMP. В этой книге мы за неимением лучшего будем также использовать этот термин. Забавно, что эта аббревиатура по написанию и произношению совпадает с английским словом «wimpr», имеющим значения «слабак», «тряпка» и т. п. в значении «нерешительный, бесхарактерный, не проявляющий себя человек». Хотя нет никаких указаний на этимологическую связь между этими словами, вимпы как частицы несомненно соответствуют слову «wimpr» в том смысле, что не проявляют себя. Естественно, после появления этого термина появились и производные от него. Например, в одной из научных статей, где рассматривалась гипотеза о том, что вимпы более массивны, чем это предполагается, эти частицы были названы «вимпзилла» (от вимпов и Годзиллы).

Хотя термин «вимп» уже устоялся, можно придраться к двум вещам. Во-первых, к словам «слабо взаимодействующие». Дело в том, что если речь идет о слабом взаимодействии в том смысле, как это понимается в физике элементарных частиц, то нет уверенности, что темная материя способна к такому типу взаимодействия. Как мы уже писали выше, рассматривается также возможность того, что темная материя является зеркальной, т. е. способной только к гравитационному взаимодействию. Во-вторых, термин может неявно предполагать, что существуют вимпы только одного сорта. Вообще говоря, это ни откуда не следует, и надо понимать, что термин «вимп» может применяться к совершенно разным частицам. При этом ряд авторов используют термин «вимп» в узком смысле, понимая под ним частицы, имеющие вполне определенный диапазон масс в районе 100 ГэВ (порядка массы атома серебра) и сечение рассеяния, характерное для слабого взаимодействия; другие, включая нас, используют этот термин в широком смысле, понимая под ним любые частицы – кандидаты на темную материю. Существует и промежуточный вариант, когда вимпами называют только кандидатов, не имеющих собственного названия. Например, гипотетические частицы аксионы в первом и третьем смыслах не являются

вимпами; мы же не будем проводить различия между неоткрытыми частицами.

Физика полей и частиц выработала массу гипотез и теорий, предсказывающих существование частиц, которые могли бы претендовать на роль вимпов, например аксионы, гравитино, фотино, нейтралино, массивные экзотические нейтрино и многие другие. Мы не будем останавливаться на различиях между этими частицами, поскольку сейчас нет никаких оснований предпочесть одни из них другим. Более подробно об этих частицах можно прочитать в обзоре (Петер, 2012). Практически единственное, что можно сказать о вимпах, – это то, что они не могут иметь очень маленькую массу покоя, поскольку иначе они бы не попадали под определение холодной материи. Теоретически могли бы существовать частицы с малой массой покоя, которые родились холодными и взаимодействовали настолько слабо, что до сих пор не успели разогреться. Такими частицами могут быть аксионы с массой покоя около 0,02 эВ. Даже более массивные нейтрино, имеющие, по последним данным, массу покоя менее 2 эВ, в ранней Вселенной вынуждены были двигаться со скоростью, близкой к скорости света. К настоящему моменту они замедлились до примерно одной сотой скорости света. Содержание же нейтрино во Вселенной не превышает 1,3 %. Поэтому большинство исследователей склоняются к мысли, что масса вимпов должна существенно превышать массу нейтрино. А так как частицы с массами порядка массы протона легко получают на ускорителях, то масса вимпов, скорее всего, также должна быть существенно больше массы нуклонов.

Во всех описанных выше методах темная материя характеризовалась исключительно своей массой. Для того чтобы исследовать ее состав и свойства, нужно измерить параметры еще хотя бы одного взаимодействия с ее участием. Как следует из определения темной материи, такое взаимодействие может быть только слабое. Поэтому в случае, если темная материя является зеркальной, нет возможности прямого определения ее состава. Однако возможны косвенные подтверждения. Теории, предсказывающие существование стерильного нейтрино, дают немного другие предсказания, которые можно проверить. Наконец, если какая-то из теорий сможет правильно предсказать, например, плотность темной материи, связав ее с иными параметрами, это будет свидетельствовать в пользу ее существования.

Если же речь идет о вимпах, способных испытывать слабое взаимодействие, то можно попытаться наблюдать эти реакции в лаборатории. Определить параметры вимпов в таком прямом эксперименте было бы наиболее надежным способом. В случае, если никаких реакций не будет обнаружено, это позволит установить верхний порог сечения слабого взаимодействия вимпов. Ситуация в чем-то похожа на ту, с которой имели дело специалисты по элементарным частицам, когда пытались обнаружить в экспериментах воздействия нейтрино, приходящих из космоса, например образующиеся при термоядерных реакциях на Солнце. Для того чтобы на эксперимент не влияли космические лучи, имеющие меньшую проникающую способность, чем нейтрино, эксперименты проводили под землей в шахтах или туннелях, нередко под горными массивами.

Сейчас многие из этих лабораторий ведут также поиски вимпов. Основная идея заключается в том, что вимпы каким-то образом взаимодействуют с веществом детектора, и результаты этой реакции регистрируются одним из многочисленных способов, перечисленных в обзоре (Cline, 2014). При этом если в случае нейтрино были точно известны ожидаемые реакции, то в случае вимпов можно ожидать все что угодно. Естественно, что реакции, вызываемые нейтрино, не подходят для поиска вимпов. Вообще, обнаружить в этих экспериментах неизвестную реакцию намного проще, чем доказать, что она связана именно с вимпом. Единственное убедительное доказательство в данном случае – это столь любимое математиками доказательство «от противного», т. е. нужно зафиксировать такую реакцию, которая не может быть вызвана ни одной известной частицей или ядром. Таким образом, перефразируя Конфуция, можно сказать, что трудно искать темную материю в темной комнате, особенно если не знать, можно ли ее, в принципе, обнаружить.

Дополнительная трудность при поиске вимпов связана с тем, что практически

невозможно полностью избавиться от радиоактивного фона. Основными помехами являются β - и γ -распад, которые достаточно легко отделить по электромагнитному взаимодействию, а также потоки нейтронов, особенно неприятные тем, что по воздействию на детектор их трудно отличить от вимпов. К счастью, сечение рассеяния нейтронов существенно больше, чем у вимпов, поэтому считается, что в достаточно больших детекторах они рассеиваются более одного раза. Естественно, обе эти помехи также можно уменьшить путем экранирования детектора и использования материалов, очищенных от радиоактивных примесей.

Считается, что вимпы происходят из темного гало нашей Галактики и их средняя скорость в системе отсчета центра Галактики равна нулю. Как известно, Солнце движется относительно центра Галактики со скоростью около 220 км/с, а Земля вращается вокруг Солнца со скоростью около 50 км/с. Эти скорости складываются в июне и вычитаются в декабре, из-за чего относительная скорость движения Земли относительно темного гало имеет сезонные вариации. Очевидно, что поток вимпов должен иметь такие же сезонные вариации. Это происходит точно по той же причине, по которой человек, бегущий под дождем, промокнет за одинаковый промежуток времени сильнее, чем стоящий неподвижно. Наличие подобных сезонных вариаций в зафиксированном сигнале считается хорошим аргументом в пользу того, что зарегистрированы именно вимпы. Кроме того, в силу аналогичных причин должны присутствовать и суточные вариации потока вимпов, но ни один существующий на сегодняшний день детектор не способен их зафиксировать.

На практике используют следующий принцип детектирования вимпов. Предполагается, что вимп упруго рассеивается на ядре материала детектора, передав ему часть энергии. Именно такие внезапно ускоренные ядра и пытаются обнаружить в ходе экспериментов. Энергия ускоренных вимпами ядер оценивается в диапазоне 10–100 кэВ, причем количество событий экспоненциально падает с ростом энергии. Поэтому для повышения вероятности обнаружения вимпов нужны низкий порог обнаружения (что требует хорошего подавления фона), большая масса детектора и длительное время наблюдений. Ускоренные ядра регистрируют различными способами: по сцинтилляциям, ионизации, появлению фононов (колебаний кристаллической решетки), образованию пузырьков в перегретой жидкости и др. Основными типами используемых детекторов являются криогенные кристаллические детекторы, сцинтилляционные детекторы, пузырьковые камеры и детекторы на основе сжиженных благородных газов. Приведем описание некоторых детекторов и затем краткий обзор полученных результатов.

Криогенные кристаллические детекторы представляют собой сборки из полупроводниковых кристаллов, охлажденные до сверхнизких температур. В этих детекторах измеряются электрический заряд и фононы (в виде тепловыделения). Это позволяет достичь хорошего подавления радиоактивного фона. Наиболее известным криогенным кристаллическим детектором является установка CDMS II, расположенная в Суданских горах (США) и работающая с 2006 г. Она содержит 30 детекторов, включает в сумме 4,75 кг германия и 1,1 кг кремния, охлажденных до температуры 50 мК.

Также широко известна установка CoGeNT, расположенная там же и использующая 440-граммовый кристалл германия, охлажденный до температуры жидкого азота, о результатах работы которой мы поговорим чуть позже. Кроме них заслуживают упоминания криогенные кристаллические детекторы коллаборации EDELWEISS, расположенные в Модане (Франция), и коллаборации CRESST, расположенные в подземном туннеле Национальной лаборатории Гран-Сассо (Италия).

Среди сцинтилляционных детекторов наибольшую известность получила установка DAMA/NaI, после усовершенствования переименованная в DAMA/LIBRA, расположенная в Гран-Сассо. Как следует из названия, в ней используются кристаллы йодида натрия массой 100 кг для DAMA/NaI и 250 кг для DAMA/LIBRA. Идея этого эксперимента заключается в поисках описанной выше сезонной вариации. Этот детектор имеет наибольшую экспозицию среди всех существующих детекторов. Еще в 2000 г. коллектив авторов эксперимента заявил

об обнаружении вимпов с очень низкой массой порядка 10 ГэВ. Более того, параметры вимпов, полученные на этой установке, не укладываются в ограничения, накладываемые другими экспериментами. Мы подробно обсудим этот вопрос после описания всех экспериментов. Кроме DAMA заслуживает упоминания установка KIMS, расположенная в Янгъяне (Корея), не зафиксировавшая вимпов.

Детекторы на основе сжиженных благородных газов основаны на регистрации не только первичных, но и вторичных сцинтилляций, вызываемых электронами ионизации. Это среди прочего позволяет эффективно отфильтровывать β - и γ -фон. В качестве рабочего вещества обычно используются неон, аргон или ксенон. Этот тип детектора становится все более популярным в последнее время благодаря дешевизне и относительной простоте эксплуатации. Наиболее примечательной установкой с детектором данного типа является установка XENON, расположенная все в том же Гран-Сассо. В первой фазе эксперимента с 10-литровым ксеноновым детектором XENON 10 в результате 136 кг-дней экспозиции были получены очень жесткие ограничения на сечение рассеяния вимпов. Среди прочего, по заверениям авторов эксперимента, эти ограничения исключают возможность существования вимпов в области параметров, заявленных в эксперименте DAMA.

Кроме детекторов, ориентированных на поиск любых вимпов, есть также установки, направленные на поиск конкретных вариантов темной материи. К таким установкам относятся, например, детекторы ADMX и APEX, спроектированные для поиска аксионов. Впрочем, пока что накопленная экспозиция этих установок слишком мала, чтобы делать какие-либо выводы.

Теперь, как мы и обещали, более подробно обсудим результаты экспериментов DAMA, CoGeNT и XENON 10, вызвавшие бурные дискуссии в научной литературе. Около 2010 г. наблюдалось общее чувство оптимизма, связанного с этими исследованиями; ожидалось, что открытие вимпов уже «ждет за углом». Основной причиной такого оптимизма была информация про положительные результаты опытов на детекторе DAMA/NaI и позже DAMA/LIBRA.

Все началось с того, что в уже далеком 2000 г. авторы эксперимента DAMA/NaI заявили, что им удалось обнаружить частицы темной материи с массой 8–12 ГэВ, сечением рассеяния порядка 10–40 см², и впоследствии подтвердили эти параметры по результатам наблюдений на установке DAMA/LIBRA. Спустя 10 лет авторы эксперимента CoGeNT опубликовали результаты, в которых было выделено три события, с вероятностью около 30 % соответствующие вимпам с массой 5–15 ГэВ и сечением рассеяния порядка 10–40 см². Тем не менее при общем всплеске энтузиазма эти конкретные результаты были встречены со значительным скепсисом. Во-первых, наиболее распространенная среди теоретиков оценка массы вимпов находится в районе 60–70 ГэВ. Во-вторых, ограничения на сечение рассеяния темной материи, полученные в экспериментах CDMS II, XENON 10 и XENON 100, по заверению ряда авторов, исключают существование вимпов с такими параметрами.

Естественно, практически сразу возникли попытки примирить результаты этих экспериментов. Некоторые впечатлительные теоретики поспешили придумать экзотический вид вимпов, который проявлял бы себя в установках DAMA и CoGeNT, но не проявлял в установке XENON. Для этого они рассмотрели все мыслимые комбинации как спин-зависимого, так и спин-независимого упругого и неупругого рассеяний, в том числе с нарушением изоспина⁷⁶, и выбрали подходящий вариант. В более серьезных работах утверждается, что эти параметры вполне совместимы со всеми ограничениями, если принять во внимание некоторые тонкие моменты, связанные с интерпретацией результатов эксперимента XENON, описание которых выходит далеко за рамки этой книги. Наиболее же правдоподобными, с нашей точки зрения, выглядят объяснения экспериментаторов. В

⁷⁶ «Морские термины» здесь употреблены только для создания соответствующей атмосферы, хотя и по делу. Незнакомым с ними людям рекомендуем просто вслушаться в их певучее звучание.

обзорах результатов поиска вимпов в детекторах на сжиженных благородных газах отмечается, что в силу конструктивных особенностей установка DAMA не способна различать ядерные и электронные отдачи и полученные сезонные вариации можно объяснить вариациями потока космических мюонов и фона быстрых нейтронов в Гран-Сассо (Manalaysay, 2011; Cline и Simpson, 2015). То же самое относится и к установке CoGeNT. Кроме того, пресловутые тонкие моменты в интерпретации результатов установки XENON можно обойти, если определять энергию отдачи не по первичным, а по вторичным сцинтилляциям. Это позволило значительно повысить точность ограничений на максимальное сечение рассеяния вимпов, которое оказалось существенно меньше заявленного в экспериментах DAMA и CoGeNT.

В тот период результаты некоторых других детекторов, отличных от DAMA, были не очень убедительными, но время шло, было накоплено больше данных, и стало ясно, что ни один из них не открыл ничего, что могло бы напоминать четкое обнаружение вимпов. В конце концов они всего лишь установили более строгие и жесткие ограничения на величину поперечного сечения вимпов, и с какого-то момента их результаты стали полностью несовместимы с данными DAMA/LIBRA.

Учитывая вышеперечисленные проблемы с экспериментом DAMA/LIBRA, для проверки его результатов готовится эксперимент DM-Ice, который полностью повторит схему эксперимента DAMA/LIBRA, но с одним отличием: установка будет размещена на Южном полюсе, на базе нейтринной обсерватории IceCube. Это позволит полностью исключить суточные вариации космических лучей.

Описанные выше методы получили название прямых методов обнаружения темной материи, хотя слово «прямые» в некоторых случаях следовало бы заключить в кавычки. Но кроме них есть также и непрямые методы обнаружения темной материи. К ним относятся преимущественно высотные и космические эксперименты по поиску частиц и античастиц с высокими энергиями, которые, по мнению теоретиков, должны образовываться при взаимодействии частиц, составляющих темную материю. Проблема состоит в том, что антиматерия образуется в галактическом диске без всякой темной материи, поэтому проблема интерпретации результатов таких наблюдений стоит особенно остро.

Основными экспериментами по непрямым поискам темной материи являются: космический эксперимент PAMELA, аппаратура которого размещена на российском спутнике «Ресурс-ДК1», космический гамма-телескоп FERMI-LAT, космический телескоп EGRET на борту космического аппарата CGRO и недавно доставленный на МКС альфа-магнитный спектрометр AMS-02, а также эксперимент ATIC, аппаратура которого запускалась на аэростате в Антарктиде.

К сожалению, среди непрямых экспериментов противоречий еще больше, чем среди прямых. Есть еще одно направление непрямого поиска частиц темной материи. При анализе данных спектра рентгеновского излучения из космоса был обнаружен неизвестный ранее пик в районе энергии 3,5 кэВ. Некоторые ученые уверяют, что это излучение, возникшее при аннигиляции подобных частиц с их античастицами, хотя другие считают, что это ничем не примечательная линия излучения известных химических элементов.

Как видим, поисками темной материи вплотную занялись экспериментаторы, хотя пока что безрезультатно. Впрочем, характеристики детекторов постоянно улучшаются, и уже в недалеком будущем можно ожидать одно из трех: либо будут открыты вимпы или что-то похожее на них, что со временем становится все менее вероятным, либо порог их обнаружения будет понижен настолько, что заставит теоретиков пересмотреть свои предсказания (правда, у них в запасе всегда есть принципиально ненаблюдаемые варианты), либо разные эксперименты будут противоречить друг другу, и тогда этот спор может затянуться не на один десяток лет.

