

2.6. Расширение с ускорением

Астрофизика напоминает следствие по делу, в котором все улики лишь косвенные.

Станислав Лем

В 1990-х годах сложилась довольно странная картина – хорошо видимые всем звезды оказались лишь небольшим «придатком» к таинственной скрытой массе, дающей основной вклад в плотность Вселенной, а полная, наблюдаемая по ее гравитационному влиянию, плотность вещества Вселенной ($\Omega = 0.2-0.3$) в несколько раз меньше критической плотности. Однако обнаруженные примерно в это же время флуктуации реликтового излучения свидетельствовали, что полная плотность Вселенной должна быть близка к критической, то есть $\Omega = 1$ (раздел 2.4). Еще одна парадоксальная вещь – возраст Вселенной для $\Omega = 0.2-0.3$ получался равным примерно 11–12 млрд лет, что вступало в противоречие с возрастом старейших объектов нашей Галактики (например, шаровых скоплений).

Низкая наблюдаемая плотность Вселенной противоречила и взглядам многих теоретиков-космологов, активно развивающих представление об *инфляции* – особой стадии ранней эволюции Вселенной, в ходе которой она чрезвычайно быстро (за время $\sim 10^{-34}$ с) и сильно (в $\sim 10^{43}$ раз) расширилась. По окончании инфляции Вселенная разогрелась до очень высокой температуры, после чего наступила эпоха горячего Большого взрыва. Инфляция позволяла решить ряд проблем стандартной фридмановской космологии и, кроме того, она предсказывала, что средняя плотность Вселенной с большой точностью должна быть равна критической. Когда Алан Гут – один из создателей теории инфляции – узнал, что наблюдения свидетельствуют об $\Omega = 0.2-0.3$, он заявил, что рано или поздно все устаканится и наблюдатели обязательно получат $\Omega = 1$.

Каков же выход из этой ситуации? Что же *пропущено* во Вселенной? Из наблюдений было ясно, что это *что-то* не скучивается на масштабах скоплений галактик и ниже, иначе оно, подобно темной материи, было бы обнаружено по своему гравитационному влиянию. Значит, это *что-то* не является темной материей, и, с другой стороны, чтобы добрать плотность Вселенной до $\Omega = 1$, этого *что-то* должно быть очень много – больше, чем темной материи и, естественно, гораздо больше, чем барионного вещества.

Если оглянуться на историю космологии, еще в 1917 году Эйнштейн через обобщение уравнений ОТО ввел во Вселенную некую новую сущность (раздел 2.1). Речь идет о его Λ -члене или о космологической постоянной, введение которой было равносильно признанию существования во Вселенной среды, создающей не притяжение, а отталкивание. Эта среда обладает энергией и плотностью и в принципе может давать заметный вклад в полную плотность Вселенной. Сам Эйнштейн, узнав о результатах Фридмана и Хаббла, от этого обобщения своих уравнений гравитации отказался, признав его, по свидетельству Гамова, своей самой большой ошибкой. (Вспомним, что он ввел этот член лишь для того, чтобы сделать свою модель Вселенной стационарной.) Но, как это иногда бывает, даже ошибки гениев могут оказаться важными достижениями науки.

В 1990-х годах несколько ученых попытались реанимировать Λ -член. Впрочем, о нем никогда, по сути, и не забывали, но он в качестве своего рода курьеза оставался на периферии внимания физиков. В 1995 году американские астрофизики Иеремия Острайкер и Пол Стейнхардт проанализировали разнообразные наблюдательные факты о Вселенной – оценки ее плотности, возраста объектов, реликтовое излучение – и пришли к выводу, что все они согласуются с ненулевой космологической постоянной, вклад которой в плотность Вселенной $\Omega_\Lambda = 0.65 \pm 0.1$. Суммарная плотность Вселенной таким образом получа-

ется близкой к 1, что и требуется инфляцией и данными о реликтовом излучении. К относительно большой оценке величины космологической постоянной пришел на рубеже 1990-х годов и Стивен Вайнберг. Он воспользовался антропными соображениями (см. раздел 2.8) и заключил, что наблюдаемые свойства нашей Вселенной свидетельствуют о том, что вклад космологической постоянной может заметно превышать плотность обычной материи.

