

ФИЗИКА НАШИХ ДНЕЙ

Темная энергия и всемирное антитяготение

А.Д. Чернин

Всемирное антитяготение — новый физический феномен, открытый в астрономических наблюдениях на расстояниях в 5–8 млрд световых лет. Антитяготение проявляет себя как космическое отталкивание, испытываемое далекими галактиками, причем отталкивание сильнее гравитационного притяжения галактик друг к другу. По этой причине общее космологическое расширение происходит с ускорением. Антитяготение создается не галактиками или какими-либо другими телами природы, а не известной ранее формой энергии/массы, получившей название темной энергии. На долю темной энергии приходится 70–80 % всей энергии/массы наблюдаемой Вселенной. На макроскопическом уровне темная энергия описывается как особого рода непрерывная среда, которая заполняет все пространство мира; эта среда обладает положительной плотностью и отрицательным давлением. Физическая природа темной энергии и ее микроскопическая структура неизвестны — это одна из самых острых проблем фундаментальной науки наших дней.

PACS numbers: 04.50.+h, 12.10.Kt, 95.36.+x, 98.80.–k

DOI: 10.3367/UFNr.0178.200803c.0267

От редактора

Редакция *УФН* получила еще 27 декабря 2006 г. статью А.Д. Чернина "Темная энергия космического вакуума". Нужно заметить, что проблема темной энергии, возникшая на современном уровне около 10 лет назад, принадлежит к числу самых важных и в то же время неясных вопросов современной физики и космологии.

Мы направили статью на отзыв четырем рецензентам, и в полученных рецензиях содержится целый ряд иногда весьма острых критических замечаний. Мы направили эти рецензии автору с просьбой учесть критику и представить переработанный текст статьи. Сейчас (11.12.2007 г.) этот текст получен и публикуется без всяких изменений. Посылать новый текст на рецензии значило бы затянуть обсуждение очень важной проблемы на неопределенное время. Это нецелесообразно. Поэтому, как сказано, новый текст публикуется без изменений, но послан также всем упомянутым рецензентам. И их замечания в отношении нового текста будут опубликованы в *УФН* также без рецензирования.

В.Л. Гинзбург

А.Д. Чернин. Государственный астрономический институт им. П.К. Штернберга, Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, Университетский просп. 13, 119899 Москва, Российская Федерация
Тел. (495) 939-16-22. Факс (495) 932-88-41
E-mail: chernin@sai.msu.ru
Tuorla Observatory, University of Turku, FIN-21500 Finland

Статья поступила 27 декабря 2006 г.,
после доработки 11 декабря 2007 г.

Содержание

1. Введение (267).
 2. Закон всемирного антитяготения (269).
2.1. Вакуум Эйнштейна–Глинера. 2.2. Проблема естественности. 2.3. На ньютоновском языке. 2.4. Второе уравнение Фридмана. 2.5. Момент нулевого тяготения. 2.6. Данные космического аппарата WMAP.
 3. Темная энергия в ближней Вселенной (277).
3.1. Парадокс Хаббла–Сэндиджа. 3.2. Регулярный поток. 3.3. Вблизи Млечного Пути. 3.4. Локальная космология. 3.5. Малый взрыв.
 4. Размер и размерность пространства (284).
4.1. Эйнштейн и Фридман о топологии мира. 4.2. Спектр мощности. 4.3. Пространство Пуанкаре. 4.4. Дополнительные измерения. 4.5. "Истинные" константы и темная энергия.
 5. Внутренняя симметрия в космологии (289).
5.1. Четыре энергии. 5.2. Симметрия. 5.3. Совпадение плотностей. 5.4. Снова иерархия. 5.5. Большие числа. 5.6. Проблема Дикке.
 6. Заключение (297).
- Список литературы (298).

1. Введение

Сила, что движет мирами, — так говорили о тяготении со времен ньютоновских *Начал*, и ничто, казалось, не могло поколебать этого общего убеждения. Но в 1998–1999 гг. выяснилось, что динамикой наблюдаемой Вселенной управляет не тяготение, а совсем иная сила — космическое отталкивание, или антитяготение. Антитяготение действует на разбегающиеся галактики и стремится еще более отдалить их друг от друга; из-за этого расширение Вселенной происходит с ускорением. Ускоренное космологическое расширение было обнаружено в прямых

астрономических наблюдениях на расстояниях в несколько миллиардов световых лет, почти у края видимой Вселенной [1, 2].

Скорости разбегающихся галактик и расстояния до них в расширяющейся Вселенной измеряют уже почти сто лет. Но измерить ускорение галактик впервые удалось лишь десять лет назад в результате длительных систематических наблюдений, проводившихся двумя независимо работавшими группами астрономов, одной из которых руководили Брайан Шмидт и Адам Райсс [1], другую возглавлял Сол Перлматтер [2]. Изучались далекие сверхновые звезды определенного типа (Ia). В максимуме блеска они настолько ярки, что могут быть зарегистрированы на очень больших, по-настоящему космологических расстояниях в несколько сотен и тысяч мегапарсек (1 мегапарсек (Мпк) приблизительно равен 3×10^{24} см). Изучение сверхновых дает возможность узнать, как движутся галактики, в которых эти звезды вспыхивают. Наблюдения велись на самых мощных современных астрономических инструментах — космическом телескопе "Хаббл" и крупнейших наземных рефлекторах. Это позволило обнаружить и измерить тонкий релятивистский эффект, проявляющийся в зависимости видимой яркости источника от его красного смещения. Этот эффект определяется ускорением, с которым движется источник света, и становится заметным только на больших расстояниях, на которых красное смещение (относительное увеличение длины волны в наблюдаемом спектре источника) приближается к единице. Так было обнаружено, что космологическое расширение происходит с положительным ускорением — скорости разбегающихся галактик возрастают со временем.