Следует отметить, что отрицательный результат экспериментов не означает, что нет никакой темной материи. Формально это означает только то, что сечение ее слабого взаимодействия находится ниже порога обнаружения или масса вимпов сильно отличается от

ожиданий. Возможный вывод заключается в том, что темная материя не участвует в слабом взаимодействии и состоит из стерильных нейтрино или чего-то подобного.

4.4. Альтернативные модели

Итак, астрономических наблюдений, подтверждающих существование темной материи, достаточно много. Но можно ли их объяснить каким-то иным образом без привлечения идей темной материи? Для многих это действительно так, хотя и не для всех. Темная материя необходима для роста крупномасштабной структуры Вселенной. Но для того, чтобы объяснить наблюдения, не привлекая темную материю, приходится жертвовать более фундаментальными вещами. Например, существует гипотеза, объясняющая кривые вращения галактик тем, что при малых значениях ускорения нарушается второй закон Ньютона. Эта так называемая модифицированная ньютоновская динамика (MOND) имеет небольшое число сторонников, хотя и очень активных. Подумаем, к каким последствиям приведет такая гипотеза. Для начала надо отказаться от классической механики и заменить ее на какую-то пока не разработанную теорию. Соответственно, рухнет фундамент всей физики. Слабые ускорения могут быть связаны с взаимодействиями в рамках молекулярной физики, физики твердого тела, физики элементарных частиц и во многих других областях. Все эти науки придется перестроить без каких-либо на то экспериментальных оснований только для того, чтобы объяснить кривые вращения галактик. При этом остальные доказательства существования темной материи не могут быть объяснены в рамках MOND. Для них придется придумать какие-то другие гипотезы. Гипотеза же о темной материи хороша тем, что объясняет единым образом много различных экспериментов. Другой идеи, подходящей для всех случаев, пока не существует.

Глава 5 Темная энергия

5.1. Космологические свидетельства существования темной материи и темной энергии

Перейдем от масштабов галактик, т.е. астрономических, к масштабам космологическим. Это позволяет решить несколько задач. Во-первых, получить независимые оценки Ω_m – плотности материи, выраженной в процентах от критической плотности. Во-вторых, разделить вклады темной и барионной материй. Для этого вводится аналогичный параметр Ω_b – отношение плотности барионной материи к критической. Понятно, что плотность небарионной темной материи в процентах от критической плотности будет равна $\Omega_m - \Omega_b$. В-третьих, кроме этого, естественно получают оценки параметра Ω_Λ – отношения плотности энергии, связанной с космологической постоянной, к критической плотности энергии. В настоящее время космологическая постоянная рассматривается как один из частных случаев темной энергии, о которой мы расскажем ниже.

Еще до открытия реликтового излучения космологи мечтали о двух типах космических объектов, которые позволили бы им разобраться с геометрией пространства-времени, в частности определить знак кривизны Вселенной. Первый тип объектов получил жаргонное название «стандартная свеча». Это объекты, которые обладают одинаковой светимостью, но при этом находятся на очень разных расстояниях от Земли. Второй тип объектов называется стандартной линейкой и имеет одинаковые линейные размеры. Зачем эти объекты были так нужны? Дело в том, что в искривленном пространстве, как мы уже упоминали в разделе 2.5, понятие расстояния становится неоднозначным. Вводятся несколько видов расстояний, которые связаны друг с другом через кривизну пространства.

Имея стандартную свечу, мы можем ввести так называемое фотометрическое

расстояние. По определению, это расстояние, на которое нужно в плоском пространстве отнести источник света, чтобы получить наблюдаемый поток света. Его отличие от обычного расстояния связано с двумя факторами. Первый из них связан с тем, что освещенность поверхности обратно пропорциональна квадрату расстояния до точечного источника света. Это справедливо только для плоского пространства. В пространстве с положительной кривизной поверхность сферы радиуса r меньше чем $4\pi r^2$. Соответственно, освещенность будет падать медленнее, чем r^{-2} . Понятно, что в пространстве с положительной кривизной, где поток больше, чем в плоском пространстве, благодаря только первому фактору, фотометрическое расстояние будет меньше, чем в плоском. Соответственно, в пространстве отрицательной кривизны, где площадь поверхности сферы больше чем $4\pi r^2$, фотометрическое расстояние было бы больше, чем в плоском пространстве при одинаковых потоках.

Второй фактор связан с тем, что свет от удаленных источников был излучен в более ранней Вселенной и за время распространения длина его волны увеличилась в $1+z$ раз. Соответственно, энергия фотонов, пропорциональная частоте, уменьшилась в $1+z$ раз. Кроме того, в $1+z$ раз увеличилось время между приходами фотонов. В результате в формуле для потока света, наблюдаемого на Земле, возникает множитель $(1+z)^{-2}$, что увеличивает фотометрическое расстояние в $1+z$ раз.

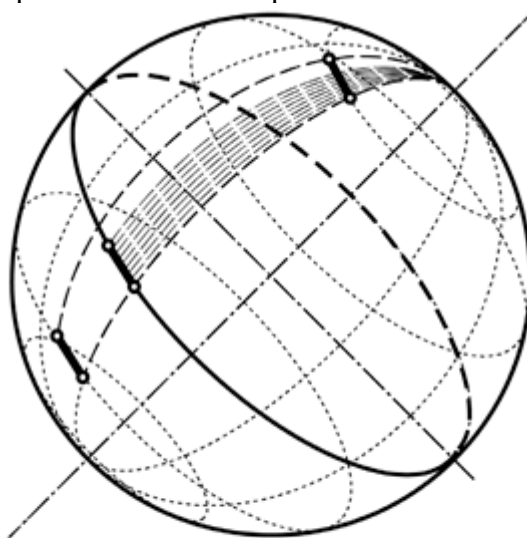


Рис. 5.1. Расстояние, определенное по угловым размерам, может быть обманчиво. Все три элемента имеют одинаковую длину

Имея стандартную линейку, мы можем ввести понятие расстояния, определенного по угловым размерам. В плоском пространстве объект длиной l на расстоянии $r \gg l$ виден под углом $\varphi = l/r$ в радианной мере. Соответственно, расстояние может быть определено по формуле $r = l/\varphi$. В кривом пространстве все куда сложнее. Рассмотрим поверхность сферы, например Земли (см. рис. 5.1). Пусть наблюдатель находится на Северном полюсе и измеряет угловые размеры метровой линейки, расположенной точно вдоль параллели. Поскольку в двумерном пространстве с положительной кривизной свет распространяется по большому кругу, фактически нам необходимо вычислить разность долгот западного и восточного концов линейки. По мере удаления линейки от наблюдателя ее угловые размеры будут уменьшаться, достигнут минимума на экваторе, а затем снова начнут увеличиваться при приближении к Южному полюсу⁷⁷. При этом угловой размер линейки на экваторе будет равен $2\pi \times 1 \text{ м} / 40\,000 \text{ км}$. В плоском же пространстве угловой размер линейки будет равен $1 \text{ м} / 10\,000 \text{ км}$. Таким образом, в пространстве с положительной кривизной минимальный

⁷⁷ Навигация в этом мире будет очень сложной, если полагаться только на видимые размеры предметов.

угловой размер линейки будет в $\pi/2 \approx 1,57$ раз больше, чем в плоском, независимо от величины кривизны. Соответственно, расстояние по угловым размерам будет меньше, чем в плоском пространстве. В пространстве с отрицательной кривизной ситуация будет обратной: расстояние по угловым размерам будет больше, чем в плоском пространстве.

Кроме этого, у нас существует уже введенное расстояние по красному смещению, которое легко определяется для любого астрономического объекта по его спектру. Имея стандартную свечу, мы можем построить график зависимости фотометрического расстояния от расстояния по красному смещению, который даст нам необходимую информацию о свойствах пространства. Аналогично, имея стандартную линейку, мы можем построить зависимость расстояния по угловым размерам от расстояния по красному смещению. Как видим, достаточно иметь либо свечу, либо линейку. Если же имеется и то и другое, мы можем получить две независимые оценки кривизны Вселенной.

Раньше в качестве стандартных свечи и линейки пытались использовать галактики, предполагая, что их светимость и линейные размеры постоянны. Эти попытки не увенчались успехом, что не удивительно, учитывая, что галактики довольно сильно отличаются друг от друга. В настоящее время мы имеем куда более совершенных кандидатов на роль стандартной свечи и стандартной линейки.

5.1.1. Сверхновые типа Ia

В качестве стандартной свечи используются взрывы сверхновых типа Ia. Сверхновой называется катастрофический этап в жизни звезды, когда она в течение короткого промежутка времени излучает со светимостью, сравнимой со стандартной светимостью целой галактики. Название пришло из трактата Тихо Браге «О новой звезде» (*De stella nova*), описавшего подобную вспышку, которую он наблюдал в 1572 г. Отсюда и пошли термины «новая» и «сверхновая».

Вспышки, как правило, обозначаются буквами SN, за которыми следует год их наблюдения, а иногда и латинская строчная буква, чтобы различать сверхновые, обнаруженные в том же году. Сверхновую, которую наблюдал Тихо Браге, обозначают SN 1572.

Вспышки сверхновых – довольно редкие события. В нашей Галактике они происходят нечасто, а наблюдать их астрономы могут еще реже⁷⁸ – в среднем 3–4 раза в тысячелетие. В истории человечества было только пять подтвержденных наблюдений сверхновых в нашей галактике Млечный Путь, в последний раз это произошло в 1604 г., по иронии судьбы, всего за несколько лет до изобретения телескопа Галилео Галилеем в 1610 г. Следующая сверхновая наблюдалась в 1885 г. в галактике Андромеды. Все последующие вспышки сверхновых тоже наблюдались в других галактиках.

Тем не менее астрономы составили список звезд в нашей Галактике, которые в ближайшее время могут стать сверхновыми. Наиболее близкими к нам являются белый карлик IK Пегаса В, находящийся на расстоянии всего 150 св. лет, и красный гигант Бетельгейзе, находящийся на расстоянии 640 св. лет. Карлик IK Пегаса В, также известный под именем HR 8210, превратится в сверхновую типа Ia, а Бетельгейзе – в сверхновую типа II. Несмотря на то что минимальное безопасное расстояние от сверхновой порядка 200 св. лет, опасаться нет причин. Во-первых, «в ближайшее время» в астрономических масштабах может означать сотни миллионов лет, а во-вторых, IK Пегаса В к этому времени отдалится от Земли на значительное расстояние. Впрочем, для космологии куда более интересны взрывы сверхновых на больших расстояниях с $z \gg 0,3$. На данный момент наиболее далекие из наблюдаемых сверхновых имеют z -фактор немного больше 1.

⁷⁸ Большая часть вспышек сверхновых происходит в плоскости диска Галактики и скрыта от нас звездами, пылью и другими объектами, расположенными на пути их света.

Всего различают пять типов сверхновых, обозначенных римскими цифрами от I до V. Эти типы разделены на подтипы, которые обозначены строчными латинскими буквами, например тип Ia обозначается как SN Ia, а тип II_n – как SN II_n. К таким вспышкам приводят два различных механизма.

Время от времени массивные звезды (тяжелее, чем приблизительно 10 масс Солнца), выработавшие водород в ядре, коллапсируют и взрываются, сбрасывая оболочку. Эффективность термоядерного синтеза падает, и давление излучения больше не может компенсировать силу гравитации. После этого звезда коллапсирует, т. е. быстро сжимается, давление и температура резко возрастают, и синтез вновь запускается, используя теперь в качестве сырья еще и гелий и более тяжелые элементы. Этот процесс является единственным источником элементов тяжелее свинца во Вселенной. Если дополнительного давления, создаваемого реакцией синтеза, достаточно, чтобы преодолеть сжатие, то происходит взрыв сверхновой, который выбрасывает внешние слои звезды на большие расстояния; в противном случае звезда коллапсирует дальше, превращаясь в черную дыру или нейтронную звезду. Этот механизм называется коллапсом ядра и является причиной возникновения всех типов сверхновых (в зависимости от параметров исходной звезды), за исключением самых мощных сверхновых типа Ia. Мы упоминали об этом в подразделе 3.8.2.

Сверхновые типа Ia образуются совершенно иначе, механизм их образования называется тепловым убеганием. В отличие от коллапса ядра, свойственного очень массивной звезде, тепловое убегание происходит с двойной системой⁷⁹, содержащей белый карлик – небольшую и чрезвычайно горячую звезду. Когда расстояние между звездами достаточно мало, белый карлик начинает красть вещество у своего компаньона, увеличивая свою массу за счет этого вещества, перетекающего от одной звезды к другой.

Когда давление и температура ядра белого карлика превысит порог, после которого начинают сливаться ядра углерода, этот процесс синтеза выделяет еще больше тепла. В результате происходит взрыв сверхновой типа Ia, полностью разрушающий ядро с высвобождением огромного количества энергии, – весьма живописная иллюстрация того, что чревоугодие действительно является смертным грехом. Важность появления таких сверхновых для внегалактической астрономии связана с тем, что в максимуме они имеют практически одну и ту же светимость, соответствующую абсолютной звездной величине, равной $-19,3$, что примерно в 5 млрд раз ярче Солнца.

Тем не менее существует определенный скептицизм, вытекающий из исторического опыта использования цефеид в качестве индикаторов расстояния. Первый потенциальный источник беспокойства связан с тем, что особо далекие сверхновые типа Ia могут не иметь такого же пика светимости из-за того, что их звезды-предшественники должны быть значительно моложе. Однако работа механизма теплового убегания не должна зависеть от возраста звезды. Другая проблема заключается в том, что наблюдатель может неправильно классифицировать некоторые вспышки существенно более слабых сверхновых типа Ib или Ic как сверхновую типа Ia из-за сходства их спектров. Однако такие ошибки были бы отчетливо видны на графике зависимости фотометрического расстояния от красного смещения как явные выбросы. Третья проблема состоит в том, что система из двух белых карликов может иметь широкий спектр пиковых светимостей в зависимости от масс обоих компонентов. Это соображение может скорее поставить под сомнение объяснение механизма вспышек сверхновых типа Ia, но не сам факт, что они имеют одинаковые пиковые светимости, который был установлен статистически по данным наблюдений.

Как происходит поиск вспышек сверхновых? Несмотря на всю масштабность этих событий, они случаются настолько далеко, что до Земли доходят в виде кратковременного появления слабо светящегося объекта. Типичная продолжительность вспышки сверхновой –

⁷⁹ Двойная система состоит из двух гравитационно связанных звезд, обращающихся вокруг их совместного центра масс.

около 20 дней. Из-за расширения Вселенной наблюдаемая продолжительность в $1 + z$ раз больше. Уже одно это подтверждает факт расширения Вселенной.

Астрономы ежедневно делают снимки всего неба и сравнивают их со вчерашними. Если на снимках появляется новый точечный светящийся объект и проверка показывает, что это не ошибка и не известный переменный объект, то с большой вероятностью наблюдается либо вспышка сверхновой, либо событие микролинзирования. И то и другое очень интересует астрономов разных специализаций и требует продолжительного наблюдения этого объекта. Наблюдение должно вестись непрерывно днем и ночью, поэтому его нужно проводить в обсерваториях по всему миру.

Именно поэтому астрономы не оставляют новые объекты для личного наблюдения, а рассылают информацию всем подписавшимся на ее получение. В случае, если объект оказывается сверхновой типа Ia, что определяется по ее спектру, строится ее кривая блеска. По наблюдениям сверхновых типа Ia на близких расстояниях выяснилось, что светимость в максимуме все-таки немного меняется и для повышения точности следует ввести небольшую поправку, определяемую по форме кривой блеска. Именно светимость в максимуме и определяют при наблюдениях вспышек сверхновых. Кроме того, наблюдения спектра дают нам значение z -фактора.

Наблюдениями сверхновых типа Ia для задач космологии занимались сразу несколько групп. Вначале результаты их наблюдений вполне укладывались в теорию Фридмана, предсказывающую замедление расширения Вселенной. Как мы отмечали в разделе 2.6.1, это замедление описывается так называемым космологическим параметром замедления q , который всегда положителен в моделях Фридмана. Но все изменилось после того, как в 1998 г. вначале группа Адама Рисса, а затем группа Саула Перлмуттера объявили, что по данным их наблюдений Вселенная расширяется с ускорением и параметр замедления отрицателен. Соответствующие статьи были опубликованы в 1998 и 1999 гг. Это открытие, перевернувшее космологию, стало возможным благодаря повышению точности за счет увеличения выборки и введения описанной выше поправки. Кроме того, стало ясно, что до какого-то момента скорость разбегания галактик уменьшалась, достигла минимального значения, а затем стала увеличиваться⁸⁰. Это произошло при $z \sim 0,645$ или около $6,2 \times 10^9$ лет назад. Это является убедительным доказательством существования космологической постоянной или чего-то похожего на нее, что в настоящее время называется темной энергией.

Попутно это открытие решило еще одну проблему. Дело в том, что оценки возраста Вселенной, полученные из модели Фридмана, были меньше возраста самых старых из наблюдаемых звезд, что, конечно же, абсурдно. Если же Вселенная в течение какого-то времени расширяется с ускорением, то эта проблема снимается.