Были и другие исследователи, обсуждавшие возможность ненулевой космологической постоянной, но эти работы не привлекли в то время особого интереса. Тем большей неожиданностью для большинства физиков стало открытие в 1998 году двумя группами исследователей ускоренного расширения Вселенной, означавшего, что $\Lambda > 0$.

Формальная история этого открытия началась в 1988 году, когда под руководством Сола Перлмуттера (рис. 37) и Карла Пеннипакера в Национальной лаборатории Лоуренса в Беркли (США) была создана группа (ее сокращенное название SCP – Supernova Cosmology Project), основной целью которой было определение космологических параметров Вселенной по наблюдениям далеких сверхновых типа Ia (см. раздел 2.2)¹⁵.

Основная идея этого проекта состояла в том, что SN Ia обладают замечательным постоянством в максимуме блеска (см. рис. 23) и поэтому их можно использовать в качестве «стандартных свечей» – объектов, истинная мощность излучения которых известна, и которые, тем самым, можно использовать для точных оценок расстояний. Если пронаблюдать кривую блеска далекой сверхновой и найти ее видимую звездную величину в момент максимума блеска, то, сравнив эту величину с истинной светимостью, можно сразу найти расстояние до звезды.

¹⁵ Вскоре после образования группы интересы Пеннипакера стали все больше смещаться в сторону образования. Он основал знаменитый международный образовательный проект «Hands-on Universe» и стал посвящать ему основное время.

С другой стороны, расстояние до этой же звезды можно оценить по ее красному смещению и по задаваемой космологической модели. Сопоставив данные для множества сверхновых в широком диапазоне z , можно с разумной точностью оценить основные параметры Вселенной — значение постоянной Хаббла, плотность вещества, кривизну пространства.

Для того чтобы использовать сверхновую для космологических целей, нужно решить три наблюдательные задачи: 1) нужно ее обнаружить, 2) получить спектр и убедиться, что она относится к типу Ia, 3) построить кривую блеска, чтобы с хорошей точностью оценить ее блеск в максимуме. Открыть сверхновую можно и на небольшом телескопе, так как в максимуме блеска она может затмить излучение целой галактики, но вот для дальнейшего изучения потребуются крупные инструменты. И тут встает основная проблема — наблюдательное время на больших телескопах заказывается на полгода—год вперед, но ведь заранее никак не предугадать, когда же вспыхнет та сверхновая, для изучения которой этот инструмент понадобится! Блеск сверхновой нарастает очень быстро — если повезет, то до максимума блеска у наблюдателей есть лишь 1–2 недели, — и организовать за это время наблюдения на крупном телескопе почти невозможно.

Для решения этой проблемы Сол Перлмуттер предложил следующую стратегию. Вскоре после новолуния (Луна, засвечивая небо, делает невозможным наблюдения слабых далеких объектов) на относительно небольшом телескопе получают снимки нескольких десятков площадок на небе, включающих изображения множества галактик. Для увеличения числа объектов лучше наблюдать далекие скопления галактик. Затем, в начале следующего новолуния, то есть примерно через 3 недели, эти области снова наблюдают и с помощью автоматических процедур, сравнивающих изображения, выделяют появившиеся за это время точечные объекты. После исключения возмож-

ных дефектов изображений и следов космических частиц остаются кандидаты в сверхновые звезды. Эти кандидаты тут же начинают исследовать на крупном телескопе, время на котором было заранее заказано на нужные даты. Такой подход позволяет почти гарантированно, «по заказу» открывать новые сверхновые, причем, чем больше галактик попало в исследуемую область неба, тем больше вероятность открыть сверхновую.

Эффективность этой методики была наглядно продемонстрирована в 1992 году. Используя телескопы на Канарских островах (2.5-метровый телескоп для фотометрии площадок и 4.2-метровый – для спектроскопии), группа SCP открыла самую далекую на тот момент сверхновую на $z = 0.458$. С этим результатом «в кармане» группе стало легче добывать наблюдательное время на более крупных инструментах. Позднее поиск сверхновых производился на 4-метровых телескопах в Австралии и в Чили, а их спектральные наблюдения – на 10-метровом телескопе «Keck». (С 1997 года к наблюдениям подключился и космический телескоп «Хаббл».) В 1994 году у Перлмуттера и его команды были результаты наблюдений уже 7 открытых ими далеких сверхновых.