Ускорение указывает на силу, которая определяет движение тел. Этой силой не может быть притяжение космических тел друг к другу: взаимное тяготение галактик способно лишь тормозить их разбегание. А ускорять это движение может сила противоположного знака — она и называется всемирным антитяготением. Физический источник антитяготения — темная энергия, которая проявляет себя в мире только благодаря своему свойству создавать антитяготение. В остальном она невидима и неуловима: не излучает и не поглощает света, не рассеивает его. По макроскопическим свойствам темная энергия подобна особому рода сплошной среде с положительной плотностью и отрицательным давлением. Что касается физической природы и микроскопической структуры темной энергии, то они остаются полностью неизвестными.

В простейшей (и, как кажется, самой правдоподобной) ее интерпретации темная энергия связывается с космологической постоянной Эйнштейна. Гипотеза об универсальном космическом отталкивании была выдвинута Эйнштейном [3] в 1917 г., когда он впервые применил свою только что созданную общую теорию относительности к задаче о мире как целом.

В подходе к космологии Эйнштейн следовал давней натурфилософской традиции, которая приписывала Вселенной идеальную симметрию в пространстве (однородность и изотропию) и во времени. Симметрия во времени означает, что вечность и неизменность — неотъемлемые атрибуты существования мира. В соответствии с этими общими взглядами Эйнштейн построил теоретическую модель однородного и притом стати-

ческого — вечного и неизменного — мира. Статичность, однако, не вытекала непосредственно из общей теории относительности. Для того чтобы придать это свойство своей космологической модели, Эйнштейну пришлось прибегнуть к дополнительному предположению о существовании в природе всеобщего отталкивания, способного компенсировать и уравновесить всемирное тяготение во Вселенной как целом. Только при таком условии вещество мира, а с ним и вся Вселенная могли находиться в состоянии покоя.

Это предположение потребовало модифицировать уравнения общей теории относительности, добавить в них дополнительное слагаемое. Эйнштейновское антитяготение представлено и описано в уравнениях общей теории относительности всего одной величиной — космологической постоянной Λ , которая всюду и всегда одинакова. Несложно понять, зачем, для какой цели Эйнштейну понадобилось всемирное антитяготение. Труднее представить себе, как, каким путем он смог найти ту простую и естественную форму, в которой он реализовал эту идею. Эйнштейн и сам не мог объяснить этого, хотя и пытался обрисовать в статье [3] "извилистый и неровный путь" рассуждений, который привел его к идее космологической постоянной. Только сейчас мы начинаем по-настоящему понимать значение и глубину его идеи: это было теоретическое предсказание необычайной глубины и смелости.

Через пять лет после Эйнштейна, в 1922 г., А.А. Фридман доказал, что наличие антитяготения не исключает эволюции мира, если только не требовать специально, чтобы между космическим притяжением и отталкиванием всегда существовало строгое равновесие. Фридман построил космологическую модель, которая обладала однородностью и изотропией в пространстве (как у Эйнштейна), но не была статической, — модель расширяющейся Вселенной [4]. Эта модель описывается точными решениями уравнений общей теории относительности и содержит космологическую постоянную в качестве свободного физического параметра. Численное значение константы Λ не вытекает из теории, оно подлежит измерению в специальных космологических наблюдениях.

Теория Фридмана с тем значением постоянной Λ , которое вытекает из последних наблюдательных открытий, очень хорошо описывает глобальные свойства реального мира и полностью согласуется со всем набором современных астрономических сведений. На ее основе строится сегодняшняя "стандартная модель" космологии (в англоязычной литературе называемая Λ CDM cosmology (CDM — от англ. Cold Dark Matter)).

Возвращаясь к предыстории новейших открытий, заметим, что Эйнштейн высоко оценил теорию Фридмана (хотя и не сразу). Сильное впечатление на него произвели также астрономические исследования Э. Хаббла, в которых теория расширяющейся Вселенной нашла — по общему мнению — прямое наблюдательное подтверждение. Но если реальный мир нестатичен, зачем нужна космологическая постоянная? Эйнштейн потерял, похоже, интерес к идее всемирного отталкивания и предложил забыть о космологической постоянной до тех пор, пока в ее пользу не появятся, по его словам, "достаточные эмпирические основания". В нескольких изданиях *Теории поля* [5] Ландау и Лифшица можно прочесть о космологической постоянной: "...нет

никаких настоятельных и убедительных оснований... для такого видоизменения уравнений тяготения". Как говорит В.Л. Гинзбург [6], "Л.Д. Ландау даже слышать не хотел о Λ -члене, но добиться от него причины такой позиции мне не удалось". В те же годы резко против идеи космологической постоянной выступал В. Паули.