За это открытие Саул Перлмуттер, Адам Рисс и Брайан Шмидт получили Нобелевскую премию по физике 2011 г. Приведем некоторые подробности этого открытия на примере работы группы Перлмуттера. Они измерили параметры 42 сверхновых типа Ia с z -факторами от 0,17 до 0,83, из которых только 2 сверхновые имели $z \leq 0,3$, а для калибровки использовали выборку из 18 сверхновых с z -факторами от 0,02 до 0,10. Кроме того, они рассматривали случай, когда вместо космологической постоянной действует темная энергия с уравнением состояния (2.33), и пришли к выводу, что этот вариант не обеспечивает лучшего согласия с наблюдательными данными.

5.1.2. Бариионные акустические колебания

Немного позже космологи получили и возможность использовать что-то похожее на

⁸⁰ Следует отметить, что ускоренное расширение не означает увеличения постоянной Хаббла, она все время уменьшается.

стандартную линейку. В ряде работ это называется барионными акустическими колебаниями (сокращенно ВАО – baryon acoustic oscillations). В других работах пишут о кластеризации (сгущивании) галактик или о крупномасштабной структуре. Попробуем объяснить простыми словами основную идею этого непростого явления. Как мы уже писали, в ранней Вселенной возникли и росли флуктуации плотности. При этом к областям повышенной плотности стекалось вещество из окружающих слоев. Темная материя спокойно падала на эту область, а обычной материи препятствовало возрастающее давление. В результате вокруг этой области появлялась волна плотности, распространяющаяся наружу со скоростью $c/\sqrt{3}$ (это значение было получено Яковом Зельдовичем). За время до рекомбинации волна достигла вполне определенного радиуса. После рекомбинации Вселенная стала прозрачна для излучения и излучение перестало быть «вмороженным» в материю. Условия роста флуктуаций изменились. Из них стала формироваться крупномасштабная структура Вселенной, в частности области образования галактик. Галактика, образовавшаяся в центре этой области, имеет наибольшее число соседей на расстоянии, равном радиусу этой волны. В настоящее время с учетом расширения Вселенной это расстояние близко к 150 Мпк. Таким образом, вероятность того, что две галактики будут находиться на расстоянии 150 Мпк, будет несколько выше, чем при случайном распределении.

Этот эффект наблюдается во всех достаточно больших каталогах галактик, в частности на Слоуновском цифровом обзоре неба (Sloan Digital Sky Survey – SDSS). На рис. 5.2 показана корреляционная функция ⁸¹ зависимости от расстояния между галактиками, показывающая отличие числа галактик на данном расстоянии от случайного. Основной особенностью этого графика является пик, соответствующий тому самому расстоянию около 150 Мпк. Параметры этого пика зависят от космологических параметров и позволяют наложить на них ограничения.

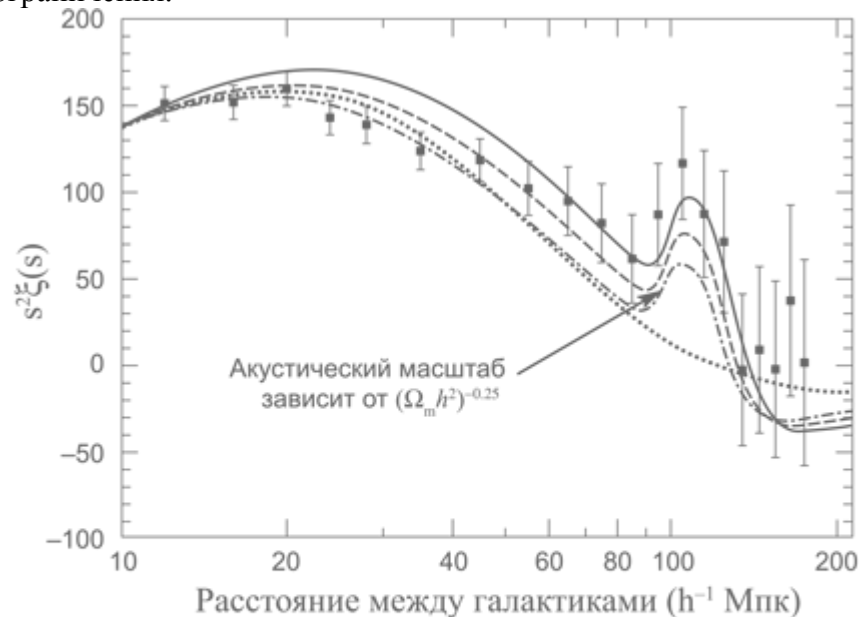


Рис. 5.2. Корреляционная функция в зависимости от расстояния между галактиками каталога SDSS (точки) и теоретических зависимостей для различных плотностей вещества (кривые). Пик соответствует масштабу ВАО

5.1.3. Спектр флуктуаций реликтового излучения

⁸¹ Корреляционная функция (более формально, двухточечная корреляционная функция) характеризует вероятность нахождения двух галактик, разделенных заданным расстоянием.

Третий способ получить ограничения на космологические параметры не требует наличия стандартных объектов. Это форма спектра мощности реликтового излучения, изображенного на рис. 3.2, т. е. распределение флуктуаций по гармоникам. Существуют достаточно сложные методы расчета формы этой кривой, в которых в качестве входных параметров задается ряд космологических параметров. Кроме плотностей разных компонентов Ω_Λ , Ω_m и Ω_b ⁸² задаются также параметр, характеризующий форму спектра флуктуаций, количество сортов нейтрино и другие параметры. Полученная форма сравнивается с наблюдаемой, и выбираются оптимальные значения параметров. В частности, форма кривой сильно зависит от значения Ω_b . Некоторые из этих параметров получают непосредственно, например Ω_Λ . Некоторые из них получают в комбинации, например $\Omega_m h^2$ и $\Omega_b h^2$. Однако следует отметить, что отношение Ω_b/Ω_m не зависит от h .

⁸² Ω_b — параметр плотности барионной материи.

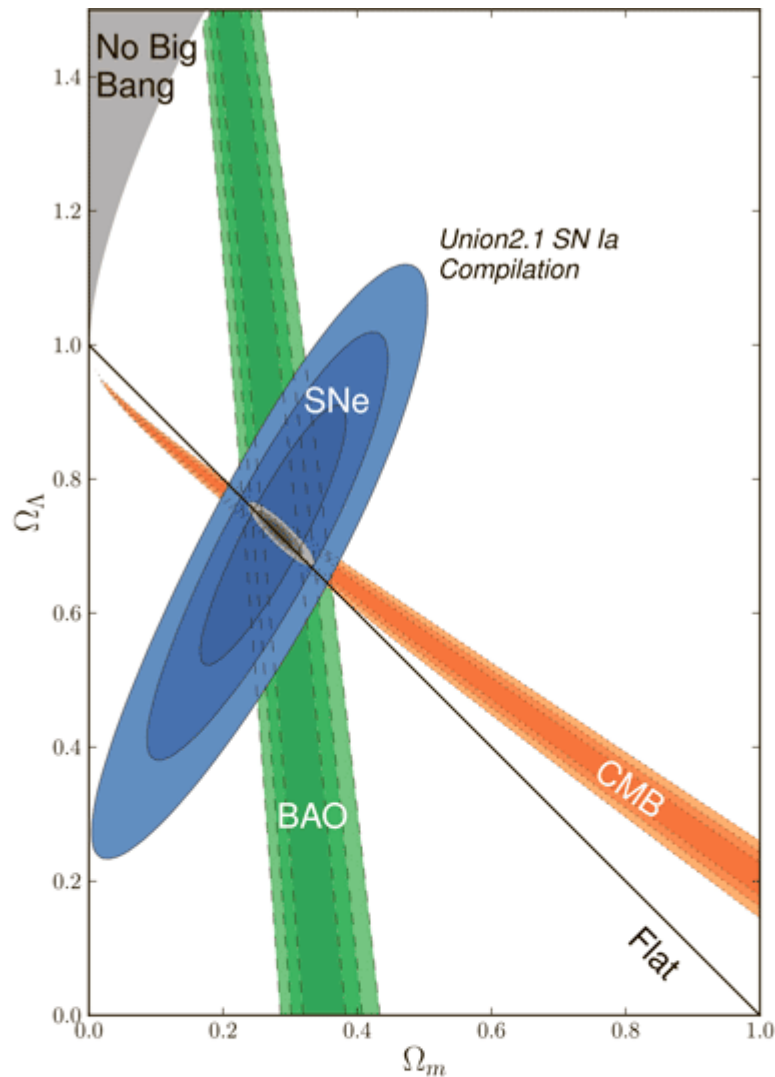


Рис. 5.3. Ограничения на параметры плотности материи и космологической постоянной, полученной тремя описанными методами (помечены белым текстом): спектр флуктуаций реликтового излучения (оранжевый), вспышки сверхновых (синие) и барионные акустические колебания (зеленые). Регионы качественно различных сценариев расширения Вселенной помечены черным текстом: линия, соответствующая плоской Вселенной с областями открытой Вселенной, ниже и замкнутой Вселенной — выше, а также область, где расширение происходило без Большого взрыва. Исходно опубликован как рис. 5 в [Suzuki и др., 2012]. © AAC.

Воспроизводится с разрешения владельца авторских прав

На рис. 5.3 изображены совместные ограничения (градации серого цвета) на Ω_m и Ω_Λ , полученные тремя описанными методами (с надписями белым цветом): спектр флуктуаций реликтового излучения (оранжевый), вспышки сверхновых (синий) и барионные акустические колебания (зеленый). Как видно, доверительные области⁸³ пересекаются,

⁸³ Доверительной областью называется область в пространстве параметров, которая включает истинное значение с заданной вероятностью, называемой достоверным уровнем. Достоверные уровни обычно выбирают таким образом, чтобы границы доверительных областей были целым числом стандартных отклонений от наиболее вероятного значения. Они обозначаются как 1σ , 2σ и т.д. Особый случай представляет собой обычно используемый достоверный уровень 95%, доверительная область которого немного уже, чем 2σ -область для

образуя сравнительно небольшую область значений этих параметров, которые вписываются во все эти данные. Ограничения, полученные по слабому гравитационному линзированию, тоже включают эту область. Таким образом, ограничения, полученные из совершенно разных методов, пересекаются в одной области.

На том же рисунке указаны границы областей, соответствующих качественно разным физическим сценариям расширения Вселенной (отмечены черным цветом): линия, соответствующая плоской Вселенной, с областью открытой Вселенной ниже и замкнутой Вселенной выше, а также области, где расширение происходило без Большого взрыва. По тому, куда попала область совместных ограничений, мы можем сделать определенные выводы о прошлом и будущем Вселенной. При этом предсказания делаются в рамках стандартной на сегодняшний день Λ CDM-модели. Серая область в левом верхнем углу графика соответствует Вселенной, расширявшейся вечно без Большого взрыва. Ниже расположена область, в которой Вселенная имела начало, т. е. Большой взрыв, но будет расширяться вечно. Еще ниже находится область, в которой Вселенная рано или поздно коллапсирует. Понятно, что при $\Omega_m \leq 1$ мы имеем дело с открытой или плоской моделями, в которых Вселенная будет расширяться вечно. Но в присутствии космологической постоянной вечное расширение возможно и для закрытой космологической модели, если плотность не сильно превышает критическую. Дополнительное отталкивание предотвратит коллапс. Кроме того, диагональная линия разделяет области с различной пространственной кривизной Вселенной: положительная кривизна сверху, отрицательная – снизу. Легко видеть, что область совместных ограничений соответствует Вселенной, рожденной в результате Большого взрыва, которая будет расширяться вечно. Ее пространственная кривизна близка к нулю. Последний вывод основан главным образом на исследованиях анизотропии реликтового излучения.

Кроме описанных методов существует и ряд других, например Лайман-альфа лес и эффект Сюняева – Зельдовича, которые также подтверждают существование и свойства темной материи.

5.2. Темная энергия

Когда в разделе 5.1 мы знакомимся с космологическими ограничениями на темную материю, возникающими при рассмотрении вспышек сверхновых, барионных акустических колебаний и спектра флуктуаций реликтового излучения, попутно выяснилось, что они требуют вызвать из небытия давно забытую, как казалось, космологическую постоянную Эйнштейна или что-то, что работает сходным образом. Это обобщенно называется темной энергией.

Особенно серьезные ограничения на плотность темной энергии дают вспышки сверхновых и флуктуации реликтового излучения. Как видно из рис. 5.3, барионные акустические колебания практически не накладывают ограничений на этот параметр.

Наличие темной энергии с существующими в современную эпоху параметрами приводит к тому, что Вселенная расширяется с ускорением, что противоречит моделям Фридмана. Математически это выражается в отрицательном значении параметра замедления. Если мы предположили, что эта темная энергия действует подобно космологической постоянной, мы можем удовлетворить космологические ограничения, показанные на рис. 5.3, положив величину $\Lambda \sim 10^{-52} \text{ м}^{-2}$. Если, как принято в ОТО, принять скорость света и гравитационную постоянную равными 1, то гравитационную постоянную можно выразить через другие единицы: $\Lambda \sim 10^{-35} \text{ с}^{-2} \sim 7 \times 10^{-27} \text{ кг/м}^3$.

Значение космологической постоянной в современную эпоху существенно меньше, чем значение эффективной космологической постоянной в эпоху инфляции. Поэтому, несмотря

на то что Вселенная сейчас расширяется ускоренно, происходит это далеко не так быстро, как в то время.

Введенная в работе Эйнштейна космологическая постоянная в течение длительного времени не появлялась в космологических моделях. Связано это было со следующим обстоятельством. Не имея теории квантовой гравитации, космологи были вынуждены оперировать так называемыми планковскими единицами. Идея состоит в том, что из скорости света, гравитационной постоянной и постоянной Планка можно получить комбинации с размерностью длины, времени и массы. Эти комбинации получили название планковских единиц – планковская длина $l_P \sim 1,6 \times 10^{-35}$ м, планковское время $t_P \sim 5,4 \times 10^{-44}$ с и планковская масса $m_P \sim 2,2 \times 10^{-8}$ кг. Из них можно составить производные величины; в частности, планковская плотность составляет $\rho_P = 5,2 \times 10^{96}$ кг/м³. Эта величина на 123 порядка больше космологической постоянной.

Поскольку планковские единицы определяются значениями фундаментальных физических констант, считается, что они соответствуют характерным масштабам различных процессов во Вселенной. Поэтому было логично предположить, что космологическая постоянная должна быть равна планковской плотности, умноженной на некоторый безразмерный коэффициент. В физике обычно считается, что безразмерные коэффициенты не могут сильно отличаться от 1. Когда космологическую постоянную не удалось обнаружить даже на уровне в 10100 меньше, космологи решили, что этот коэффициент просто равен нулю. И только после проведения точных измерений вспышек сверхновых удалось определить, что его значение все-таки отлично от нуля.

Малое значение этого коэффициента остается загадкой. Хотя время от времени появлялись научные статьи с попытками объяснить эту величину, все они имели существенные недостатки. Например, попытки связать это малое число с другим огромным числом – возрастом Вселенной, выраженным в планковских единицах (8×10^{60}), иногда выглядели правдоподобно, но приводили к тому, что космологическая постоянная должна меняться с возрастом Вселенной, т. е. не быть постоянной. Возведя возраст Вселенной, выраженный в планковских единицах, в квадрат, мы получим величину, близкую к желаемой, – 10122. Это дает простейшую зависимость вида $\Lambda \sim t^{-2}$, где t – возраст Вселенной. Однако необходимо проанализировать следствия аномально высокой космологической постоянной в ранней Вселенной. Понятно, что такое низкое значение космологической постоянной, как в настоящую эпоху, не могло оказать существенного влияния на развитие ранней Вселенной, в которой плотности и давления были на много порядков выше.

Космологическая постоянная в ОТО приводит к тому, что существует всеобщее отталкивание, то самое, которое в статической Вселенной Эйнштейна уравнивало взаимное притяжение тел. В нашей Вселенной оно приводит к тому, что в настоящее время Вселенная расширяется с ускорением.

В разделе 1.3 мы ввели уравнение состояния (2.33), имеющее вид $p = w\varepsilon$, где w представляет собой безразмерный коэффициент, который равен -1 для космологической постоянной, 0 для пылевидной материи и $1/3$ для электромагнитного излучения и нейтрино. Если предельно упростить выводы ОТО, изложенные в разделе 1.3, то сила притяжения в ньютоновском пределе слабого гравитационного поля (т. е. повсюду, за исключением областей вблизи черных дыр или нейтронных звезд) определяется не плотностью массы ρ , а величиной $\rho + 3p/c^2$. Для всех привычных для нас тел эта величина положительна. Для космологической постоянной эта величина равняется -2ρ , что и обеспечивает гравитационное отталкивание.