Надо заметить, что за последние сто лет специфика наблюдений на крупных оптических телескопах, да и работы астрономов в целом, изменилась очень сильно. Наблюдения уже не требуют таких подвигов, как во времена Слайфера (см. п. 2.1). Современный телескоп и его приборы – очень сложные устройства и астрономов, приезжающих на наблюдения в обсерваторию, обычно к ним даже не подпускают. Оптикой телескопов занимаются профессиональные оптики, аппаратурой – специалисты по приборам. Во время наблюдений астроном сидит в теплой комнате и следит за экранами мониторов – контролирует ход наблюдений, анализирует промежуточные результаты, принимает оперативные решения по изменению методики наблюдений. Зачастую автор наблюдательной



Рис. 37. Сол Перлмуттер и Брайан Шмидт – организаторы групп, открывших в 1998 году ускоренное расширение Вселенной по наблюдениям далеких сверхновых звезд.

Фото с сайтов supernova.lbl.gov и msowww.anu.edu.au.

задачи даже не приезжает в обсерваторию, так как он может принимать участие в наблюдениях по интернету, а вся работа телескопа обеспечивается сменным техническим персоналом или даже осуществляется полностью автоматически. В этих условиях основной ролью астронома является постановка интересной и осмысленной задачи, которую можно решить в ходе наблюдений.

Нарисованная почти идеальная картина относится к наблюдениям на больших телескопах, у которых диаметр главного зеркала составляет несколько метров. На небольших инструментах место старой, «слайферовской» романтики, конечно, еще осталось – астроному приходится проводить всю ночь под открытым небом, вручную управляя телескопом и его аппаратурой. Однако и эта специфика стремительно уходит из профессиональной астрономии, так как даже совсем маленькие телескопы все чаще строят полностью автоматизированными.

Еще одна особенность современной астрономии – огромное количество необработанного наблюдательного материала, накопленного в электронных архивах наземных и космических обсерваторий или полученного в ходе разнообразных цифровых обзоров неба. Этот материал доступен через интернет, и он позволяет решать многие задачи, вплоть до открытия объектов нового типа, без проведения новых наблюдений.

В 1994 году была создана HZT (High-Z Supernova Team) – вторая группа по поиску далеких сверхновых. (Одним из стимулов для ее создания послужили успехи SCP по обнаружению SN на больших z .) Руководителем группы стал Брайан Шмидт (рис. 37), незадолго до этого защитивший диссертацию по сверхновым в Гарварде. Подобно SCP, группа Шмидта была интернациональной – в нее входили исследователи из США, Австралии, Европы и Южной Америки. Наблюдательная стратегия HZT была схожа со стратегией SCP, и ее первым громким результатом стало открытие в 1995 году самой далекой сверхновой на $z = 0.479$.

Любопытны высказывания Алексея Филиппенко об обеих конкурирующих группах. Филиппенко – известный американский специалист в области изучения сверхновых звезд – с 1993 по 1996 годы работал в составе SCP, а затем перешел в HZT. Причиной для перехода послужило то, что в SCP ему работалось некомфортно. Главная причина дискомфорта – иерархическая структура SCP, подобная тем, что складываются у физиков при работе над большими проектами. Группа HZT состояла в основном из астрономов, ее организация была более аморфной и поэтому голос каждого из участников с большей вероятностью мог быть услышан и принят во внимание. Обратная сторона такой организации – в HZT было много «генералов» и, к сожалению, мало «солдат». Филиппенко пишет, что существование двух групп с точки зрения науки оказалось очень полезным – работа пошла быстрее,

а результаты стали более тщательно тестироваться в поисках возможных ошибок. Можно долго спорить о том, какой метод организации научных исследований лучше — иерархический, как в SCP, или «горизонтальный», как в HZT, но факт остается фактом, что обе группы пришли к основным результатам практически одновременно.