В конце 1960-х годов астрономический намек на отличную от нуля и притом положительную космологическую постоянную увидели в некоей особенности распределения квазаров по красному смещению [7]. Потом эти основания отпали, но высказанные тогда общие соображения о возможной роли космологической постоянной и особенно о соответствующих наблюдательных тестах [8, 9] полностью сохраняют свое значение.

Интерес к космологической константе возникал в разные годы в связи с проблемой возраста мира. Очевидно, что Вселенная как целое не должна быть моложе населяющих ее астрономических тел. Между тем по первоначальным (сильно заниженным) оценкам, основанным на данных Хаббла 1930–1940-х годов, возраст мира получался близким к 2 млрд лет. Но это меньше геологического возраста Земли. Позднее возраст мира оценивали уже в 7–9 млрд лет (после исправления систематической ошибки в данных Хаббла). Однако возраст самых старых образований в нашей Галактике — шаровых скоплений звезд — астрономы оценивали, как правило, величиной 12–15 млрд лет. Идея космологической постоянной обещала решение этого тяжелого парадокса (см., например, классические учебники [10–12]). В книге [13], вышедшей в 1988 г. к столетию Фридмана, отмечалось, что антитяготение способно обеспечить нужное значение космологического возраста, если всеобщее отталкивание сильнее собственной гравитации вещества в современной Вселенной.

В стандартной космологической модели, о которой мы упоминали выше, возраст мира принимается равным приблизительно 14 млрд лет. Это следует как из первых данных о темной энергии [1, 2], так и из дальнейших наблюдательных исследований (см. особенно [14, 15]). Тем самым снимается противоречие с оценками возраста самых старых звезд. При этом время жизни Вселенной и другие ее наблюдаемые характеристики оказываются напрямую связанными с темной энергией и ее наблюдаемой плотностью. В стандартной модели плотность темной энергии определяется космологической постоянной (см. раздел 2), и потому эта плотность постоянна во времени и идеально однородна в пространстве. Более того, плотность темной энергии имеет одинаковое значение во всех системах отсчета.

Плотность — главная количественная характеристика темной энергии. Ее величина была оценена в первых же работах [1, 2]. Если взять за меру массу атома водорода, то величина плотности темной энергии соответствует присутствию в каждом кубическом метре пространства примерно трех атомов водорода. Для того чтобы представить себе силу антитяготения, которую способна создать антигравитирующая среда с такой плотностью, вообразим, что два нейтральных атома водорода помещены в пространство, в котором нет ничего кроме темной энергии. На эти атомы действуют две силы: ньютоновская сила их взаимного притяжения и эйнштейновская сила отталкивания. Оказывается, что

антитяготение сильнее тяготения, если расстояние между атомами больше полуметра.

По данным [1, 2] на долю темной энергии приходится примерно 70 % полной плотности мира. Так что темная энергия представляет собой главный вид энергии/массы в наблюдаемой Вселенной. Понятно, что при таких условиях создаваемое темной энергией антитяготение должно доминировать в динамике космологического расширения. В природе существуют еще три вида космической энергии. Одна из них — это темная материя, на которую по тем же данным приходится около 25 % полной плотности мира; как предполагается, она состоит из гипотетических нерелятивистских ("холодных") стабильных элементарных частиц, не участвующих в сильном ядерном взаимодействии. Около 5 % в полную плотность вносит "обычное" вещество, т.е. протоны, нейтроны и электроны, из которых состоят планеты, звезды и другие обычные тела природы; за этой космической энергией закрепилось название "барионы" (хотя электрон и не является тяжелой частицей). Наконец, четвертая космическая энергия — это "излучение", под которым понимаются реликтовые фотоны (а также, возможно, гравитоны); на излучение приходится не более нескольких сотых долей процента полной плотности (в разделе 2.6 эти значения будут немного уточнены).

Современные сведения о возрасте мира и плотностях четырех космических энергий вытекают из всей совокупности наблюдательных исследований, проводимых в последнее десятилетие (особо отметим работы [14–36]). Этот непротиворечивый, как часто говорят, "согласованный" набор данных определенно свидетельствует: открытие антитяготения и темной энергии [1, 2] выдерживает проверку на надежность.

В астрономии и физике наших дней оба новых понятия — антитяготение и темная энергия — постепенно занимают место в одном ряду с самыми фундаментальными понятиями естествознания. Об этом главным образом и пойдет речь в нашей статье. Статья не претендует на полный и равномерный охват всех теоретических и экспериментальных результатов. Везде (кроме специально оговоренных случаев) мы следуем стандартной космологической модели и под темной энергией понимаем антигравитирующую среду, описываемую космологической постоянной Эйнштейна. Много из оставшегося за рамками нашего рассмотрения можно найти в обзорных статьях и книгах [37–73] — как новейших, так и тех, которые стали классическими. Число работ по темной энергии быстро возрастает, литература по этой теме становится уже почти необозримой: в Интернете (на момент, когда пишутся эти строки) имеется примерно 6 430 000 страниц, из которых не менее миллиона, вероятно, заслуживают внимания. Немудрено, что наш список литературы далеко не полон и местами фрагментарен (никто не может обозреть необозримое).