В разделе повышенной сложности 2.7.4 было показано, как из первого начала термодинамики можно получить особое свойство вещества с уравнением состояния $p = -\varepsilon$. Обычный газ при расширении уменьшает свою плотность, а значит, и энергию. Вещество с отрицательным давлением при расширении совершает отрицательную работу, и общая энергия в расширившемся объеме увеличивается. Для уравнения состояния $p = -\varepsilon$ можно

показать, что при расширении остаются постоянными как ϵ , так и ρ . В результате такое вещество действует как космологическая постоянная. Обычная же материя уменьшает свою плотность при расширении Вселенной. Поэтому, рассматривая более раннюю Вселенную, мы видим, что плотность материи в ней была больше, чем сейчас. Значит, плотность космологической постоянной была такой же, а поскольку сумма Ω_m и Ω_Λ в плоской Вселенной должна равняться 1, а в реальной Вселенной – быть близкой к этой величине, то мы видим, что в прошлом Ω_m была больше, а Ω_Λ – меньше, чем сейчас (см. рис. 2.11). Другими словами, можно сказать, что Ω_Λ увеличивается, потому что плотность космологической постоянной не меняется, а критическая плотность уменьшается.

Мы живем в эпоху, когда Ω_m и Ω_Λ достаточно близки друг к другу. Они отличаются приблизительно в три раза. В будущем различие будет только усиливаться, а в прошлом в течение достаточно длительного периода времени плотность материи была существенно больше плотности космологической постоянной. Случайно ли их совпадение по порядку величины в наше время? Этот вопрос получил название «проблемы совпадения» и послужил одной из предпосылок к рассмотрению более общей модели темной энергии, не сводящейся к космологической постоянной. В этих моделях темной энергии ее плотность может меняться со временем. В частности, были придуманы так называемые трекерные модели, в которых Ω_m и Ω_Λ всегда одного порядка, т. е. проблема совпадения всегда актуальна. В других моделях темной энергии проблема совпадения существует в том же виде, как и для космологической постоянной.

Но действительно ли проблема совпадения является проблемой? Заметим, что, например, плотность излучения или плотность нейтрино существенно меньше плотности как материи, так и темной энергии. Однако никто не говорит о «проблеме несовпадения». Тем более что Ω_m и Ω_Λ отличаются не более чем в три раза в течение длительного времени, и до этого «периода совпадения» разумная жизнь просто не успела бы сформироваться, что опять заставляет вспомнить об антропном принципе. Кроме того, такое различие можно назвать совпадением лишь с большой натяжкой.

Тем не менее эта проблема побудила космологов рассмотреть различные формы темной материи, более сложные, чем просто космологическая постоянная. Большинство из этих форм используют один и тот же общий вид уравнения состояния (2.33) со значением w , близким, но не равным -1 . Текущие ограничения на параметр w по данным астрономических наблюдений приведены на рис. 5.4.

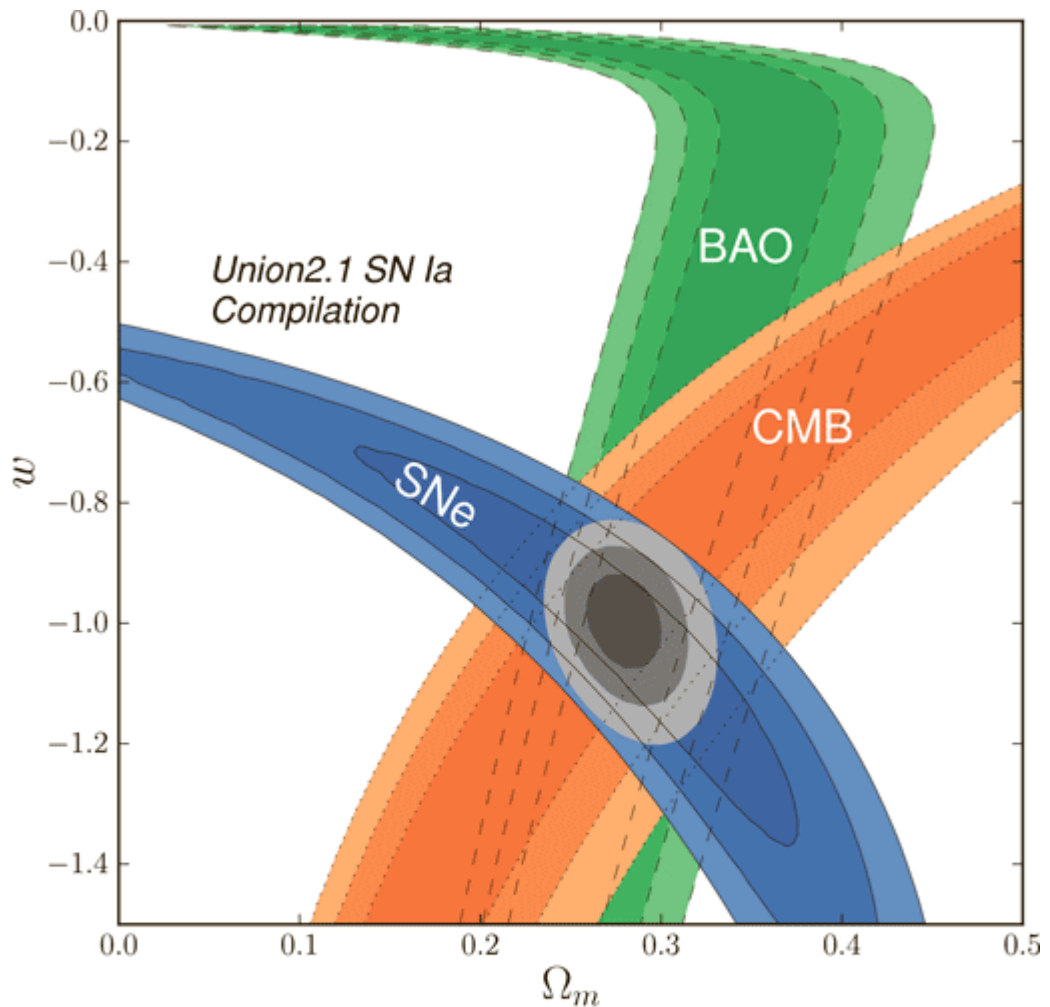


Рис. 5.4. Ограничения на параметр w в уравнении состояния темной энергии (2.33). Обозначения те же, что и на рис. 5.3. Исходно опубликован как рис. 6 в [Suzuki и др., 2012]. © AAC. Воспроизводится с разрешения владельца авторских прав

Величина w , если она постоянна, играет важнейшую роль в будущей судьбе Вселенной.

Если $w > -1$, то плотность темной энергии будет уменьшаться со временем. В принципе, в этом случае замкнутая Вселенная может начать сжиматься и в конце концов сколлапсирует, но при существующих ограничениях на космологические параметры этот сценарий невозможен.

При $w = -1$, т. е. для космологической постоянной, расширение будет вечным. В этом сценарии все галактики, кроме входящих в Местную группу, будут удаляться на большое расстояние, но это произойдет очень нескоро.

В случае же $w < -1$ плотность темной энергии по мере расширения Вселенной будет возрастать, приводя к увеличению сил отталкивания, ускоряющих это расширение. Анализ получившихся уравнений показывает, что за конечное время постоянная Хаббла достигнет бесконечного значения. При этом наступит вариант конца Вселенной, получивший название Большого разрыва (Big Rip). Наступит Большой разрыв следующим образом: вначале разлетятся галактики, не входящие в Местную группу, затем из-за увеличения отталкивания распадется Местная группа, затем разлетятся звезды нашей Галактики, далее – планеты Солнечной системы, потом разлетится Земля, пригороды отделятся от городов, Мытищи и Бутово улетят от Москвы, и закончится все тем, что разлетятся атомы и атомные ядра под

действием превосходящих даже ядерные силы сил гравитационного отталкивания. В связи с этим возникает естественный вопрос: как скоро все это может наступить? Как будет показано в разделе повышенной сложности 5.3, если это и произойдет, то не раньше чем через 55 млрд лет, и у Земли будет еще масса возможностей быть уничтоженной гораздо раньше⁸⁴. Три возможности эволюции Вселенной в будущем показаны на рис. 5.5.

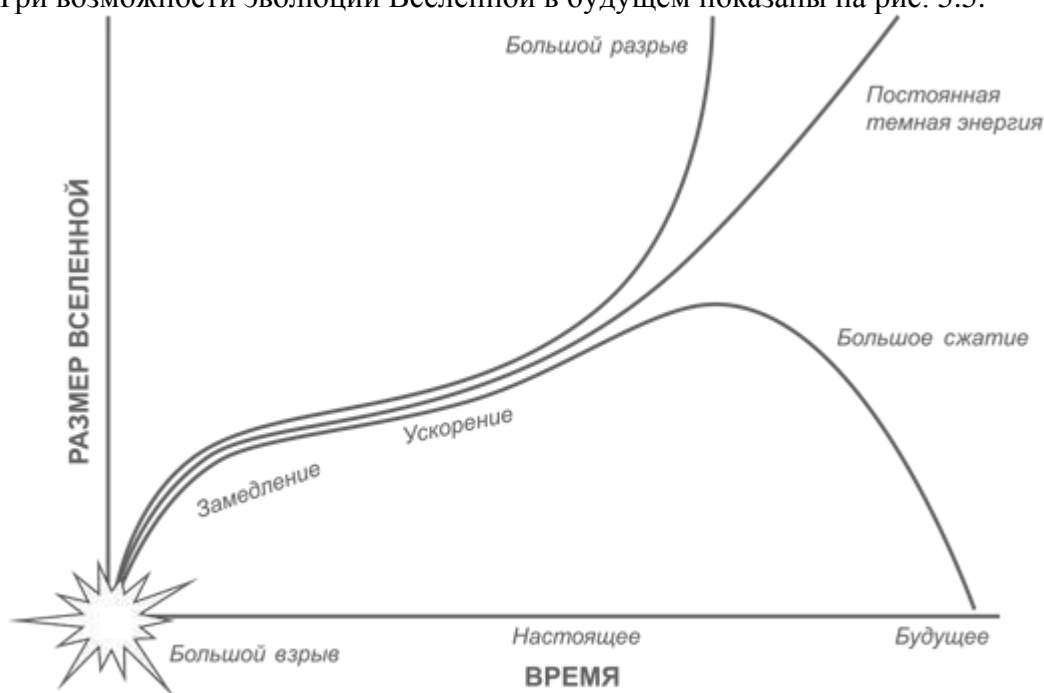


Рис. 5.5. Возможные варианты будущего Вселенной в зависимости от уравнения состояния темной энергии (масштаб преувеличен)

Хотя последний вариант вполне мог бы лечь в основу голливудского блокбастера, к нему нужно относиться с известной долей скепсиса, поскольку нет никакой гарантии, что уравнение состояния темной энергии вообще имеет вид $p = w\varepsilon$. Дело в том, что мы знаем о существовании космологической постоянной меньше 20 лет, а более сложные модели темной энергии существуют и того меньше. Поэтому еще через 20 лет мы наверняка получим новые данные о темной энергии, которые позволят сделать более обоснованные прогнозы и писать более реалистичные сценарии о том, как все мы умрем.

Вернемся к моделям темной энергии, не сводящимся к банальной космологической постоянной. В отличие от моделей с космологической постоянной, где эволюция Вселенной зависит только от одного параметра – значения Λ , модели темной энергии описываются большим числом параметров. Существует огромное количество разнообразных моделей темной энергии. Наиболее популярной является модель, в которой эта энергия связана с присутствием скалярного поля. Эту модель еще называют квинтэссенцией. Мы сознательно не рассказываем про эти модели, поскольку, на наш взгляд, сейчас нет никаких оснований предпочесть одну другой.

В отличие от темной материи, темная энергия не имеет астрономических проявлений, не сводящихся к космологии, и речь не идет о ее поисках в лабораторных условиях. Хотя время от времени появляются статьи с предложением провести космический эксперимент в Солнечной системе по ее поиску, к ним нельзя относиться серьезно.

Одновременное существование двух загадочных явлений – темной энергии и темной материи – естественно вызывает вопрос об их возможной связи. И хотя мы очень мало что знаем о темной материи и еще меньше о темной энергии, это не препятствие полету

⁸⁴ Мы упоминали, что космология вселяет оптимизм?

фантазии. Естественно, давно опубликованы статьи и препринты, рассматривающие всевозможные варианты. Кроме просто связи темной энергии и темной материи можно рассмотреть варианты, когда одно из них производит другое. Такие вещи достаточно типичны для любой революции в физике, именно этому мы и являемся свидетелями.

5.3. Время до Большого разрыва



В этом разделе мы определяем, сколько времени осталось существовать нашей Вселенной, если она имеет какую-то темную энергию с $w < -1$, которая также называется фантомной энергией.

Судьба нашей Вселенной – вопрос очень серьезный, поэтому давайте оценим, сколько времени у нас осталось. Мы можем забыть про все остальное, кроме фантомной энергии, потому что за конечное время она будет доминировать и определять скорость расширения Вселенной. В этом случае постоянная Хаббла будет увеличиваться по степенному закону: $H \sim \alpha$, где $\alpha = -3(1 + w)/2 > 0$. Если рассматривать зависимость скалярного фактора от времени, то мы получим $a \sim (t_0 - t)^{-1/\alpha}$, где время t_0 соответствует моменту Большого разрыва. Таким образом, Вселенная вырастет до бесконечного размера за конечное время.

Из обобщения уравнения (A.10) в присутствии фантомной энергии мы можем получить уравнение для скорости изменения скалярного фактора. Используя текущие значения Ω_{m0} и Ω_{DE0} – параметр плотности материи и фантомной энергии⁸⁵, которая, как мы предполагаем, имеет уравнение состояния (2.33) с $w < -1$, мы можем определить время до Большого разрыва:

$$T = \frac{1}{H_0} \int_1^{\infty} \frac{du}{\sqrt{\Omega_{m0} u^{-1} + \Omega_{DE0} u^{-1-3w}}}. \quad (5.1)$$

На рис. 5.6 показан график зависимости времени до Большого разрыва от величины параметра w . В соответствии с ограничениями по данным различных астрономических наблюдений, приведенными на рис. 5.4, она не может быть меньше чем $-1,2$, а это значит, что Большой разрыв произойдет не раньше чем через 55 млрд лет с 99 %-ной вероятностью. Так что угроза Большого разрыва – самая незначительная из проблем, стоящих перед человечеством.

⁸⁵ В качестве приближенной величины для Ω_{DE0} мы использовали текущее значение $\Omega_{\Lambda 0}$, взятое из Λ CDM-модели.

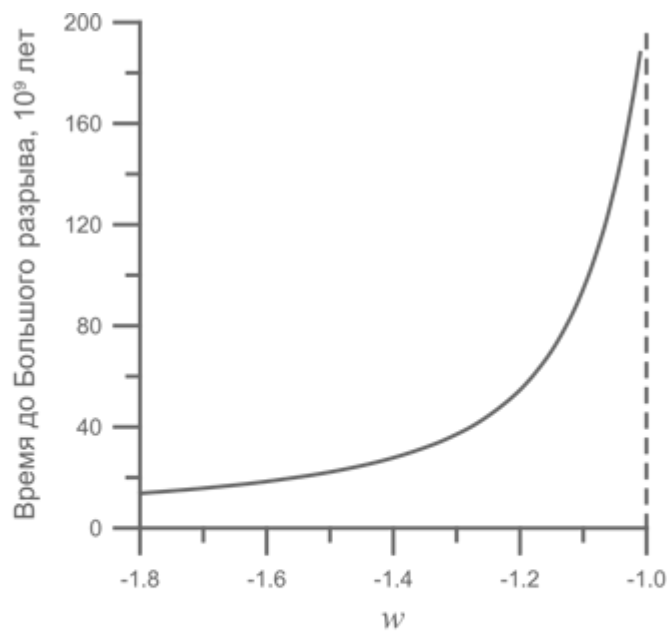


Рис. 5.6. Расчет времени до гипотетического Большого разрыва. Горизонтальная ось показывает значение w , вертикальная — время до Большого разрыва. Кривая стремится к бесконечности при $w \rightarrow -1$

5.4. Другие виды материи

Тем не менее Вселенная содержит не только космологическую постоянную и холодную темную материю. Существует много электромагнитного излучения с параметром $w = 1/3$ в формуле (2.34). Его плотность зависит от красного смещения, как $(1 + z)^4$. Таким образом, если мы путешествуем в прошлое, космологическая константа будет иметь постоянную плотность, плотность пылевой материи будет возрастать как $(1 + z)^3$, а плотность излучения — как $(1 + z)^4$. Плотность излучения будет превалировать в очень ранней Вселенной. При $z \approx 3200$ плотности излучения и вещества были равны, затем доминировала пылевидная материя. То же самое уравнение состояния мы можем использовать для нейтрино, которые являются ультрарелятивистскими частицами с очень малой массой покоя. Их можно рассматривать как небарионную, так называемую горячую материю из-за их скоростей, близких к скорости света. Их плотность падает быстрее, чем плотность холодной материи.

Уравнения (2.12) и (2.13) легко могут быть обобщены на случай наличия некоторых других видов материи с уравнением состояния (2.33). Может ли добавление этих новых видов материи кардинально повлиять на ход эволюции Вселенной? Да, если среди них есть так называемая фантомная материя или фантомная энергия с уравнением состояния вида (2.33) с $w < -1$.

Действительно, если при расширении Вселенной не будет материи с возрастающей плотностью, то постоянная Хаббла будет стремиться к некоему постоянному значению. Это означает экспоненциальный рост Вселенной. Но присутствие фантомной материи все изменит. Ее плотность будет увеличиваться с течением времени. В результате мы приходим к так называемому Большому разрыву: это другой вид конца света, которым закончится судьба нашей Вселенной. В этом случае скорость расширения будет неограниченно возрастать, и все тела будут разорваны на куски, затем молекулы, атомы и элементарные частицы. Мы уже говорили об этом в разделе 5.2.