Путь к открытию не был гладким и прямым. Первый подробный анализ космологических параметров по характеристикам далеких сверхновых был опубликован Перлмуттером и др. летом 1997 года. Этот анализ основывался на данных о 7 из примерно 30 открытых к тому моменту SN на $z \sim 0.4$. Данные свидетельствовали о том, что вклад «светящегося» и «темного» вещества составляет почти 90% от критической плотности и, следовательно, если плотность Вселенной равна критической, то на долю Λ -члена почти ничего не остается. Формальная погрешность этого результата была очень велика, и результат мог рассматриваться лишь как сугубо предварительный. Последующее включение в рассмотрение *только одной* вновь открытой звезды с рекордным на тот момент красным смещением $z = 0.83$ существенно изменило результат в сторону уменьшения плотности вещества во Вселенной. Примерно в это же время (осенью 1997 года) группа HZT проанализировала наблюдения четырех сверхновых, включая очередной рекордный объект на $z = 0.97$, и также получила низкую оценку плотности вещества. Однако эти ранние результаты были статистически недостоверными и не могли ничего доказать или опровергнуть.

В конце 1997 года обе команды активно анализировали накопленные данные. В HZT были собраны наблюдения для 16 сверхновых типа Ia. Их окончательным анализом занимался Адам Райсс, который с 1996 года работал в Калифорнийском университете в качестве постдока Алексея Филиппенко. В декабре 1997 года стало совершенно ясно, что наблюдения приводят к очень странному выводу — если предположить, что $\Omega_\Lambda = 0$, то суммарная

плотность барионного и небарионного вещества (Ω_m), как следовало из формального решения, должна быть отрицательной, что, конечно, не имело смысла. Следовательно, космологическая постоянная должна быть больше нуля! Филиппенко пишет: «У меня отвисла челюсть, когда Адам показал мне построенную им диаграмму Хаббла¹⁶ и вывод, что сверхновые на больших z примерно на 0.25^{17} слабее, чем ожидается в модели Вселенной с низкой плотностью». Удивление Филиппенко объяснялось тем, что, если сверхновые выглядят слабее на четверть звездной величины, то, значит, они находятся от нас *дальше*, чем следовало из принимаемой в то время космологической модели. Простейшим объяснением этого факта является существование глобального отталкивания, антигравитации, введенной Эйнштейном в виде Λ -члена в свои уравнения, которое приводит к тому, что расширение Вселенной не замедляется под действием гравитации, а, наоборот, ускоряется. Члены HZT не ожидали такого результата и настойчиво искали у себя ошибку. И тут до них стали доходить слухи, что группа Перлмуттера тоже обнаружила что-то странное!

В конце 1997 года у группы SCP накопились наблюдения примерно для четырех десятков далеких сверхновых. В октябре—ноябре участники SCP несколько раз представляли свои результаты на семинарах Калифорнийского университета. В частности, на этих выступлениях звучало, что для плоской Вселенной получается $\Omega_m \approx 0.3$ и, соответственно, $\Omega_\Lambda \approx 0.7$. Если же зафиксировать, что $\Omega_\Lambda = 0$, то $\Omega_m < 0$, что не имеет физического смысла. Эти результаты рассматривались членами SCP как сугубо предварительные и они, как и участники HZT, максимально тщательно перепроверяли свои результаты, стараясь убедить в первую очередь самих себя, что Вселенная, действительно, расширяется с ускорением.

¹⁶ Диаграмма Хаббла – зависимость видимой звездной величины объекта от красного смещения.

¹⁷ Верхний значок «m» означает звездную величину.

Первый повод официально объявить об открытии ускоренного расширения Вселенной появился в самом начале следующего года. 8 января 1998 года на съезде Американского астрономического общества Сол Перлмуттер представил результаты своей группы для 40 сверхновых и указал на свидетельства в пользу ненулевой космологической постоянной. Перлмуттер подчеркнул предварительность этого заключения, а также то, что наблюдательные данные можно объяснить и без ускорения. Видимо поэтому представители прессы практически не обратили внимания на это выступление. Представители команды HZT, конечно, присутствовали на съезде, но, поскольку ряд проверок все еще не был завершен, они решили пока не объявлять о своих результатах. Но, как написал Филиппенко, «члены HZT не преминули заметить, что результаты SCP указывали на тот же вывод, что сделал Адам (Райсс) по данным HZT».