2. Закон всемирного антитяготения

Эйнштейн не оставил физической интерпретации космологической постоянной. Можно лишь догадываться, что он рассматривал ее скорее как "геометрический", чем "материальный" фактор, поскольку Λ была помещена им в левую, "геометрическую" часть уравнений общей

теории относительности. Тогда постоянная Λ означает наличие неустраняемой кривизны пространства-времени, причем кривизна такой природы никак не связана с присутствием или отсутствием в пространстве какой-либо массы/энергии. Геометрическая интерпретация не получила в дальнейшем особого развития (см., впрочем, раздел 4).

2.1. Вакуум Эйнштейна – Глинера

В середине 1960-х годов Э.Б. Глинер предложил "материальную" интерпретацию космологической постоянной; он показал [74], что идея Эйнштейна эквивалентна предположению о существовании во Вселенной идеально однородной макроскопической среды с плотностью

$$\rho_V = \frac{\Lambda}{8\pi G}, \quad (1)$$

где G — ньютоновская гравитационная постоянная; скорость света здесь и далее считается равной единице, $c = 1$. Плотность (1) не изменяется во времени и пространстве и остается одной и той же во всех системах отсчета.

Среда с плотностью (1) обладает отрицательным давлением p_V , и ее уравнение состояния (т.е. связь давления с плотностью) таково:

$$p_V = -\rho_V. \quad (2)$$

Среда со столь необычным уравнением состояния не похожа ни на какие "нормальные" жидкости или газы. Следуя Глинеру [74], перечислим ее важнейшие особые свойства.

1. Эта среда не может служить системой отсчета. Если имеются две системы отсчета, движущиеся относительно друг друга с некоторой ненулевой скоростью, то среда с уравнением состояния (2) будет сопутствовать и той и другой. Следовательно, движение и покой относительно такой среды неразличимы. Но в этом состоит (см. [75]) основное механическое свойство вакуума. Так что среда, описываемая уравнениями (1), (2), является вакуумом.

2. Среда с уравнением состояния (2) является неизменной и "вечной". Ее энергия представляет собой абсолютный и постоянный во времени минимум энергии, содержащейся в мировом пространстве. Это еще одно обязательное свойство вакуума.

3. Среда с давлением, определяемым уравнением (2), создает не тяготение, а антитяготение. Дело в том, что согласно общей теории относительности тяготение определяется не только плотностью среды (как это предполагается в ньютоновской теории), но и ее давлением. При этом "эффективная гравитирующая плотность" в общем случае выражается в виде суммы двух слагаемых:

$$\rho_{\text{eff}} = \rho + 3p. \quad (3)$$

Заметим, что в правой части формулы (3) коэффициент 1 перед плотностью и коэффициент 3 перед давлением возникают из-за того, что время одномерно, а пространство трехмерно.

При уравнении состояния (2) сумма в правой части (3) оказывается отрицательной:

$$\rho_{\text{eff}} = \rho_V + 3p_V = -2\rho_V < 0. \quad (4)$$

Отрицательная эффективная плотность означает "отрицательное" тяготение. В отличие от всемирного тяготе-

ния всемирное антитяготение стремится не сблизить тела, а, напротив, отдалить их друг от друга. Если поместить в вакуум две пробные частицы, в начальный момент покоящиеся относительно друг друга, то вакуум заставит их затем удаляться друг от друга.

4. Говоря на языке ньютоновской физики, вакуум создает силу, но сам не подвержен (как макроскопическая среда) воздействию ни внешних сил тяготения, ни собственного антитяготения. В физике различают, как известно, три массы: активная гравитационная масса, т.е. масса, создающая тяготение; пассивная гравитационная масса, т.е. масса, воспринимающая тяготение, "чувствующая" его; и инертная масса, которая стоит в левой части ньютоновского уравнения движения. Этими тремя видами массы обладают все объекты природы, все тела и энергии, включая вакуум. Эффективная гравитирующая плотность, о которой только что было сказано, — это плотность активной гравитационной массы. Для любой однородной среды плотность пассивной гравитационной массы дается соотношением $\rho_{\text{pass}} = \rho + p$. У вакуума эта величина обращается в нуль: $\rho_{\text{pass}} = \rho_V + p_V = 0$. Именно по этой причине вакуум не чувствует ни внешнего, ни собственного тяготения. Это тот случай — единственный в физике, — когда действие не сопровождается противодействием. В соответствии с принципом эквивалентности, на котором строится общая теория относительности, инертная масса (ее плотность дается формулой $\rho_{\text{in}} = \rho + p$) вакуума тоже равна нулю.

5. Поскольку плотность темной энергии — постоянная величина, вакуум следует представлять себе как среду, равномерно заполняющую пространство во всех масштабах — от космологических до сколь угодно малых. Точнее, в области малых масштабов мы имеем право говорить лишь о долях миллиметра, но не меньше, так как сама теория тяготения с ее законом обратных квадратов проверена экспериментально только до субмиллиметровых расстояний. С хорошим запасом надежности можно считать, что вакуум существует и является строго однородным, во всяком случае вплоть до малых масштабов порядка сантиметра. Погруженные в темную энергию тела (по крайней мере тела макроскопических размеров) не вытесняют ее из объемов, которые они занимают, — плотность темной энергии одинакова и внутри, и вне тел.

Такое истолкование космологической постоянной (встреченное, между прочим, в штатки 40 лет назад) становится сейчас общепринятым и скоро, похоже, превратится в общее место. Далее для определенности мы будем говорить о космической среде с плотностью (1) и уравнением состояния (2) как о вакууме Эйнштейна – Глинера (ЭГ-вакуум).