Черные дыры и другие экзотические объекты

6.1. Черные дыры

Выполним наше обещание и расскажем о некоторых экзотических объектах, предсказанных ОТО. Они существенно менее распространены, чем темная материя или темная энергия, однако достаточно интересны, чтобы быть по крайней мере упомянутыми в этой книге.

Первый тип объектов, которые мы рассмотрим, – черные дыры, многие из которых наблюдались астрономами. Черная дыра представляет собой объект с плотностью настолько высокой, что пространственная кривизна и приливные силы в ее центре становятся бесконечными (это называется «пространственно-временная сингулярность», или просто «особенность» для краткости). Эта особенность окружена горизонтом событий – «поверхностью» черной дыры. Любой объект, включая свет, проваливается внутрь дыры через ее горизонт событий, но не может покинуть ее и должен двигаться в направлении центральной сингулярности. Именно поэтому этот объект называют черной дырой.

Причина в том, что под горизонтом событий радиальная координата становится времениподобной. Это означает, что радиальная координата тела внутри горизонта должна уменьшаться подобно тому, как временная координата любого тела вне черной дыры должна увеличиваться. Мы путешествуем вдоль времени, а падающий объект внутри черной дыры перемещается вдоль его радиальной координаты к сингулярности.

Могут ли быть схожие участки пространства, где все должно удаляться от этой центральной сингулярности? Физики рассмотрели и эту возможность и назвали такие объекты «белыми дырами». Мы обсудим их чуть позже.

Расстояние от центральной сингулярности до горизонта событий называется радиусом Шварцшильда и пропорционально массе черной дыры. Это не совсем расстояние в привычном понимании слова, ведь движение происходит по времени. Но не будем слишком придираться к словам, когда мы описываем черные дыры и их повадки. Величины радиусов Шварцшильда реально существующих черных дыр, как правило, весьма малы: если бы Солнце стало черной дырой⁸⁶, его радиус Шварцшильда был бы около 3 км. Массы черных дыр лежат в диапазоне от нескольких солнечных масс до нескольких миллиардов солнечных масс. Принимая во внимание, что радиус черной дыры пропорционален ее массе, легко оценить радиусы этих черных дыр.

Первое решение уравнений Эйнштейна, описывающее черную дыру, появилось в 1916 г. одновременно с ОТО. Тем не менее потребовалось около двух десятилетий, чтобы понять физический смысл этого решения, а полное понимание было достигнуто в 1958 г. В течение длительного времени, пока наблюдательные средства не позволяли обнаружить черные дыры, отношение к ним среди астрономов заполняло весь спектр – от полного неприятия до попыток объявить любой непонятный объект черной дырой. Лишь в конце XX в. лагерь сторонников черных дыр торжествовал победу: некоторые из наиболее ярких противников были вынуждены признать существование черных дыр. Сам термин «черная дыра» впервые появился в 1964 г.

Естественно, саму черную дыру наблюдать нельзя, так как она, как следует из названия, ничего не излучает. На самом деле черные дыры излучают за счет квантовых эффектов, но температура этого излучения, открытого Стивеном Хокингом, очень мала и реально обнаружить его невозможно. Например, если бы наше Солнце стало черной дырой, то температура этого излучения составляла бы всего 10–7 К.

Черные дыры можно наблюдать более или менее непосредственно в двух случаях: либо

⁸⁶ В действительности это не может произойти. Солнце просто не имеет достаточной массы, чтобы сколлапсировать. Тем более Земля с ее радиусом Шварцшильда около 9 мм.

черная дыра является частью двойной системы – в этом случае можно увидеть ее аккреционный диск (излучение от вещества, попадающего в дыру и обращающегося вокруг нее), или это сверхмассивная черная дыра, как Sagittarius A*, расположенная в самом центре нашей Галактики в созвездии Стрельца. Во втором случае мы можем увидеть собственные движения близлежащих звезд, вращающихся вокруг Sagittarius A*. На далеких расстояниях мы можем видеть черные дыры в качестве активных галактических ядер и квазаров. Недавно НАСА показало огромную концентрацию черных дыр в районе под названием Chandra Deep Field-South, сфотографированную космическим рентгеновским телескопом «Чандра»⁸⁷. На участке неба размером с диск Луны находится более 5000 черных дыр.

Астрономам известны черные дыры звездных масс, с массами начиная от нескольких масс Солнца, промежуточных масс порядка сотен масс Солнца и сверхмассивные черные дыры с массами от миллиона масс Солнца. Как правило, они находятся в центрах галактик; в нашей Галактике эту роль играет Sagittarius A* с массой 4 млн масс Солнца. В окрестностях нашей Галактики самая массивная черная дыра находится в центре галактики M87; ее масса составляет 6 млрд масс Солнца. А наиболее массивная из известных черных дыр имеет массу 20 млрд масс Солнца и находится в галактике NGC 4889.

Как образуются черные дыры? Естественно, черные (и белые) дыры могли появиться вместе с остальной частью Вселенной во время Большого взрыва, но все они должны были разнестись далеко за пределы космологического горизонта во время инфляции. Таким образом, у нас нет никаких шансов наблюдать дыры, образованные во время Большого взрыва. Наблюдаемые черные дыры образовались другим путем, а именно путем коллапса, т. е. быстрого сжатия массивных объектов. Очевидно, белые дыры не могли быть сформированы подобным образом, поэтому мы не можем наблюдать ни одну из них.

Черные дыры широко известны благодаря научной фантастике. Другое дело, что свойства черных дыр, описываемых фантастами, довольно далеки от того, что утверждает наука. С точки зрения теории относительности уединенная черная дыра может иметь следующие параметры: массу, электрический заряд и момент импульса. В принципе, рассматриваются черные дыры, имеющие также два нефизических параметра: магнитный заряд и так называемый параметр Ньюмена – Унти – Тамбурино. Никаких других независимых параметров черная дыра иметь не может. Это утверждение известно в теории относительности под названием «теорема о том, что черные дыры не имеют волос» (англ. no-hair theorem)⁸⁸. Если на черную дыру падает тело сложной формы, например стол, то детали распределения его массы, т. е. все мультипольные моменты, начиная с квадрупольного, излучаются в виде гравитационных волн.

Все черные дыры имеют массу, так что есть только четыре возможных типа черных дыр в зависимости от наличия электрического заряда и вращения. Самые простые из них – это незаряженные невращающиеся черные дыры, описываемые решением Шварцшильда. Заряженные невращающиеся черные дыры описываются метрикой Райсснера – Нордстрёма, незаряженные вращающиеся черные дыры – решением Керра, а заряженные вращающиеся черные дыры – метрикой Керра – Ньюмена. Начнем с простейших черных дыр Шварцшильда.

6.1.1. Шварцшильдовские черные дыры

Рассмотрим вначале простейшую невращающуюся незаряженную черную дыру. В ОТО такая черная дыра описывается метрикой Шварцшильда и, соответственно, называется

⁸⁷ <http://chandra.si.edu/photo/2017/cdfs>.

⁸⁸ Есть экзотические теории о черных дырах, нарушающие теорему «об отсутствии волос». Такие гипотетические объекты имеют несколько шокирующее название «волосатые черные дыры».

шварцшильдовской черной дырой. Это решение сферически симметрично и зависит только от одной радиальной координаты r . В центре при $r = 0$ находится сингулярность, т. е. место, в котором кривизна пространства-времени обращается в бесконечность. С сингулярностями мы уже сталкивались, говоря о Большом взрыве, Большом хрусте и Большом разрыве. Однако эта сингулярность окружена со всех сторон так называемым горизонтом событий черной дыры, имеющим радиус, пропорциональный ее массе. Этот горизонт работает как полупроницаемая мембрана. Сквозь горизонт вещество и излучение могут пройти только внутрь черной дыры, но не могут выйти наружу. Попав внутрь черной дыры, пройдя горизонт событий, любое тело обязано двигаться, уменьшая радиальную координату. Это связано с тем, что под горизонтом событий радиальная координата становится времениподобной, т. е. ведет себя так, как время в привычном для нас пространстве. Поэтому точно так же, как мы не можем двигаться против времени, тело, прошедшее горизонт событий, будет неотвратимо падать на центральную сингулярность.

Какова будет судьба тела, падающего в черную дыру? Если оно свободно падает, то с релятивистской точки зрения находится в состоянии покоя в выделенной системе отсчета. Но на него будут действовать приливные силы, которые чрезвычайно велики вблизи сингулярности. Они стремятся сжать его в тангенциальном направлении и растянуть в радиальном, сделав похожим на макаронину, которая немного толще в верхней части⁸⁹. Так что, если вы хотите испытать, что чувствует человек, падающий в черную дыру, не подвергая себя смертельной опасности, можете привязать гирию к вашим ногам и висеть на руках на гимнастических кольцах, как показано на рис. 6.1⁹⁰.



Рис. 6.1. Доступный симулятор черной дыры для идиотов

При пролете горизонта событий ничего особенного не произойдет; вообще, с точки зрения падающего, момент пересечения телом горизонта событий никак не выделен. При подлете к центральной сингулярности приливные силы станут бесконечными. В результате тело будет разорвано на куски, куски – на кусочки, кусочки – на атомы, а атомы – на элементарные частицы.

Приливные силы пропорциональны M/r^3 , где M – масса черной дыры. Это нерелятивистское приближение, которое справедливо лишь при достаточно большом расстоянии от сингулярности. Для близких расстояний должна быть использована

⁸⁹ Различие приливных сил у верхнего и нижнего конца — это слабый эффект, заметный, только если размер падающего тела сравним с радиусом Шварцшильда.

⁹⁰ Мы снимаем с себя ответственность за любые повреждения, которые вы можете получить, делая это.

релятивистская формула, но необходимость ее использования означает, что приливные силы велики и падающий человек уже давно разорван; так что, пока он жив, данное приближение хорошо работает. Горизонт событий находится на расстоянии r_g , где r_g – радиус Шварцшильда, он же гравитационный радиус, равный $r_g = 2GM/c^2 \approx 2,95 M/M_{\odot} \text{ км}$, где M_{\odot} – масса Солнца. Таким образом, если выразить расстояние до черной дыры в ее радиусах Шварцшильда, то приливная сила будет пропорциональна $(r_s/r)^3/M^2$, что означает, что приливные силы на расстоянии, равном заданному числу радиусов Шварцшильда, слабее для более массивных черных дыр.

В частности, если свободно падающий наблюдатель пересекает горизонт событий сверхмассивной черной дыры, он не почувствует ничего особенного. Но не факт, что он сможет долететь в целости до горизонта событий небольшой черной дыры.

Оценим теперь время полета внутри черной дыры – от пересечения горизонта событий до центральной сингулярности. Используем прием, столь любимый физиками-теоретиками, который называется анализом размерности. Так как время падения – кинематическая величина, оно не может зависеть от параметров падающего тела из-за принципа эквивалентности. Таким образом, оно может зависеть только от параметров черной дыры. Черная дыра Шварцшильда имеет только один параметр: массу. У нас также есть две соответствующие фундаментальные константы – гравитационная постоянная G и скорость света в вакууме c . Единственной комбинацией этих трех величин с размерностью времени является GM/c^3 . Таким образом, время падения в черную дыру будет равно $kGM/c^3 \approx 4,93 k M/M_{\odot} \text{ мкс}$, где k – некий безразмерный коэффициент. Мы получили ответ, причем в рамках ОТО, ничего не рассчитывая и не используя никаких формул. В этом состоит прелесть анализа размерности. Тут мы могли бы добавить, что величина k по порядку величины не должна сильно отличаться от единицы.

Чтобы найти ее точное значение, понадобятся и формулы, и расчеты. Величина k зависит от того, как именно тело падает, но она не может превышать π в любом случае, даже если тело – это ракета и она включит свой двигатель, пытаясь из всех сил затормозить падение. Это предельное значение $k = \pi$ не может быть получено из нерелятивистских формул; заинтересованных отошлем к задаче 17.3 в книге (Lightman, 1975). Таким образом, максимальное время падения в черную дыру равно $\pi GM/c^3 \approx 15,5 M/M_{\odot} \text{ мкс}$. Для черной дыры в центре нашей Галактики Sagittarius A* это время будет около минуты. Для самой массивной из известных черных дыр, находящейся в галактике NGC 4889, с массой около 21×10^9 солнечных масс, оно было бы около 90 часов, так что падающий наблюдатель имел бы достаточно времени, чтобы обдумать, было ли его решение прыгнуть в дыру действительно мудрым.

Время падения измеряется в системе падающего наблюдателя, т. е. по его собственным часам. Это уточнение очень важно, так как время, измеренное в разных системах отсчета, т. е. разными наблюдателями, может существенно различаться. Вблизи черной дыры гравитационное поле очень сильно и приводит к замедлению времени, так называемому гравитационному красному смещению.

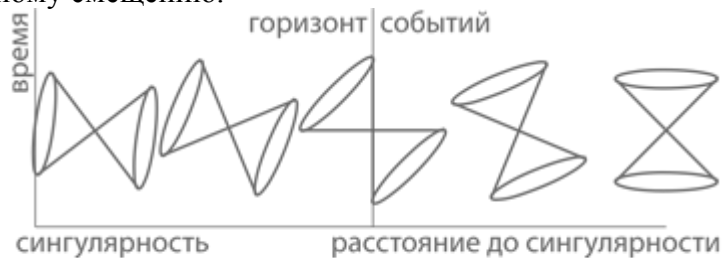


Рис. 6.2. Световые конусы в окрестности черной дыры Шварцшильда

Обратим внимание на то, что к сингулярности тело приближается по времени, роль которого играет координата t . Такая сингулярность называется пространственноподобной. Другими примерами такой сингулярности являются космологические сингулярности, т. е.

Большой взрыв, Большой хруст и Большой разрыв. Остальные три координаты, в том числе координата, обозначаемая буквой t , вне черной дыры соответствующая времени, внутри черной дыры пространственноподобны, т. е. вдоль них можно двигаться в любом направлении. Для иллюстрации рассмотрим световые конусы падающего тела, показанные на рис. 6.2. Напомним, что световой конус – это гиперповерхность ⁹¹ в пространстве-времени, которая образуется при прохождении света через определенную точку. Самое главное его свойство – это то, что независимо от того, что делает объект, он не может выйти за пределы своего светового конуса. Более подробная информация приведена в разделе 1.2.8.

Вдали от черной дыры световой конус выглядит вполне нормально: свет распространяется одинаково в любом направлении, поэтому ось светового конуса направлена вдоль оси t . Когда объект приближается к черной дыре, ее гравитация начинает притягивать свет (вспомним гравитационное линзирование). С точки зрения удаленного наблюдателя, свет распространяется быстрее в направлении черной дыры, чем от нее, и световой конус наклоняется в сторону черной дыры. На горизонте событий световой конус наклонен таким образом, что его внешний край проходит параллельно оси t . С этого момента больше невозможно избежать падения в черную дыру. Внутренний край проходит параллельно оси r . Если падающий наблюдатель углубится внутрь черной дыры, его световой конус наклоняется еще сильнее. Теперь оба его края обращены к сингулярности и направлены в противоположных направлениях вдоль оси t . Таким образом, достаточно быстро движущееся тело может двигаться в противоположном направлении оси t , оставаясь внутри своего светового конуса. Возле центральной сингулярности световой конус должен быть повернут на 90° , но эта простая аналогия не очень работает в окрестности сингулярности.

Тело, падая в черную дыру, уменьшает свою потенциальную энергию в гравитационном поле, преобразуя ее в кинетическую. На горизонте событий эта потенциальная энергия становится равной нулю. Если мы будем спускать тело в черную дыру, привязав его к веревке, вращающей при этом ось идеального генератора, мы могли бы получить энергию, равную mc^2 – полной энергии покоя тела.

Эта энергия огромна: на каждый грамм вещества приходится 90 ТДж, что составляет около 25 ГВт-час – энергия, производимая за сутки атомной электростанцией. Если бы такой процесс мог быть реализован на практике, это решило бы все энергетические проблемы человечества, а заодно и проблему мусора. Следует также отметить, что эта энергия была бы действительно «зеленой», так как единственным побочным продуктом процесса являлись бы экологически чистые гравитационные волны.

Для наблюдателя, неподвижного относительно черной дыры и находящегося бесконечно далеко (реально – более чем в 100 радиусах) от нее, время течет с обычной скоростью. По мере приближения к черной дыре время начинает замедляться и на горизонте событий полностью останавливается с точки зрения удаленного наблюдателя. Если мы окружим черную дыру сферой и через люк будем медленно стравливать трос с закрепленными на нем кварцевыми часами, то по мере приближения к черной дыре часы будут идти все медленнее и медленнее независимо от принципа их действия (естественно, кроме часов, основанных на силе тяжести, например маятниковых или песочных).

С этим эффектом связаны два расхожих мифа, одним из которых мы обязаны научно-популярной литературе, а вторым – научно-фантастической. Рассмотрим их по порядку.