К середине февраля обе группы были уже уверены в своих результатах. 18 февраля на конференции, посвященной изучению скрытой массы («Dark Matter 98», Marina Del Rey, California), прозвучали доклады, провозгласившие открытие ускоренного расширения. Сначала прозвучали доклады членов SCP Герсона Голдхабера и Сола Перлмуттера, а затем выступил Алексей Филиппенко, представивший результаты HZT. Обе группы пришли к одинаковому заключению — плотность вещества Вселенной составляет примерно 0.3 (в долях критической плотности) и Вселенная расширяется с ускорением, ответственным за которое является космологическая постоянная, причем $\Omega_\Lambda \approx 0.7$.

Подробная статья с описанием этих результатов командой HZT была отправлена в печать в марте и опубликована в сентябре 1998 года. Члены SCP чуть задержались — их обобщающая публикация была готова осенью, а вышла лишь летом 1999 года. Впрочем, для приоритетных споров повода нет — результаты были получены и публично представлены практически одновременно.

Выборка команды SCP насчитывала 42 сверхновые, у группы HZT их было только 16, однако данные для этих звезд были более точными. В итоге результаты обеих групп обладали примерно одинаковой статистической значимостью, причем они были получены практически независимо друг от друга — группы почти не пересекались по составу (за очень редкими исключениями), выборки далеких SN Ia были разными (только две общие звезды), анализ данных производился независимо и разными методами. Хорошее согласие результатов двух групп заставило астрономическое сообщество серьезно воспринять их кажущийся фантастическим результат.¹⁸

Рис. 38 показывает доступные в 1998 году данные двух групп. Разброс точек выглядит очень большим и кажется, что результат не очень надежен. Кроме того, слабым местом открытия являлось то, что потускнение сверхновых с расстоянием можно было объяснить, к примеру, эволюцией их максимальной светимости со временем, а также тем, что на их видимый блеск влияет поглощение пылью в межгалактической среде. Авторы все это прекрасно понимали и в последовавшие годы быстро наращивали наблюдательный материал и проводили разнообразные дополнительные проверки и исследования. Ни наличие пыли, ни возможная эволюция сверхновых, как оказалось, не влияют ощутимым образом на результаты. Кроме того, увеличение числа далеких SN Ia только повышало достоверность существования ускоренного расширения.

Итак, что же было открыто? Как я уже писал, далекие сверхновые оказались более слабыми по сравнению с тем, какими они должны быть во Вселенной с плот-

¹⁸ Один из первооткрывателей, Брайан Шмидт, чье высказывание было процитировано в журнале «Science» в феврале 1998 года, сказал так: «Моя собственная реакция была чем-то между изумлением и ужасом. Изумлением, потому что я просто не ожидал этого результата, а ужасом — от знания того, что в него, вероятно, не поверит большинство астрономов, которые, как и я сам, чрезвычайно скептически относятся к неожиданностям».