Имеются основания считать, что открытая астрономами [1, 2] темная энергия — это и есть энергия ЭГ-вакуума. Окончательное доказательство еще предстоит найти, но совокупность всех наблюдательных данных о темной энергии, полученных начиная с 1998–1999 гг., полностью согласуется с такой возможностью.

Каковы альтернативы ЭГ-вакууму? Хотя обсуждаемые в литературе альтернативные гипотезы предполагают отход от эйнштейновской идеи космологической постоянной, тем не менее в них сохраняется макроскопическое описание темной энергии как среды с отрицательным давлением. Однако связь давления с плотностью

предполагается иной, чем в уравнении (2). Одной из таких гипотез является, например, популярная гипотеза "квинтэссенции" [76–85]. Под последней понимают невакуумную среду, для которой отношение давления к плотности является постоянным и большим минус единицы (например, $p/\rho = -2/3$). При этом эффективная гравитирующая плотность может быть отрицательной — как и в случае ЭГ-вакуума. Такая среда нестатична: она изменяется со временем и ее плотность должна убывать в ходе космологического расширения. Плотность квинтэссенции, вообще говоря, неоднородна в пространстве. Преимущества этой интерпретации с самого начала вызвали сомнения [86]. Еще одна гипотеза трактует темную энергию как "фантомную энергию", для которой $p/\rho < -1$ [87–89]. Рассматриваются также среды, в которых отношение давления к плотности не является постоянной величиной. Пример такого рода — гипотеза о темной энергии как "газе Чаплыгина" [90–92]. Последний имеет уравнение состояния $p = -C/\rho$, где C — положительная константа.

Нужно сказать, что возрастающая точность космологических наблюдений постепенно сужает простор для альтернативных толкований темной энергии. По последним наблюдательным данным [15, 21, 25] отношение давления темной энергии к ее плотности составляет

$$w \equiv \frac{p}{\rho} = -0,97 \pm 0,09. \quad (5)$$

ЭГ-вакуум (2) согласуется с этим ограничением, а, например, квинтэссенция с величиной $w = -2/3$ ему не удовлетворяет; для нее остается довольно узкое окно: $-1 < w < -0,89$. Иногда считают, что альтернативные варианты могут сохранять привлекательность до тех пор, пока соответствующее им наблюдательное окно не окажется менее чем 1 %.

Как уже отмечалось в разделе 1, современная стандартная космологическая модель (Λ CDM) включает в себя идею космологической постоянной. В модели Λ CDM плотность темной энергии дается соотношением (1). При этом в стандартной модели так или иначе проявляются все описанные выше свойства ЭГ-вакуума.

2.2. Проблема естественности

Если макроскопическую интерпретацию (и понимание) темной энергии как вакуума с уравнением состояния (2) можно считать удовлетворительной, то вопрос о микроскопической структуре ЭГ-вакуума остается полностью открытым. Неизвестно, какие микроскопические объекты являются "носителями" его темной энергии. Неясно даже, стоит ли вообще в этом случае говорить о каких бы то ни было носителях или требуется привлечь другие, не известные пока физические понятия и представления. Но поскольку это вакуум, то первый вопрос, который возникает, таков: тождествен ли ЭГ-вакуум давно известному в физике вакууму квантовых полей (К-вакууму)?

О вакууме как наинизшем энергетическом состоянии квантовых полей говорили начиная еще с конца 1920-х годов: его существование вытекает из принципа неопределенности Гейзенберга. Как известно (см., например, [93]), энергия К-вакуума складывается из энергии "нулевых" квантовых колебаний. Формально эта энергия в стандартной квантовой механике является бесконечной. Реально же ее значение остается неопределенным, что,

однако, не служит препятствием для теоретического рассмотрения и интерпретации лабораторных экспериментов. Дело в том, что во всех процессах и взаимодействиях (кроме гравитационного) физические эффекты зависят не от "полного" значения энергии, а только от разности энергий в разных областях пространства и/или в разные моменты времени. Нет сомнений в том, что К-вакуум реально существует: именно в нем разыгрываются взаимодействия элементарных частиц и его присутствие непосредственно проявляется экспериментально, в частности, в лэмбовском сдвиге спектральных линий атомов и эффекте Казимира (см., например, [94]).

Отметим, что до появления работ Глинера макроскопические свойства К-вакуума как непрерывной среды и его уравнение состояния не привлекали, похоже, внимания теоретиков. Тем не менее Г.А. Гамова, а также В. Паули в конце 1920-х — начале 1930-х годов волновала проблема гравитационных эффектов К-вакуума. Гамов не раз говорил, что космологические наблюдения не допускают бесконечных значений плотности К-вакуума. Эта плотность явно ограничена сверху — иначе Вселенная уже давно бы сколлапсировала.