Широко известен мысленный эксперимент с двумя наблюдателями, один из которых падает в черную дыру, а другой наблюдает за ним, оставаясь неподвижным. При этом утверждается, что из-за описанного выше эффекта замедления времени неподвижный

⁹¹ Гиперповерхность представляет собой трехмерное сечение четырехмерного пространства.

наблюдатель будет видеть падающего вечно, хотя тот достигнет горизонта событий за вполне конечное время в его собственной системе отсчета. Что же на самом деле увидит неподвижный наблюдатель? За время своего падения падающее тело излучит конечное число фотонов, так как этот процесс будет происходить в его собственной системе отсчета. Поток излучения от падающего тела, достигающий неподвижного наблюдателя, с точки зрения формальной математики будет экспоненциально убывать со временем (чтобы «растянуть» конечное число фотонов на бесконечное время), т.е. яркость тела будет уменьшаться. Кроме того, длина волны этого излучения увеличится из-за гравитационного красного смещения и из-за эффекта Доплера. В результате через более-менее продолжительное время до неподвижного наблюдателя будут долетать только отдельные фотоны, излученные падающим телом, да еще и с крайне низкой энергией. Поэтому, хотя формально неподвижный наблюдатель будет вечно «видеть» падающее тело, в реальности объект будет виден конечное время. Именно потому, что свет приходит в виде квантов, через некоторое время внешний наблюдатель увидит последний фотон, испускаемый падающим телом перед пересечением горизонта. Расчеты показывают, что это произойдет довольно быстро.

В одном научно-фантастическом рассказе описана ситуация, когда гибнущая цивилизация отправила космический корабль, груженный информацией об их достижениях, к черной дыре, чтобы будущие цивилизации смогли его обнаружить и спасти, получив в подарок ценные знания. Возможно ли это? Оказывается, существует конечное время, в течение которого это возможно. По его прошествии неподвижный наблюдатель будет «видеть» (кавычки стоят по причине, описанной в предыдущем абзаце), как корабль-спасатель приближается к спасаемому в течение бесконечного времени, но никогда его не достигнет. Более того, свет от второго корабля никогда не достигнет первого, так что он даже не узнает о том, что кто-то пытался его спасти.

Запас времени на спасение должен быть того же порядка, что и время падения к центральной сингулярности, потому что нет другой доступной характерной шкалы времени. Поскольку это время очень короткое (несколько микросекунд для черной дыры солнечной массы), спасательная команда должна быть чрезвычайно эффективной.

6.1.2. Черная дыра Райсснера – Нордстрёма

Теперь рассмотрим заряженную черную дыру, т.е. черную дыру, которая помимо массы имеет еще и электрический заряд. Отношение ее заряда к массе не может превышать некую критическую величину. Заряженная черная дыра описывается метрикой Райсснера – Нордстрёма. Рассмотрим падение на нее тела. До пересечения горизонта событий все будет происходить почти так же, как и для рассмотренной выше шварцшильдовской черной дыры, за исключением наличия электростатического поля. После прохождения горизонта событий тело точно так же начнет неотвратимо падать в направлении центральной сингулярности, но с одним важным отличием. На пути к центральной сингулярности тело пересечет второй горизонт событий и окажется во внутренней области черной дыры, где радиальная координата снова является пространственноподобной. Что касается центральной сингулярности, то она будет времениподобной, т.е. в ее окрестности можно двигаться как по направлению к ней, так и от нее. Таким образом, любой, даже самый маленький электрический заряд черной дыры полностью меняет тип сингулярности в ее центре.

Теоретически, если падающее тело является, скажем, ракетой, оно может включить двигатели и изменить направление своего движения, начав двигаться с увеличением радиальной координаты. По мнению некоторых специалистов, пролетев через внутренний горизонт, оно снова попадает в область, где радиальная координата времениподобна, и теперь будет увеличиваться, т.е. тело окажется внутри белой дыры, через горизонт которой оно и вылетит наружу. А куда, собственно, оно вылетит? Ответа на этот вопрос никто дать не в состоянии. Непонятно ни в какой точке, ни в какой момент времени, ни вообще в какой

вселенной это произойдет. Однако любителей путешествия в неизведанное ожидает одна проблема. Внутренний горизонт черной дыры с разумными с астрономической точки зрения параметрами находится слишком близко к сингулярности, и бросившийся в черную дыру будет разорван еще до того, как его пересечет. Более того, сама идея о том, что внутренний горизонт можно пересечь изнутри, является спекулятивной.

6.1.3. Вращающаяся черная дыра Керра

Последний тип черных дыр, которые мы рассмотрим, – это незаряженные, но вращающиеся черные дыры, описываемые метрикой Керра⁹². Так как большинство астрономических объектов вращаются, это, как полагают, наиболее распространенный тип черных дыр. Как и черная дыра Райсснера – Нордстрёма, черная дыра Керра имеет ограничение. Ее момент импульса при заданной массе не должен превышать критического значения, определяемого ее массой.

В этом случае центральная сингулярность будет окружена сферическим горизонтом событий. Вокруг этого горизонта будет располагаться еще одна поверхность, называемая пределом стационарности. Она имеет форму сплюснутого эллипсоида вращения и касается горизонта событий в точках, лежащих на оси вращения. Пространство между двумя этими поверхностями называется эргосферой. Доказано, что любое тело, попавшее в эргосферу, не может быть неподвижно относительно удаленного наблюдателя – оно обязано вращаться в ту же сторону, что и черная дыра. Вращающиеся в эргосфере тела могут иметь отрицательную полную энергию с учетом энергии покоя. Поэтому тело, залетевшее в эргосферу, может распасться на два тела, одно из которых имеет отрицательную энергию, а второе, по закону сохранения энергии, будет иметь большую энергию, чем исходное тело.

Если развивать идею решения энергетическо-экологических проблем при помощи черных дыр, то можно направить в эргосферу черной дыры контейнер с мусором. Часовой механизм в заданное время откроет контейнер и выбросит мусор на орбиту с отрицательной полной энергией. Ускорившийся контейнер вылетит из эргосферы, и его кинетическая энергия может быть использована в интересах народного хозяйства. Таким образом, можно получить энергию, большую чем mc^2 , где m – масса выброшенного мусора. Откуда же берется дополнительная энергия? Мусор, выброшенный в эргосферу, вращается в сторону, противоположную направлению вращения черной дыры. Провалившись внутрь черной дыры, он уменьшит ее момент импульса. Таким образом, энергия будет получена за счет замедления вращения черной дыры. Такой процесс был предложен Роджером Пенроузом.

⁹² Мы опускаем описание заряженной вращающейся черной дыры Керра — Ньюмена, сочетающей в себе качественные свойства черных дыр Райсснера — Нордстрёма и Керра.

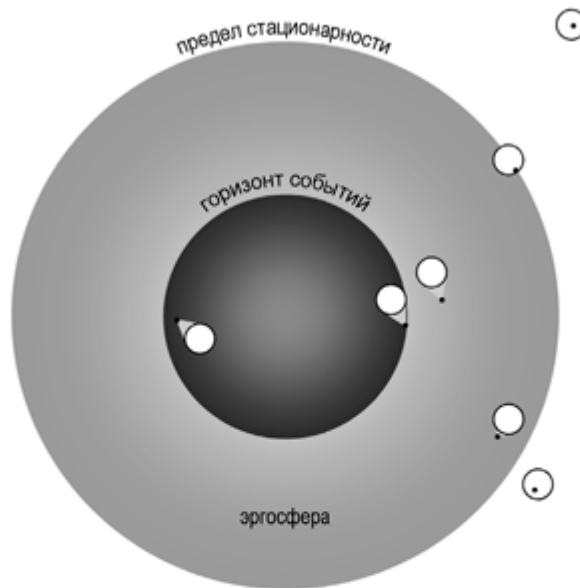


Рис. 6.3. Световые конусы в окрестности черной дыры Керра (в сечении экваториальной плоскости). Точками обозначены вершины световых конусов в момент испускания света, а небольшие кружки показывают сечения световых конусов будущего через некий промежуток времени после этого испускания

Свойства световых конусов вблизи черной дыры Керра показаны на рис. 6.3. В отличие от сферически-симметричной черной дыры Шварцшильда, черная дыра Керра имеет избранное пространственное направление – ее ось вращения и направление этого вращения. Пространство вокруг черной дыры Керра тоже затягивается в это вращение. Поэтому световые конусы наклоняются не только к центру, но и в направлении вращения. Мы не можем изобразить их на двумерном рисунке, как мы делали это на рис. 6.2 для шварцшильдовской дыры, отказавшись от явного изображения оси времени. По этой причине на рис. 6.3 мы изображаем экваториальное сечение черной дыры Керра, помещаем туда некоторое количество пробных частиц (черных точек), каждая из которых синхронно вспыхивает, становясь вершиной своего светового конуса. Свет от каждой вспышки расходится в стороны, образуя расширяющуюся оболочку или фронт разбегающейся волны. Через некоторое время (в системе отсчета удаленного наблюдателя) мы фиксируем круги, образованные пересечением экваториальной плоскости и фронтов этих волн, как границы белых кружков, изображенных на рис. 6.3. Самая близкая аналогия – водоворот, на который смотрят сверху. В него бросают камешки и наблюдают, как от места падения расходятся круги на поверхности воды.

Посмотрите внимательно на рис. 6.3. Вы заметите, что круги расположены по-разному по отношению к точкам. Представьте себе большой круг вокруг центральной сингулярности, проходящей через точку. С физической точки зрения возможны три принципиально различные ситуации: а) круг включает в себя точку; б) круг не включает в себя точку, но пересекает большой круг; в) круг не включает в себя точку и не пересекает большой круг. В первом случае пробная частица может находиться в покое или двигаться в любом направлении; во втором случае пробная частица должна двигаться, но все еще может не приближаться к черной дыре и избежать падения в нее; в третьем случае пробная частица должна двигаться по направлению к сингулярности. Случай а имеет место далеко от черной дыры вне ее эргосферы, снаружи от предела стационарности; случай б имеет место в

эргосфере; случай в происходит внутри горизонта событий⁹³.

Решение Керра принципиально отличается от решений Шварцшильда и Райсснера – Нордстрёма одним обстоятельством. Последние описывают не только черные дыры, но и пространство-время вокруг любых сферически-симметричных массивных объектов в вакууме, в том числе электрически заряженных. Например, гравитационное поле невращающейся незаряженной одиночной звезды может быть описано решением Шварцшильда. Можно ожидать, что решение Керра аналогично описывает гравитационное поле снаружи вращающейся звезды, но это не так. Причины этого слишком сложны для обсуждения здесь.

Тем, кто заинтересовался черными дырами (и не боится сложных математических формул), рекомендуем прочитать прекрасную статью «Решение Керра – Ньюмена» (Kerr-Newman metric) на Scholarpedia⁹⁴.

6.2. Голые сингулярности

А что же произойдет, если черная дыра получит слишком большой заряд или слишком большой момент импульса? Тогда это будет не черная дыра, а куда более экзотический объект – голая особенность (naked singularity). Что же это такое? Внутри черной дыры Райсснера – Нордстрёма находится времениподобная сингулярность, скрытая двумя горизонтами событий. Если же горизонтов нет, то такая времениподобная сингулярность называется голой особенностью. В какой-то степени это граница нашего мира. К ней можно подлететь сколь угодно близко и вернуться обратно, так как нет горизонта, который бы этому помешал. Именно такие сингулярности возникают в решениях Райсснера – Нордстрёма и Керра при заряде или моменте импульса, превышающих критические значения. Горизонты исчезают, и вся структура пространства-времени преобразуется.

Можно считать, что каждая голая особенность – это окно в неизвестный мир. Мы не имеем никакой возможности предсказать, что именно оттуда может появиться. Могут ли оттуда явиться воинственные пришельцы на летающих тарелках или черти с вилами? В принципе, это не исключено, но завоевать наш мир им не удастся из-за бесконечно больших приливных сил в его окрестности. И летающие тарелки, и вилы, и пришельцы с чертями будут разорваны на элементарные частицы.

Таким образом, голые особенности, если таковые существуют, должны в основном производить свет и элементарные частицы. Каков источник этого вещества и излучения? Никто не знает. Романтик мог бы назвать голые особенности дверями между нашим миром и каким-то другим, по крайней мере черным ходом или форточкой. Другими словами, голые особенности – если они существуют – двусторонние порталы в другие миры, в отличие от черных дыр, которых можно назвать односторонними порталами.

Однако существование голых особенностей не признается многими физиками-теоретиками и математиками. Математики вообще не любят работать с решениями, имеющими особенности. Возражения физиков сводятся к двум основным пунктам. Во-первых, мы не знаем, будут ли выполняться законы физики в том виде, какими мы их знаем, возле сингулярности. Во-вторых, мы не можем знать граничные условия на них, и присутствие таких «окон» не дает нам возможность предсказывать будущее состояние Вселенной по начальным условиям.

⁹³ Внутренняя структура черной дыры Керра (внешний и внутренний горизонты, особенности) является весьма сложной, и мы не описываем ее в этой книге. В любом случае, не упав внутрь горизонта событий, мы не увидим ничего из находящегося внутри.

⁹⁴ http://www.scholarpedia.org/article/Kerr-Newman_metric.

Вторая причина привела известного физика Роджера Пенроуза к формулировке Принципа космической цензуры (Cosmic Censorship Principle). Согласно этому принципу, все сингулярности, образовавшиеся при коллапсе, должны быть скрыты от удаленного наблюдателя горизонтами событий.

Этот принцип является всего лишь гипотезой. Вдобавок он не отменяет существования голых особенностей, возникших вместе с остальной Вселенной в момент Большого взрыва. Однако уже знакомая вам инфляция разнесла бы такие сингулярности далеко за пределы нашего космологического горизонта. Поэтому Принцип космической цензуры, если он справедлив, практически означает, что в доступной нашему наблюдению части Вселенной нет голых особенностей.

Многие решения ОТО содержат голые особенности. Вопрос в том, являются ли эти решения физическими и имеют ли какое-то отношение к реальности. В принципе, часть объектов, отождествляемых с черными дырами, могла бы быть голыми особенностями, но никаких свидетельств в пользу этого нет.

6.3. Кротовые норы

Еще один вид экзотических объектов – кротовые норы. В последнее время к ним стали также применять термин «червоточина». В них можно влететь в одном месте, а вылететь совершенно в другом. За это качество они активно эксплуатируются писателями-фантастами, желающими как-то обойти ограничение скорости света, практически ставящее крест на межзвездных путешествиях, не говоря уже о межгалактических. С точки зрения внешнего наблюдателя, кротовая нора неотличима от шварцшильдовской черной дыры. Вход в кротовую нору, как правило, имеет вид черной дыры, а выход – белой. Такие объекты могли быть созданы только вместе со Вселенной во время Большого взрыва, а значит, обнаружить их нам, скорее всего, не удастся. В этом смысле они чем-то похожи на рассмотренные выше черные дыры Райсснера – Нордстрёма, но отличаются от них тем, что, пролетая кротовую нору в наиболее часто рассматриваемом ее варианте, тело пересекает не четыре, а только два горизонта событий, двигаясь вдоль времениподобного пути⁹⁵. Это, в частности, означает, что кротовая нора допускает движение только в одном направлении. Однако для всех физически разумных вариантов кротовой норы приливные силы настолько велики, что исключают возможность переноса каких-либо макроскопических объектов.

Вопрос: Если человек, упавший в черную дыру, посветит фонариком наружу вдоль радиуса, сможет ли этот свет увеличить свою радиальную координату?

Ответ: Воспользуемся следующей аналогией: человек, который выпал из летящего самолета во время падения, бросил свои ключи вверх. Могут ли эти ключи взлететь? Это довольно трудно себе представить. Они также будут падать вниз, но медленнее, и ударятся о землю вскоре после их владельца. То же самое будет происходить со светом – он все равно попадет в центральную особенность, но немного позже, чем человек с фонариком. При этом, с точки зрения падающих, свет фонарика и связка ключей будут от них удаляться. Вспомнив, что границы светового конуса представляют собой траекторию света, мы можем понять этот процесс из рис. 6.2.

Вопрос: Как кто-то может упасть в центральную сингулярность, если время останавливается на горизонте событий?

Ответ: На самом деле время не останавливается на горизонте событий. Так кажется внешнему наблюдателю, но свободно падающий наблюдатель не заметит ничего

⁹⁵ Есть разные варианты кротовых нор, но среди них нет общепринятого, поэтому мы описываем один из них.

необычного при пересечении горизонта событий, если не считать того, что его разорвет на мелкие кусочки, но это может произойти в разных местах в зависимости от массы черной дыры.

Выводы

В этой книге мы рассказали об основах космологии. Мы объяснили основные факты, теории и проблемы, их историческое развитие и использовали некоторые не очень сложные вычисления, чтобы их описать. Давайте подведем наиболее важные итоги того, о чем здесь написано.