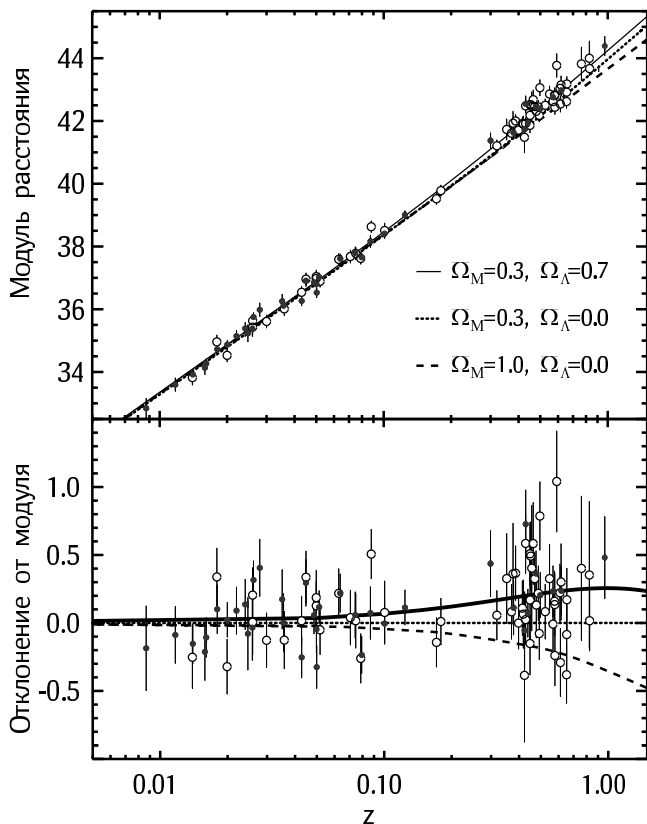


Рис. 38. Объединенные результаты SCP (открытые кружки) и HZT (черные точки) для далеких SNIa. На верхнем рисунке показана зависимость модуля расстояния (разность видимой и абсолютной звездной величин сверхновой в максимуме блеска) от красного смещения. Линиями показаны ожидаемые зависимости для разных космологических моделей. Внизу изображены отклонения модулей расстояния от предсказаний модели пустой Вселенной с $\Omega_m = 0.3$ и с нулевой космологической постоянной. Видно, что данные для далеких SN лежат, в среднем, выше этой теоретической зависимости, изображенной горизонтальной прямой из точек. Сдвиг наблюдательных точек описывается моделью с $\Omega_m = 0.3$ и $\Omega_\Lambda = 0.7$ (непрерывная кривая). (Перлмуттер, Шмидт 2003)

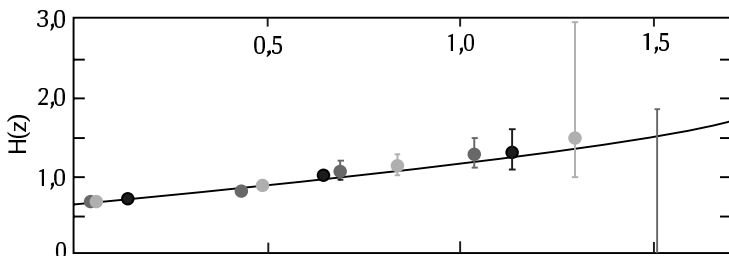


Рис. 39. Эволюция значения постоянной Хаббла по данным о далеких SNIa согласно Райссу и др. (2007). По вертикальной оси отложено нормированное на 100 км/с/Мпк значение постоянной Хаббла, по горизонтальной — красное смещение (числа вдоль верхней горизонтальной оси — значения z). Кружки — результаты измерений, непрерывная кривая — ожидаемая зависимость для модели с $\Omega_m = 0.3$ и $\Omega_\Lambda = 0.7$.

ностью $\Omega \approx 0.3$. Это означало, что они находятся от нас дальше, чем ожидалось. При полной плотности $\Omega \approx 0.3$ Вселенная должна расширяться вечно, причем темп расширения должен постепенно замедляться. Наблюдения показали, что замедление происходит не так сильно, как ожидается для $\Omega \approx 0.3$ и поэтому галактики со сверхновыми оказались от нас заметно дальше.

На рис. 39 показано изменение постоянной Хаббла со временем по данным о далеких сверхновых. Наглядно видно «торможение» Вселенной — при $z \sim 1-1.5$ (то есть 8–9 млрд лет назад) постоянная Хаббла была примерно в два раза больше. Видно также, что открытие ускоренного расширения не означает, что уже сейчас темп расширения Вселенной растет. На самом деле он еще падает, но не так быстро, как ранее ожидалось — замедление расширения Вселенной тормозится и когда-нибудь постоянная Хаббла, действительно, начнет расти.

Простейшей интерпретацией наблюдений являлось предположение о существовании некоей формы энергии (ее стали называть *темная энергия*)¹⁹, «расталкивающей»

¹⁹Не путать с темной материей, обсуждавшейся в п. 2.5!

Вселенную и приводящей к изменению темпа ее расширения. Как следовало из наблюдений, свойства этой субстанции должны быть очень странными. Во-первых, она не сгущается, то есть не собирается в обычные объекты типа галактик и их скоплений, и ее распределение в пространстве, по-видимому, близко к равномерному. Во-вторых, как уже не раз писалось, она заставляет Вселенную расширяться, то есть темная энергия, в отличие от обычной материи, создает не тяготение, а антитяготение, антигравитацию. В-третьих, сколь бы необычным это не выглядело, плотность темной энергии по современным данным практически не зависит от времени (имеется в виду абсолютная плотность, измеренная, скажем, в г/см^3). В-четвертых, в настоящую эпоху вклад темной энергии в полную плотность Вселенной является определяющим — $\Omega_\Lambda \approx 0.7$. Это не всегда было так — плотности обычного вещества и темной материи, в отличие от темной энергии, зависят от времени, и в более ранние эпохи эволюции Вселенной относительный вклад темной энергии был меньше (рис. 40).