В 1967 г. Я.Б. Зельдович [95] (см. также [38, 39]) выдвинул предположение о том, что сумма вакуумных энергий (формально бесконечных) всех полей и частиц могла бы каким-то образом обеспечить конечное и притом малое значение плотности К-вакуума. Учтывалось, что вакуум фермионов и вакуум бозонов имеют разные знаки энергии и они в принципе могли бы полностью погасить друг друга, если в природе имеется строгая симметрия между бозонами и фермионами (которая в дальнейшем получила название суперсимметрии). Тогда в итоге получится нулевая суммарная плотность К-вакуума всех полей. Но такая симметрия не обязательно должна быть абсолютно строгой, она может быть слабо нарушенной. Поэтому компенсация энергий не обязательно будет полной и в результате возникает неисчезающая малая разность двух вакуумных энергий, каждая из которых формально бесконечна (см. также [43]). В последнем случае возможно, по мысли Зельдовича, отождествление двух вакуумов — квантового и того, который описывается космологической постоянной. Эту исключительно привлекательную идею до сих пор не удалось ни доказать, ни опровергнуть.

Поскольку речь идет о космологических явлениях, в рассуждениях о природе темной энергии не обойтись без учета тяготения. Только тяготение — в отличие от всех других физических взаимодействий — чувствует всю энергию целиком, а не ее различия в разных областях пространства или в разные моменты времени. До тех пор, пока тяготение не принимается во внимание, невозможно говорить о том, равна или не равна нулю та или иная энергия: нуль энергии выбирается произвольно, а понятие "абсолютный нуль" просто не имеет смысла. Напротив, когда тяготение включено в рассмотрение, нуль энергии приобретает абсолютный смысл, и лишь в этом случае энергия квантовых нулевых колебаний получает определенное значение, которое ей и надлежит иметь в космологии.

Рассуждая последовательно в этом направлении, можно представить себе, что вакуумное состояние физических полей, в котором квантовые эффекты и эффекты тяготения могли бы действовать с равной силой, должно

описываться характерными комбинациями трех фундаментальных физических констант: скорости света c (представляющей релятивизм), постоянной Планка \hbar (квантовая физика) и гравитационной постоянной G (тяготение). Если это так, то "естественным" значением для плотности К-вакуума должна являться давно известная в физике планковская плотность — единственная комбинация указанных трех констант, имеющая нужную размерность:

$$\rho_P = \frac{c^5}{(8\pi G/3)^2 \hbar}. \quad (6)$$

Планковская плотность имеет порядок величины $\sim 10^{91}$ г см⁻³, что на 120 с лишним порядков выше реально наблюдаемой плотности темной энергии. Ясно, что последняя — верхний предел для плотности любых возможных вакуумов. Этот разрыв порядков рассматривают как "проблему естественности" в теоретической физике [41, 96].

Проблема естественности — суровое испытание для всей фундаментальной теории. Если "естественное" для фундаментальной теории на деле оказывается нелепым, то она подлежит пересмотру. Что же в ней должно быть изменено? Ясного ответа на этот вопрос пока нет. И, как многие считают, ответ вряд ли может появиться до того, как удастся по-настоящему понять, каким образом тяготение может быть приведено в соответствие с квантовой физикой. Квантовой теории тяготения до сих пор не существует; не все согласны даже с тем, что нелинейную теорию тяготения, т.е. общую теорию относительности, вообще нужно или можно квантовать в обычном стандартном смысле (см., например, работы [97, 98] и цитируемую там литературу). Решить все вопросы такого рода обещает теория струн, которая задумана как раз для того, чтобы соединить гравитацию со всей остальной физикой и тогда уже объяснить все на свете.

Но пока этого не сделано, не стоит ли поискать — пусть просто комбинаторным путем, без особой логики, — подходящую формулу, взамен (6), для того чтобы выразить плотность вакуума через фундаментальные микроскопические константы? Попытки такого рода, предпринятые в свое время Зельдовичем [39, 96], ему самому казались не слишком удачными. Тем более интересным представляется недавнее предложение Н. Аркани-Хамеда и его коллег (см. [99] и цитируемые там статьи): их формула проста и она дает (впервые?) по крайней мере нужное численное значение плотности темной энергии:

$$\rho_V \sim \left(\frac{M_{EW}}{M_P} \right)^8 \rho_P. \quad (7)$$

Здесь $M_P = [\hbar/(8\pi G/3)]^{1/2} \sim 10^{-6}$ г $\sim 10^{18}$ ГэВ — планковская ("редуцированная") масса, $M_{EW} \sim 10^3$ ГэВ ~ 1 ТэВ — характерная энергия электрослабого взаимодействия. Как легко видеть, малое отношение двух характерных масс/энергий, возведенное в некоторую степень, сокращает планковскую плотность как раз на нужное число порядков (степень в (7), правда, неприлично высоковата...).

Формула (7) не вытекает, конечно, ни из какой фундаментальной теории; за нею, однако, стоит давно

уже обсуждаемая идея о том, что электрослабой энергии M_{EW} принадлежит, возможно, центральное место во всей фундаментальной физике [93]. Так это или нет предстоит в конечном счете проверить в эксперименте; считается, что подобная возможность появится в скором времени, когда (не исключено, что уже в текущем 2008 г.) в ЦЕРНе начнутся исследования на Большом адронном коллайдере (LHC), где частицы будут иметь энергию ≈ 10 ТэВ.

Как бы то ни было, соотношение (7) — удачная комбинация всего только двух универсальных энергий, и если это не просто счастливая арифметическая случайность, то формула (7) означает, что физическая природа темной энергии определяется взаимодействием тяготения (представляемого планковской массой) и электрослабых сил. Но что это за процесс, где и как он разворачивается? Каковы в этом случае ожидаемые экспериментальные тесты и наблюдательные проявления в космологии? Обо всем этом пока практически ничего не известно (см., впрочем, раздел 5).