Сейчас мы верим, что эволюция Вселенной описывается Λ CDM-моделью с дополнительной инфляционной стадией. Перечислим основные моменты:

- Вселенная имеет конечный возраст 13,8 млрд лет;
- она родилась при Большом взрыве, точная природа которого неизвестна;
- через мельчайшую долю секунды после Большого взрыва Вселенная вступила в стадию инфляционного раздувания, которая также продолжалась малую долю секунды;
- точная природа инфляции неизвестна;
- инфляция сделала Вселенную очень однородной и пространственно плоской, а также удалила любые экзотические объекты из наблюдаемой части Вселенной;
- наблюдаемая часть Вселенной ограничена космологическим горизонтом, размеры которого равны расстоянию, на которое смог распространиться свет после Большого взрыва (около 40 млрд св. лет);
- самое дальнее из того, что мы можем увидеть, – это реликтовое или космическое микроволновое фоновое излучение, представляющее собой тепловое излучение, испущенное через 380 000 лет после Большого взрыва, которое за прошедшее с тех пор время остыло до температуры примерно 2,7 К;
- это подтверждает, что ранняя Вселенная была очень горячей;
- крошечные флуктуации, существовавшие тогда, выросли и образовали известные нам крупномасштабные структуры от звездных систем до сверхскоплений галактик;
- из того, как формировались эти структуры и как они ведут себя, мы знаем, что есть нечто, называемое темной материей, что взаимодействует с обычной материей гравитационно, но не участвует в сильных и электромагнитных взаимодействиях;
- мы не знаем, из чего состоит эта темная материя, но почти уверены, что это какие-то массивные частицы, движущиеся значительно медленнее скорости света;
- все попытки обнаружения частиц темной материи (в надежде, что они участвуют также в слабых взаимодействиях) пока не увенчались успехом⁹⁶;
- в результате исследования формирования структур, весьма отдаленных вспышек сверхновых типа Ia и спектра флуктуаций реликтового излучения мы знаем, что в какой-то момент расширение Вселенной начало ускоряться;
- мы считаем, что причиной этого является нечто, называемое темной энергией, действующее подобно космологической постоянной или довольно близко к ней, т. е. гравитационно отталкивающее другую материю;
- у нас нет ни малейшего представления о природе темной энергии;
- темная материя и темная энергия в сумме составляют 95 % массы/энергии во Вселенной;
- доля темной энергии постоянно растет;
- Вселенная будет либо вечно продолжать ускоренно расширяться, либо будет

⁹⁶ Есть еще слабая вероятность того, что сезонные колебания, зафиксированные установкой DAMA/LIBRA, действительно вызваны темной материей, а не другими причинами. Космологическое сообщество настроено весьма скептически на этот счет; см., например, (Aprile et al., 2017).

разорвана темной энергией через конечное время в очень далеком будущем;

- нет никаких шансов, что Вселенная начнет сжиматься.

Эта теория согласуется со всеми известными наблюдениями и экспериментами, и нет никаких очевидных данных, которые могут ее опровергнуть. Тем не менее есть группы людей, выступающих против по меньшей мере одного из пунктов в этом списке; многие из них – профессиональные космологи.

Λ CDM-модель основана на ОТО, хотя мы показали, что большинство результатов могут быть получены из ньютоновской физики с небольшой модификацией закона всемирного тяготения, заимствованной из ОТО. Она также тесно связана с общепринятой стандартной моделью в физике элементарных частиц.

Если вы получили удовольствие, читая эту книгу, и хотели бы узнать больше о космологии, мы подготовили для вас список литературы в разделе «Для дальнейшего чтения». Приведем краткое описание этих книг. Некоторые из них написаны на английском языке.

Книга Айзека Азимова (1969) является одним из лучших, хотя несколько устаревшим, введением в астрономию. Многие явления были обнаружены или объяснены за полвека, прошедшие после ее написания, но мы рекомендуем ее из-за отличного стиля и глубины изложения. Для ее чтения не нужны предварительные знания.

Книга Германа Бонди (1972) представляет собой классический вводный курс специальной теории относительности с некоторыми упоминаниями общей теории относительности, обе части небольшие и занимательно написаны.

Книга Стивена Хокинга (1990) является мировым бестселлером по космологии, подчеркивая более философские аспекты этой науки.

Книга Эндрю Лиддла (2003) имеет минимальное число уравнений, но эти уравнения не только космологические. Если вам понравилась математическая часть нашей книги, мы рекомендуем прочитать эту книгу следующей.

Книга Андрея Линде (1990) представляет собой всеобъемлющий обзор инфляционной космологии. Естественно, в ней нет никаких упоминаний о темной энергии, которая была обнаружена впоследствии. Книга рассчитана на студентов старших курсов и требует продвинутых знаний математики и физики.

Книга Майкла Роуэн-Робинсона (2008) является хорошим учебником по наблюдательной космологии, рассчитанным на студентов, и требует средних знаний математики и физики. В дополнение к космологии как таковой она охватывает большинство связанных с ней областей.

Книга Стивена Вайнберга (1981) является популярным изложением стандартной космологической модели Джорджа Гамова. Она легко читается, в ней нет уравнений, а ее содержание, несмотря на множество открытий, сделанных с 1977 г., когда она была написана, в основном все еще актуально, потому что космологическая постоянная не играет существенной роли в ранней Вселенной.

Помимо книг мы также включили некоторые электронные препринты обзорных статей на английском с сайта arXiv.org. Их тематика должна быть довольно ясной из их названия. Приводим их как arXiv:что-то, и вы можете скачать их в интернете, набрав в вашем браузере www.arxiv.org/abs/что-то, где что-то – это то, что находится в ссылке после двоеточия и до квадратных скобок. Или вы можете просто поискать их на просторах интернета – это тоже отлично работает. Обратите внимание, что большинство из ссылок на arXiv (но не все) – научные статьи, ориентированные на профессиональных ученых.

В дополнение к этому мы настоятельно рекомендуем посетить веб-сайт по космологии Неда Райта, доступный по адресу <http://www.astro.ucla.edu/~wright/cosmolog.htm> (с русским переводом на <http://cosmologiya.narod.ru/cosmolog.htm>), который содержит много полезной информации и регулярно обновляется.

Приложение А

Космологическая эволюция с космологической постоянной



В этом приложении мы описываем Λ CDM-модель, используя нерелятивистскую космологию. Это приложение гораздо больше похоже на учебник, чем на научно-популярную литературу. Хотя оно довольно простое, в нем содержится много математики, что и явилось причиной, по которой мы отделили его от остальной части книги.

Строго говоря, здесь мы вышли за пределы применимости нерелятивистской космологии. Тем не менее мы продолжаем использовать нерелятивистское приближение для более общего случая эволюции Вселенной, заполненной различными видами материи. Для этого мы должны применить один результат ОТО, о котором писали в разделе 1.3.

Для вещества с ненулевым давлением в законе тяготения Ньютона вместо полной массы ρV мы должны использовать величину $(\rho + 3p/c^2)V = (\epsilon + 3p)V/c^2$. Здесь p – давление, ρ – плотность массы, ϵ – плотность энергии, а V представляет собой объем сферы, заполненной материей. Эта замена получается как ньютоновский предел ОТО. Соотношение $\epsilon = \rho c^2$ является следствием хорошо известной формулы $E = mc^2$. После того как мы применим этот трюк, все формулы нерелятивистской космологии в точности совпадут с уравнениями релятивистской.

А.1. Решение де Ситтера



Теперь мы имеем возможность ввести нерелятивистский аналог космологической постоянной. Это странный вид материи с плотностью и давлением, определяемыми формулой (2.35), и с уравнением состояния $p = -\epsilon$. Из уравнения (2.31) мы видим, что обе плотности – вещества и энергии – положительны, давление отрицательно и ни одна из этих величин не меняется по мере расширения Вселенной.

Рассмотрим решение де Ситтера в рамках нерелятивистской космологии. Еще раз рассмотрим пробную частицу, находящуюся на сферической поверхности с радиусом r , и поместим условный центр Вселенной в центр этой сферы. На этот раз сфера заполнена веществом, имитирующим космологическую постоянную с уравнением состояния $p = -\epsilon$. Ускорение этой пробной частицы

$$\ddot{r} = 2 \frac{GM}{r^2} = \frac{8\pi}{3} G \rho_{\Lambda} r. \quad (\text{A.1})$$

Мы учли, что множитель $(\epsilon + 3p)$ для такой материи с $p = -\epsilon$ равен -2ϵ . Это соответствует расширению с постоянной Хаббла, равной

$$H = \sqrt{\frac{8\pi}{3} G \rho_{\Lambda}} = \text{const}. \quad (\text{A.2})$$

Параметр замедления (2.23) в этом случае равен -1 , так что мы имеем дело с ускоренным расширением Вселенной. Это не удивительно, так как правая часть уравнения (A.1) всегда положительна, что означает гравитационное отталкивание, или антигравитацию.

В случае пылевидной материи существует три возможных космологических сценария (три решения Фридмана). В нашем случае есть один сценарий (решение де Ситтера).

Вспоминая аналогию с мячом, который пнули вверх, мы можем предположить, что шар, гравитационно отталкиваясь от планеты, приобретает все увеличивающуюся скорость и не имеет другого выбора, кроме как улететь за ее пределы бесконечно далеко.

А.2. Λ CDM-модель



Метрика де Ситтера интересна со многих точек зрения и активно используется в космологии, но она не описывает реальную Вселенную. Причина заключается в том, что наша Вселенная содержит не только космологическую постоянную или темную энергию, но еще и много материи, которая играет важную роль в космологии. Большая ее часть существует в виде небарионной темной материи. Мы также знаем, что эта темная материя движется значительно медленнее скорости света. Такая форма темной материи называется холодной темной материей. Ее давление незначительно по сравнению с плотностью энергии, и она похожа на пылевидную материю, которую мы рассматривали ранее.

Модель, которая включает в себя как космологическую постоянную $-\Lambda$, так и холодную темную материю $-CDM$, метко прозвали Λ CDM-моделью. Естественно, большая часть обычной барионной материи также холодная и может рассматриваться вместе с холодной темной материей. Мы просто заменим и то и то на пылевидную материю, пока речь идет только о параметрах эволюции Вселенной. При рассмотрении, скажем, барионных акустических колебаний эти виды материи существенно различаются.

Таким образом, мы рассматриваем сферу, заполненную двумя видами материи. Первый из них соответствует пылевидной материи с энергией и плотностью массы $\epsilon m = c^2 \rho_m$. Здесь индекс m относится к материи как темной, так и барионной. Ее давление практически отсутствует: $p_m \approx 0$. Материя с уравнением состояния $p_\Lambda = -c^2 \rho_\Lambda = -\epsilon \Lambda$ заменяет космологическую постоянную и обозначается индексом Λ . Как видно из уравнения (2.31), значения этих величин постоянны. В частности, $\rho_\Lambda = \text{const}$. Разделив ρ_m и ρ_Λ на критическую плотность (2.11), мы получаем параметры их плотности Ω_m и Ω_Λ соответственно. Они равны

$$\Omega_m = \frac{\rho_m}{\rho_c} = \frac{8\pi G}{3} \frac{\rho_m}{H^2}, \quad (\text{A.3})$$

$$\Omega_\Lambda = \frac{\rho_\Lambda}{\rho_c} = \frac{8\pi G}{3} \frac{\rho_\Lambda}{H^2}. \quad (\text{A.4})$$

Все три модели Фридмана соответствуют $\Omega_\Lambda = 0$. Случаи замкнутой, плоской и открытой моделей соответствуют $\Omega_m > 1$, $\Omega_m = 1$ и $\Omega_m < 1$. Модель де Ситтера соответствует $\Omega_m = 0$, $\Omega_\Lambda = 1$.

Параметры плотности и Ω_m и Ω_Λ изменяются с течением времени, потому что постоянная Хаббла зависит от времени, как и плотность вещества (2.8). Значение ρ_Λ остается постоянным.

Мы опять выберем произвольную точку отсчета во времени, которую будем считать текущей эпохой, или «сейчас». Все значения, относящиеся к этому моменту, отмечены индексом 0. Например, значение постоянной Хаббла в текущую эпоху – это параметр Хаббла H_0 , текущий радиус сферы r_0 , текущая плотность материи ρ_{m0} и т. д. Мы можем выразить плотности материи и космологической постоянной с помощью этих параметров и радиус сферы r с учетом формул (2.8) и (2.35) в виде

$$\rho_{m0} = \Omega_{m0} \rho_{c0} = \Omega_{m0} \frac{3H_0^2}{8\pi G}, \quad (\text{A.5})$$

$$\rho_m = \rho_{m0} \left(\frac{r_0}{r} \right)^3, \quad (\text{A.6})$$

$$\rho_\Lambda = \Omega_{\Lambda 0} \rho_{c0} = \Omega_{\Lambda 0} \frac{3H_0^2}{8\pi G} = \text{const}. \quad (\text{A.7})$$

Рассмотрим сферу с двумя видами материи. Пылевидная материя создает ускорение (2.24), а космологическая постоянная создает ускорение (A.1). Вместе они обеспечивают ускорение

$$\ddot{r} = \frac{8\pi}{3} G \rho_\Lambda r - \frac{4\pi}{3} G \rho_m r. \quad (\text{A.8})$$

Вычислим значение параметра замедления q (2.23). Мы получаем:

$$q = -\frac{\ddot{r}r}{\dot{r}^2} = \frac{4\pi G}{3H^2} (\rho_m - 2\rho_\Lambda) = \frac{\Omega_m}{2} - \Omega_\Lambda. \quad (\text{A.9})$$

Обратите внимание: мы получили это важное соотношение без использования ОТО. Мы видим, что расширение Вселенной может быть ускоренным или замедленным в зависимости от соотношения между двумя параметрами плотности. Астрономические наблюдения говорят нам, что теперь оно ускоряется, но до того оно замедлялось вплоть до некоего момента в прошлом, когда красное смещение составляло около 0,5. Данные спутника «Планк» в сочетании с некоторыми другими наблюдениями обеспечивают текущие значения $\Omega_\Lambda \approx 0,68$ и $\Omega_m \approx 0,32$. В соответствии с (A.9) параметр замедления теперь равен $q \approx 0,32/2 - 0,68 = -0,52$.

Воспользуемся (2.12), чтобы найти закон эволюции Вселенной в рамках Λ CDM-модели. Мы получаем плотность материи из уравнения (2.8), снабдив величины индексом m : $\rho_m = B r^{-3}$. Вместо уравнения (2.12а) получим уравнение, учитывающее влияние космологической постоянной

$$\begin{aligned} H^2 &= \left(\frac{dr}{dt} \right)^2 r^{-2} = \frac{A}{r^2} + \frac{8\pi G}{3} (\rho_\Lambda + \rho_m) \\ &= \frac{A}{r^2} + H_0^2 \left(\Omega_{\Lambda 0} + \left(\frac{r_0}{r} \right)^3 \Omega_{m0} \right). \end{aligned} \quad (\text{A.10})$$

Оно описывает зависимость $H(r)$. Зависимость $t(r)$ имеет вид

$$t = \int \frac{dr}{\sqrt{A + \frac{8\pi G B}{3r} + \frac{8\pi G \rho_\Lambda}{3} r^2}}. \quad (\text{A.11})$$

Напомним, что уравнение (2.10) было получено из закона сохранения энергии. Применяя эту интерпретацию к уравнению (A.10), мы видим, что космологическая постоянная вносит в энергию свой вклад, пропорциональный r^2 , т. е. площади поверхности сферы. Та же зависимость от r будет у энергии поверхностного натяжения сферической оболочки, но с отрицательным коэффициентом поверхностного натяжения. В результате мы пришли к довольно неожиданной нерелятивистской аналогии для космологической постоянной. Эта аналогия, скорее всего, чисто математическая и, вероятно, не имеет особого физического смысла.

Из уравнений (2.11) и (A.10) можно получить обобщение уравнения (2.26) для Λ CDM-модели

$$H^2 r^2 (1 - \Omega_m - \Omega_\Lambda) = A = \text{const}. \quad (\text{A.12})$$

В релятивистской космологии значение $1 - \Omega_m - \Omega_\Lambda$ обозначается Ω_k и пропорционально пространственной кривизне Вселенной, взятой с обратным знаком. Ее абсолютная величина уменьшается при $q < 0$. В результате при ускоренном расширении Вселенной она становится все более плоской. Мы уже имели дело с аналогичной ситуацией сразу же после Большого взрыва во время инфляционного расширения Вселенной, которое

мы обсуждали в разделе 3.6.

А.3. Плоская Λ CDM-модель



Астрономические наблюдения дают информацию о том, что наша Вселенная является практически плоской и

$$\Omega_m + \Omega_\Lambda \approx 1. \quad (\text{A.13})$$

Главное свидетельство малой кривизны пространства – это расположение основного максимума в спектре на рис. 3.2, который называется акустическим пиком. При положительной или отрицательной кривизне Вселенной он сдвигается влево или вправо. Плоскостность объясняется теорией инфляции. В эпоху инфляции любые отклонения от плоскостности быстро уменьшались, поэтому в настоящее время выполняется условие (A.13). В результате космологи используют две версии Λ CDM-модели. В первой из них мы используем плоскую модель с

$$\Omega_m + \Omega_\Lambda = 1. \quad (\text{A.14})$$

Это условие выполняется постоянно. Другими словами, сумма плотностей материи и материи, имитирующей космологическую постоянную, всегда равна критической плотности. Этот случай соответствует $A = 0$ в уравнениях (A.10), (A.11).