Что может представлять собой эта темная энергия? Возможны разные варианты, но, по-видимому, самый простой и естественный — темная энергия представляет собой энергию вакуума. Вакуум, вопреки бытовой точке зрения, это не просто пустота²⁰, а состояние с минимальной возможной энергией, причем эта энергия не обязательно должна быть равна нулю. Если из какого-то объема убрать все частицы и поля, то, согласно законам квантовой механики, на сверхмалых расстояниях этот объем является ареной очень активной деятельности — в нем непрерывно рождаются и исчезают так называемые виртуальные частицы. Энергия этого кипящего «супа» частиц и является энергией вакуума. (Корректно рассчитать

²⁰ Не могу удержаться, чтобы не привести шуточные высказывания знаменитого советского физика Я.И. Померанчука, заметившего, что вакуум не пуст, он полон глубокого физического содержания, и что вся физика — это физика вакуума.

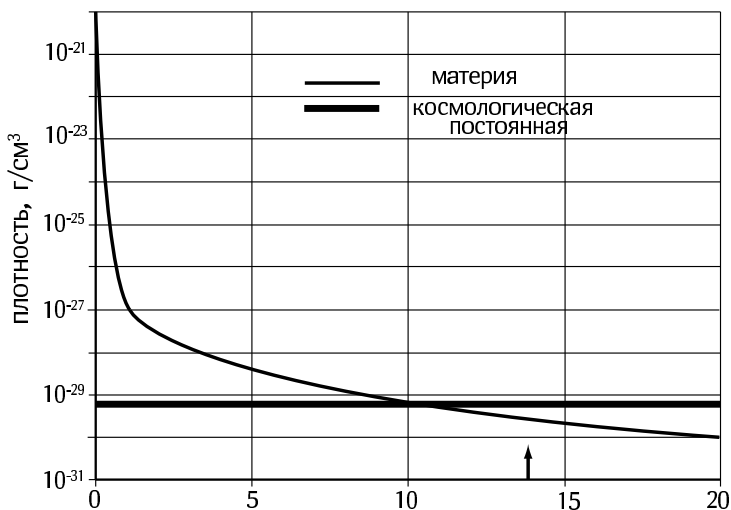


Рис. 40. Зависимость плотности вещества (кривая линия) и темной энергии (горизонтальная прямая) от времени (Краус 2002). Вдоль вертикальной оси отложена плотность в г/см^3 , вдоль горизонтальной — время, прошедшее после Большого взрыва, в миллиардах лет. Стрелочкой указана современная эпоха.

энергию вакуума из общих физических принципов весьма непросто и поэтому полученная чисто астрономическими методами оценка значения Ω_Λ оказалась очень кстати). Свойства вакуума близки к требуемым для темной энергии — его плотность не зависит от времени (она определяется физикой очень малых расстояний и времен), он не сгущивается и, согласно квантовой физике, его давление отрицательно, что и приводит к появлению эффекта антигравитации. Эти особенности вакуума привели к тому, что он часто рассматривается в качестве основного кандидата в темную энергию.

Открытие ускоренного расширения Вселенной, возможное отождествление причины этого ускорения с космическим вакуумом — это, несомненно, эпохальные

достижения, существенно меняющие представления об окружающем нас мире. Однако насколько серьезно можно относиться к этим открытиям? Ведь кажется, что они основываются лишь на нескольких точках, уклоняющихся от ожидаемой прямой на рис. 38. Во-первых, в настоящее время данных уже гораздо больше. Число далеких SN Ia с измеренными кривыми блеска достигает уже нескольких сотен и новые наблюдения лишь подтверждают и уточняют исходные результаты групп SCP и HZT. Во-вторых, как я уже писал в начале этого раздела, и до результатов по сверхновым были наблюдательные и теоретические аргументы в пользу ненулевой космологической постоянной – например, противоречие между оценками возраста Вселенной и возрастом старейших объектов, предсказания теории инфляции. И, наконец, в-третьих, сейчас существует целый ряд новых, независимых от наблюдений SN Ia, тестов, также свидетельствующих об $\Omega_\Lambda > 0$.