Интересно отметить, что среди активно обсуждаемых кандидатов на роль "темных частиц", носителей темной материи, особенно привлекательными представляются гипотетические элементарные частицы, получившие название WIMPs (Weakly Interacting Massive Particles), которым обычно приписывается большая масса, сравнимая с электрослабой массой M_{EW} . О таких частицах говорили задолго до того, как появилась формула (7). Идея WIMPs в сочетании с формулой (7) указывает на возможную связь между темной материей и темной энергией. Если такая связь существует, то тогда весь "темный сектор" космологии определяется двумя и только двумя фундаментальными физическими константами — M_P и M_{EW} . К вопросу о связях между космическими энергиями мы вернемся в разделе 5.

2.3. На ньютоновском языке

Хотя эйнштейновское антитяготение, вошедшее в физику вместе с общей теорией относительности, представляет собой существование релятивистский феномен, его можно простым образом описать на языке ньютоновской классической механики. Такую возможность дает фридмановская космологическая теория, о которой давно известно [100], что ее основное физическое содержание может быть изложено самым простым образом в классических понятиях. Исключительно важно, что при этом математические формулы остаются в точности теми же, что у Фридмана. Меняется только их интерпретация; вернее, вещи получают новые имена, но сами они и связи между ними остаются теми же, что и в релятивистской науке.

Рассматриваемые в ньютоновском духе результаты Фридмана, касающиеся космологической динамики, вытекают из классических законов сохранения [100]. Это прежде всего закон сохранения механической энергии: соответствующее соотношение находится из общей теории относительности, но имеет в точности тот же вид и смысл, что и в ньютоновской механике. В теории Фридмана рассматривается однородная самогравитирующая среда, состоящая из частиц, которые разбегаются, так что все расстояния между частицами увеличиваются со временем по одному и тому же закону. При этом полная механическая энергия E каждой частицы сохраняется. В реальности частицей может считаться, например, галактика (или даже целое скопление галак-

тик), которая участвует в общем космологическом расширении и удаляется от некоего произвольно выбранного центра (например, от нас) со скоростью V . Кинетическая энергия движения частицы как целого $K = V^2/2$, а потенциальная энергия $U = -GM/R$, где $R(t)$ — расстояние частицы от центра, M — полная масса внутри сферы радиусом R (энергии здесь даны в расчете на единицу массы частицы). Так как в модели Фридмана присутствует космологическая постоянная Λ , то, говоря современным языком, предполагается, что частицы погружены в ЭГ-вакуум с постоянной плотностью $\rho_V = \Lambda/(8\pi G)$ и эта плотность вносит вклад в полную массу M . Что же касается закона сохранения механической энергии частицы, то он имеет вполне классический вид:

$$E = K + U. \quad (8)$$

Заметим, что потенциальная энергия U выглядит так, как будто за пределами сферы радиусом R ничего — ни вещества, ни вакуума с ненулевой энергией — не существует. Это означает, что потенциальная энергия частицы (а с нею и действующая на нее сила (см. ниже)) определяется только "внутренней" массой M , а "внешнее" распределение массы на расстояниях, больших R , никакого влияния на движение частицы не оказывает — неважно, простирается ли оно неограниченно далеко, вплоть до бесконечности, или является ограниченным в пространстве.

Известно, что еще Ньютон предпринял попытку поставить задачу о силах тяготения, создаваемых бесконечным однородным распределением вещества. Однако ни Ньютон, ни его последователи до Эйнштейна и Фридмана не преуспели в этом; на их пути всякий раз возникали непреодолимые парадоксы. И это понятно: обосновать правильный подход к задаче в рамках ньютоновской теории принципиально невозможно.

С другой стороны, та постановка задачи, которую подсказывает релятивистская теория, не вызывает сопротивления и кажется естественной также и с точки зрения классической физики. Действительно, главное в этом подходе — возможность устранить бесконечности и ограничиться рассмотрением конечного сферического объема, мысленно вырезанного из бесконечного объема однородного распределения вещества. Что касается влияния внешних однородно распределенных масс на движение внутри сферы с данным конечным радиусом, то, разбираясь с этим, сначала следует рассмотреть внешний сферический слой с конечной толщиной. Легко убедиться (прямым подсчетом или по теореме Гаусса) в том, что вследствие симметрии всех направлений слой не создает никакой силы для частицы, расположенной под ним. Казалось бы, можно мысленно наращивать слой за слоем вплоть до бесконечности. Но нет, как только дело доходит до операций с бесконечностями, рассуждение приходится остановить: ни простой подсчет, ни теорема Гаусса здесь впрямую не проходят; именно поэтому в классической теории и возникали парадоксы. А в общей теории относительности соотношение (8) получается "само собой" — непосредственным интегрированием уравнений для однородного распределения энергии, притом без всяких дополнительных рассуждений, оговорок или специальных обоснований.

Масса M , входящая в выражение для потенциальной энергии, включает в себя как массу гравитирующего

вещества (барионы плюс темная материя), так и массу ЭГ-вакуума внутри расширяющейся сферы, содержащей данные частицы:

$$M(R) = \frac{4\pi}{3}(\rho_M + \rho_V)R^3. \quad (9)$$

Здесь ρ_M — плотность вещества, ρ_V , — как и выше, плотность вакуума.