Вторая версия допускает некоторое незначительное отклонение от плоскостности Вселенной, которое возрастало с течением времени во время расширения с замедлением. В этом случае сумма плотностей материи и космологической постоянной почти равна критической. Естественно, это справедливо лишь с конца космологической инфляции. Инфляция обеспечила прекрасную тонкую настройку параметров плотности, удовлетворяющих условию (A.13) даже через миллиарды лет после ее окончания. Ограничение (A.13) выполняется в настоящее время и будет справедливо всегда из-за ускоренного расширения.

В плоской Вселенной параметр A в уравнениях (A.10) и (A.12) равен нулю. В почти плоской Вселенной все члены с этим параметром дают очень малые вклады в правые части соответствующих уравнений и могут быть отброшены, в результате чего мы получаем плоскую Λ CDM-модель. Она прекрасно описывает эволюцию Вселенной после завершения инфляционного периода.

Нам нужны значения только двух космологических параметров, полученных из наблюдений, а именно – текущее значение параметра плотности Ω_m (значение Ω_Λ мы находим из условия (A.14)) и параметр Хаббла H_0 . С их помощью из уравнения (A.10) мы получаем закон изменения со временем постоянной Хаббла

$$H = H_0 \sqrt{\Omega_{\Lambda 0} + \left(\frac{a_0}{a}\right)^3 \Omega_{m0}} = H_0 \sqrt{\Omega_{\Lambda 0} + (1+z)^3 \Omega_{m0}}. \quad (\text{A.15})$$

Здесь a_0 – это текущий масштабный фактор (часто принимаемый равным единице), а a – зависящий от времени масштабный фактор. Закон (A.15) описывает как прошлое, так и будущее Вселенной. Для эволюции в прошлом мы можем использовать красное смещение $z = a_0/a - 1$. Уравнение (A.15), как и ожидалось, дает текущее значение постоянной Хаббла, равное H_0 . Значение постоянной Хаббла непрерывно уменьшается:

$$\begin{aligned} \dot{H} &= H_0 \frac{d}{dt} \sqrt{\Omega_{\Lambda 0} + \left(\frac{a_0}{a}\right)^3 \Omega_{m0}} = -\frac{3}{2} H_0 \frac{\left(\frac{a_0}{a}\right)^3 \Omega_{m0} H}{\sqrt{\Omega_{\Lambda 0} + \left(\frac{a_0}{a}\right)^3 \Omega_{m0}}} = \\ &= -\frac{3H_0^2 \Omega_{m0}}{2} \left(\frac{a_0}{a}\right)^3 < 0. \end{aligned} \quad (\text{A.16})$$

На рис. А.1 показана эволюция отношения постоянной Хаббла к параметру Хаббла в зависимости от относительного масштабного фактора.

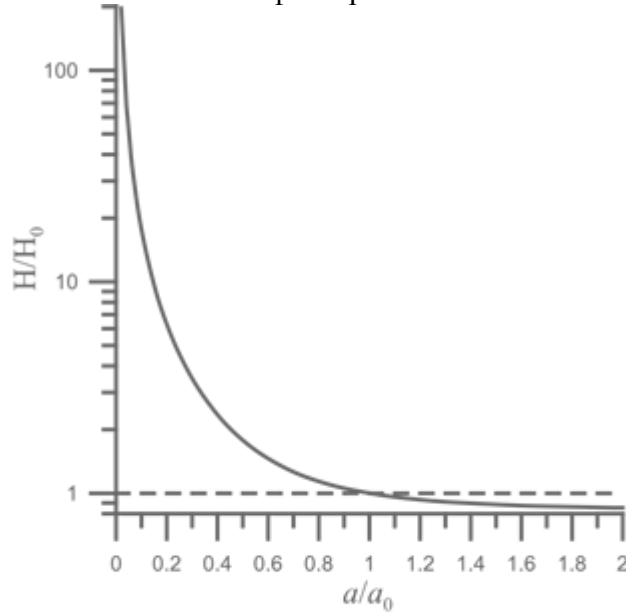


Рис. А.1. Относительная постоянная Хаббла в зависимости от относительного масштабного фактора

Как насчет ускоренного расширения? Напомним, что ускорение расширения не означает, что постоянная Хаббла увеличивается. Например, в модели де Ситтера она постоянна, а $q < 0$. Параметр торможения q определяется по формуле (2.23). Мы можем получить формулу

$$q = \frac{\Omega_{m0} (1+z)^3 - 2\Omega_{\Lambda 0}}{2(\Omega_{\Lambda 0} + (1+z)^3 \Omega_{m0})}. \quad (\text{A.17})$$

В современную эпоху $z = 0$ она превращается в уравнение (А.9). На рис. А.2 построен график этой функции для полученных астрономами значений $\Omega_{m0} = 0,31$, $\Omega_{\Lambda 0} = 0,69$. Мы видим, что после окончания инфляции параметр замедления был равен 0,5 и уменьшался. Он исчез при $a/a_0 = (\Omega_{m0}/2\Omega_{\Lambda 0})^{1/3} \approx 0,608$, когда масштабный фактор составлял около 61 % от текущего. Это соответствует красному смещению $z \approx 0,645$. Самая дальняя из известных сверхновых старше, чем переход от замедления к ускорению, так что она взорвалась еще во Вселенной, расширяющейся с замедлением. В будущем Вселенная продолжит ускоренно расширяться и ее параметр замедления будет уменьшаться, стремясь к -1 .

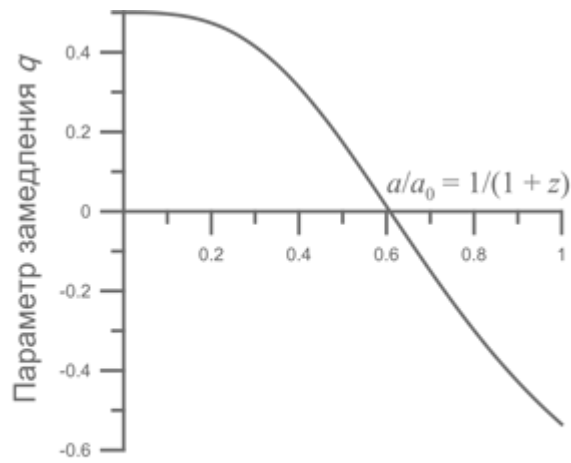


Рис. А.2. Параметр замедления

в зависимости от относительного масштабного фактора

Рассмотрим эволюцию параметра плотности вещества Ω_m и параметра плотности темной энергии Ω_Λ с учетом формул (А.5) – (А.7):

$$\Omega_m(z) = \frac{(1+z)^3 \Omega_{m0}}{\Omega_{\Lambda 0} + (1+z)^3 \Omega_{m0}}, \quad (\text{А.18})$$

$$\Omega_\Lambda(z) = \frac{\Omega_{\Lambda 0}}{\Omega_{\Lambda 0} + (1+z)^3 \Omega_{m0}}. \quad (\text{А.19})$$

Используя текущие значения параметров плотности, мы строим на рис. А.3 их значения в прошлом и в будущем в зависимости от относительного масштабного фактора. Параметрам плотности материи и космологической постоянной соответствуют длины линейных отрезков выше и ниже кривой. В левой части участка, который соответствует прошлому, мы могли бы перейти к красному смещению по формуле $a_0/a = 1 + z$. В будущем мы могли бы формально использовать эту формулу и получить отрицательные значения z , но это не принято. В нерелятивистском случае мы можем использовать радиус сферы r вместо масштабного коэффициента, так что $a_0/a = r_0/r$. Момент нулевого ускорения соответствует $\Omega_m = 2/3$, $\Omega_\Lambda = 1/3$ по формулам (А.9) и (А.17).

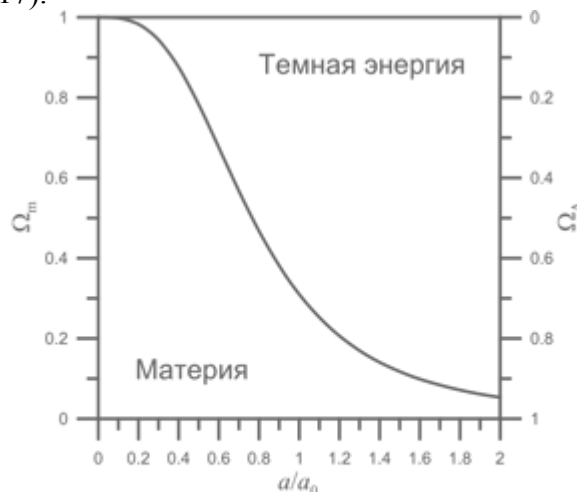


Рис. А.3. Зависимость параметров плотности материи и космологической постоянной

от относительного масштабного фактора в Λ CDM-модели

Итак, мы нашли зависимости всех необходимых параметров от масштабного фактора, используя только значение параметра плотности вещества Ω_m . Масштабный фактор часто используется в космологии. Но нам интересно еще и то, когда все это происходило. Мы

можем проинтегрировать уравнение (A.11) и получить

$$t = \frac{1}{H_0} \int_0^{a/a_0} \frac{\sqrt{\xi} d\xi}{\sqrt{\Omega_\Lambda \xi^3 + \Omega_m}} = \frac{2}{3H_0 \sqrt{\Omega_\Lambda}} \ln \left(\sqrt{\frac{\Omega_\Lambda}{\Omega_m} \left(\frac{a}{a_0}\right)^{3/2} + \sqrt{\frac{\Omega_\Lambda}{\Omega_m} \left(\frac{a}{a_0}\right)^3 + 1}} \right). \quad (\text{A.20})$$

Момент $t = 0$ соответствует Большому взрыву (строго говоря, концу эпохи инфляции менее чем секунду позже). Возьмем $H_0 = 68$ (км/с)/Мпк. Характерный масштаб времени равен обратному параметру Хаббла $H_0^{-1} \approx 4,54 \times 10^{17} \text{ с} \approx 14,4 \times 10^9$ лет. Мы построили график этой зависимости на рис. 2.9 (слева). Мы также использовали эту зависимость, чтобы преобразовать рис. A.1–A.3 в рис. 2.9 (справа), 2.10 и 2.11.

Из (A.15) получаем закон расширения Вселенной:

$$\left(\frac{a}{a_0}\right)^{3/2} = \sqrt{\frac{\Omega_{m0}}{\Omega_{\Lambda 0}}} \operatorname{sh} \left(\frac{3H_0 \sqrt{\Omega_{\Lambda 0}}}{2} t \right). \quad (\text{A.21})$$

Рассчитаем возраст Вселенной T . Это интервал времени от Большого взрыва до «сейчас», которое соответствует $a = a_0$. Таким образом, возраст Вселенной равен

$$T = \frac{2}{3H_0 \sqrt{\Omega_{\Lambda 0}}} \operatorname{arsh} \sqrt{\frac{\Omega_{\Lambda 0}}{\Omega_{m0}}} \approx 13,8 \text{ млрд лет}. \quad (\text{A.22})$$

Для сравнения найдем этот возраст в случае, если темная энергия отсутствовала бы. Полагая в формуле (A.20) $\Omega_m = 1$ и $\Omega_\Lambda = 0$, получаем $T = 2/3H_0 \approx 9,6$ млрд лет в полном соответствии с формулой (2.19). Это меньше возраста самых старых звезд.

Литература

- Abbott, B. P. et al. (2016a). Observation of Gravitational Waves from a Binary Black Hole Merger, *Phys. Rev. Lett.*, 116, 061102.
- Abbott, B. P. et al. (2016b). GW151226: Observation of Gravitational Waves from a 22-Solar-Mass Binary Black Hole Coalescence, *Phys. Rev. Lett.*, 116, 241103.
- Aprile, E. et al. (2017). Search for Electronic Recoil Event Rate Modulation with 4 Years of XENON100 Data, arXiv:1701.00769 (astro-ph.CO).
- Assis, A. K. T., and Neves, M. C. D. (1995). History of the 2.7 K Temperature Prior to Penzias and Wilson, *Apeiron*, 2, pp. 79–87.
- Cline, D., Simpson, M. (2015). Comparison of DAMA/LIBRA and DM ICE Results using Information Theory to Rule out Dark Matter Claims, arXiv:1504.04633 (astro-ph.HE).
- Cline, P. A. (2014). Brief Status of the Direct Search for WIMP Dark Matter, arXiv:1406.5200 (astro-ph.HE).
- Kimura M. et al. (2016). Repetitive patterns in rapid optical variations in the nearby black-hole binary V404 Cygni, *Nature*, 529, pp. 54–58.
- Kragh, H. (2012). Quasi-Steady-State and Related Cosmological Models: A Historical Review, arXiv:1201.3449 (physics.hist-ph).
- Manalaysay, A. (2011). Recent results in the search for dark matter with noble liquid detectors, arXiv:1106.0037 (hep-ex).
- Peter, A. H. G. (2012). Dark Matter, arXiv:1201.3942 (astro-ph.CO).
- Suzuki, N. et al. (2012). The Hubble Space Telescope Cluster Supernova Survey: V. Improving the Dark Energy Constraints Above $z \gtrsim 1$ and Building an Early-Type-Hosted Supernova Sample, *The Astrophysical Journal*, 746 (1), 85. DOI: 10.1088/0004-637X/746/1/85.
- Гамов Г. Моя мировая линия: неформальная автобиография. – М.: Наука, 1994 (My World Line: An Informal Autobiography. 1st Ed. Viking Adult, USA, 1970).

- Булгаков М. Мастер и Маргарита. – М.: Азбука, Азбука-Аттикус, 2016.
- Зельдович Я., Новиков И. Строение и эволюция Вселенной. – М.: Наука, 1975.
- Лайтман А. и др. Сборник задач по теории относительности и гравитации. – М.: Мир, 1979.
- Лем С. Библиотека XXI века (Созидательный принцип уничтожения. Мир как Холокост) – М.: АСТ, 2004.
- Парновский С.Л., Парновский А.С. Введение в современную космологию. – Киев: Наукова думка, 2013.
- Стругацкий А., Стругацкий Б. Понедельник начинается в субботу. – М.: АСТ, Neoclassic, 2015.
- Хокинг С. От Большого взрыва до черных дыр. Краткая история времени. – М.: Мир, 1990.
- Эйнштейн А. Собрание научных трудов. Т. 1. – М.: Наука, 1965.

Для дальнейшего чтения

- Cervantes-Cota, J. L. and Smoot G. (2011). Cosmology today – a brief review, arXiv: astro-ph/1107.1789.
- Liddle, A. (2003) Introduction to modern cosmology, 2nd Ed. (Wiley, UK).
- Linde, A. D. (1990) Particle Physics and Inflationary Cosmology, 1st Ed. (Harwood, Chur, Switzerland), also available as arXiv: hep-th/0503203.
- Peebles, P. J. E. and Ratra B. (2002). The Cosmological Constant and Dark Energy, arXiv: astro-ph/0207347.
- Roos, M. (2010). Dark Matter: The evidence from astronomy, astrophysics and cosmology, arXiv: astro-ph/1001.0316.
- Азимов А. Вселенная. От плоской Земли до квазаров. – М.: Мир, 1969.
- Бонди Г. Гипотезы и мифы в физической теории. – М.: Мир, 1972.
- Вайнберг С. Первые три минуты. Современный взгляд на происхождение Вселенной. – М.: Энергоиздат, 1981.
- Новиков И.Д. Как взорвалась Вселенная. – М.: Наука, 1988.
- Роуэн-Робинсон М. Космология. – Научно-издательский центр «Регулярная и хаотическая динамика», 2008.

Записи лекций

- Линде А.Д. Многоликая Вселенная. Лекция в ФИАН 10.06.2007
<http://elementy.ru/lib/430484>
- Рубаков В.А. Темная материя и темная энергия во Вселенной.
<http://elementy.ru/lib/25560>

Научный редактор Анатолий Засов
 Редактор Антон Никольский
 Руководитель проекта Д. Петушкова
 Корректоры М. Миловидова, М. Савина
 Компьютерная верстка Е. Кукалева
 Дизайн обложки С. Хозин
 Иллюстратор И. Жук

Издание подготовлено в партнерстве с Фондом некоммерческих инициатив «Траектория» (при финансовой поддержке Н.В. Каторжного).

Фонд поддержки научных, образовательных и культурных инициатив «Траектория» (www.traektoriafdn.ru) создан в 2015 г. Программы Фонда направлены на стимулирование интереса к науке и научным исследованиям, реализацию образовательных программ, повышение интеллектуального уровня и творческого потенциала молодежи, повышение конкурентоспособности отечественных науки и образования, популяризацию науки и культуры, продвижение идей сохранения культурного наследия. Фонд организует образовательные и научно-популярные мероприятия по всей России, способствует созданию успешных практик взаимодействия внутри образовательного и научного сообщества.

В рамках издательского проекта Фонд «Траектория» поддерживает издание лучших образцов российской и зарубежной научно-популярной литературы.

© Парновский С., 2017

© Издание на русском языке, перевод, оформление. ООО «Альпина нон-фикшн», 2018

© Электронное издание. ООО «Альпина Диджитал», 2018

Парновский С. Л.

Как работает Вселенная: Введение в современную космологию. – М.: Альпина нон-фикшн, 2018.

ISBN 978-5-9614-5060-6