Первый из этих аргументов уже упоминался – анализ анизотропии реликтового излучения показывает, что полная плотность нашей Вселенной близка к критической, в то время как плотность всех видов вещества составляет лишь около четверти критической. Этот дисбаланс компенсируется вкладом темной энергии. Еще одна группа свидетельств основывается на наблюдениях крупномасштабного распределения галактик. Так называемые акустические флуктуации, наблюдаемые примерно через 400 000 лет после Большого взрыва в реликтовом излучении (п. 2.4), должны были отпечататься и в распределении окружающих нас галактик на масштабах ~ 100 Мпк. Появление больших, однородных выборок галактик с измеренными красными смещениями позволило относительно недавно (в начале 2000-х годов) действительно обнаружить этот эффект. Его анализ дал возможность независимой оценки плотности вещества во Вселенной и, в сочетании с данными о реликтовом излучении, уточнил параметры темной энергии.

Эффект Сакса–Вольфа (изменение частоты фотона реликтового излучения, движущегося в изменяющемся гравитационном поле) приводит к появлению корреляции между наблюдаемой неоднородностью реликтового излучения и распределением относительно близких ($z \leq 1$) галактик. Если во Вселенной доминирует вещество, этот эффект не проявляется. Если же космологическая постоянная достаточно велика, то она влияет на темп роста крупномасштабных структур (скоплений и сверхскоплений галактик) и приводит к тому, что поле возмущений гравитационного потенциала успеваает измениться за время полета фотона от далекой галактики до нас. Следствием этого должна быть дополнительная анизотропия реликтового фона, зависящая от крупномасштабного распределения вещества в эпоху, когда темная энергия стала динамически важным компонентом Вселенной. Анализ крупномасштабного распределения галактик и радиоисточников подтвердил существование этого эффекта.

Неожиданный подход к изучению темной энергии дают излучающие в рентгеновском диапазоне скопления галактик. Скопления галактик, как обычно пишут, – это самые крупные гравитационно-связанные объекты Вселенной. Они содержат тысячи галактик в пределах нескольких мегапарсеков (напомню, что расстояние от нашей Галактики до туманности Андромеды составляет примерно $2/3$ мегапарсека). Большой вклад в барионную массу скоплений дает горячий газ, являющийся источником сильного рентгеновского излучения. Предположив, что доля газа в скоплениях является постоянной и не зависит от красного смещения (эта доля просто отражает долю барионного вещества во Вселенной), можно получить независимые от красного смещения оценки расстояний до скоплений. Оказалось, что эти оценки согласуются с моделью Вселенной с большим значением космологической постоянной.

Есть и другие свидетельства существования темной энергии – подсчеты далеких скоплений галактик, слабое и сильное гравитационное линзирование и пр. Эти свидетельства следуют из разных, не связанных между собой наблюдательных эффектов. По отдельности к каждому из них можно придаться и придумать другое объяснение, но лишь существование темной энергии единым и, по сути, самым простым образом объясняет весь весьма разнородный комплекс данных. Именно совокупность наблюдательных тестов позволяет считать существование темной энергии надежно установленным фактом. Напомним, что расширение Вселенной и наличие в ней темной материи также подтверждается самыми разными и независимыми свидетельствами (разделы 2.2 и 2.5). Нелишне будет также напомнить, что темная энергия довольно естественным образом возникает и в разнообразных построениях теоретиков – в частности, эта энергия, возможно, представляет собой давно обсуждавшуюся (еще с первой половины XX века) энергию физического вакуума.

Основные участники этой истории – Сол Перлмуттер, Брайан Шмидт и Адам Райсс – стали лауреатами Нобелевской премии по физике за 2011 год с официальной формулировкой «За открытие ускоренного расширения Вселенной с помощью наблюдений далеких сверхновых».

2.7. Портрет Вселенной

Чем более постижимой представляется Вселенная, тем более она кажется бессмысленной.

Стивен Вайнберг

В предыдущих разделах я остановился на наиболее общих наблюдательных основах космологии, к которым можно отнести расширение Вселенной, реликтовое излучение, темную материю, ускоренное расширение. Это, конечно, далеко не все, что можно было обсудить. На-