Полная масса вещества M_M внутри объема, занятого данными частицами, не изменяется, очевидно, при расширении "сопутствующего" частицам объема. При этом плотность вещества убывает с возрастанием радиуса по закону $\rho_M \propto R(t)^{-3}$. Так как плотность вакуума — величина постоянная, полная масса вакуума в том же объеме возрастает при расширении объема:

$$M_V = \frac{4\pi}{3} \rho_V R^3 \propto R^3. \quad (10)$$

Если учесть еще, что скорость движения частицы V является первой производной от расстояния по времени, $\dot{R}(t)$, то закон сохранения механической энергии (8) примет вид

$$E = \frac{1}{2} \dot{R}^2 - \frac{4\pi G}{3}(\rho_M + \rho_V)R^2. \quad (11)$$

Записанный в такой форме закон сохранения механической энергии в точности эквивалентен одному из двух основных уравнений космологии, которое называют "первым" (или динамическим) уравнением Фридмана.

Продолжая рассуждение на языке ньютоновской теории, можно от закона сохранения механической энергии перейти — стандартным образом — к силам, которые действуют на данную частицу. Для этого нужно продифференцировать уравнение (11) по времени. В результате найдем

$$\ddot{R}(t) = -\frac{GM_M}{R^2} + 2\frac{4\pi G}{3}\rho_V R. \quad (12)$$

В левой части (12) стоит ускорение частицы, а в правой — две силы (в расчете на единицу массы): ньютоновская сила тяготения, создаваемая веществом и описываемая законом обратных квадратов,

$$F_N = -\frac{GM}{R^2}, \quad (13)$$

и создаваемая ЭГ-вакуумом эйнштейновская сила анти-тяготения

$$F_E = +2\rho_V \frac{4\pi G}{3} R. \quad (14)$$

Сила антитяготения имеет знак, противоположный знаку ньютоновской силы, и не уменьшается с увеличением расстояния, а линейно возрастает. Соотношение (14) — это и есть эйнштейновский закон всемирного антитяготения.

Как видно из (11), релятивистский гравитационный эффект давления (см. уравнение (3)) появляется здесь "сам собой", и именно он придает знак плюс силе антитяготения. Хотя темная энергия — сугубо релятивистский объект, тем не менее ньютоновский подход дает точное (как в релятивистском случае) уравнение для эффективной силы.

Так как сила тяготения убывает, а сила антитяготения возрастает с увеличением расстояния R , тяготение преобладает на малых расстояниях, а антитяготение — на больших. В космологии R — это расстояние между данными удаляющимися друг от друга частицами, и оно является возрастающей функцией времени. Поэтому малое R соответствует (для данных частиц) ранним космологическим временам, а большое — поздним. При малых временах сильнее тяготение, а при больших — антитяготение.

В бесконечном будущем сила антитяготения безраздельно царит в мире и динамика космологического расширения контролируется лишь одной эйнштейновской силой (14) — это то, что в космологии называют миром де Ситтера. В таком предельном случае галактики и их системы оказываются "пробными частицами": их взаимное тяготение пренебрежимо мало по сравнению с антитяготением, создаваемым вакуумом. Легко видеть, что при этом разбегание галактик происходит по экспоненциальному закону:

$$R \propto \exp \frac{t}{t_V}, \quad (15)$$

где t_V — характерное время расширения, определяемое лишь плотностью вакуума,

$$t_V = \left(\frac{8\pi G}{3} \rho_V \right)^{-1/2}.$$

При экспоненциальном законе разбегания галактик (15) их относительные скорости в мире де Ситтера пропорциональны взаимным расстояниям с постоянным коэффициентом пропорциональности:

$$V \equiv \dot{R} = H_V R, \quad H_V = \frac{1}{t_V}. \quad (16)$$

Соотношение (16), если его применять к фиксированному моменту времени, означает, что наблюдаемая скорость взаимного удаления двух частиц должна быть пропорциональна расстоянию между ними.

Задача о движении пробных частиц на однородном и постоянном во времени фоне вакуума (описываемого космологической постоянной) была решена еще до Фридмана — ею занимался В. де Ситтер, а впоследствии Г. Вейль; тогда впервые в явном виде появился линейный закон скорости (16) с постоянным коэффициентом H_V . В 1929 г. закон прямой пропорциональности между скоростью и расстоянием был найден Э. Хабблом по наблюдениям за удаляющимися от нас галактиками: $V = H_0 R$, где H_0 — наблюдаемая величина, называемая постоянной Хаббла.

С открытием темной энергии и ее истолкованием в духе ЭГ-вакуума выясняется, что современная Вселенная находится в динамическом состоянии, которое не слишком далеко от асимптотики, описываемой формулами (15), (16). Это и неудивительно, если учесть, что на темную энергию приходится подавляющая доля (70 %, а возможно и 80 % (см. раздел 2.6)) всей энергии современной Вселенной. Эффект антитяготения усиливается (удваивается) еще и благодаря тому обстоятельству, что эффективная гравитирующая плотность темной энергии выражается в виде $-2\rho_V$ (см. соотношения (3), (4)). По этой причине стоящая в соотношении (16)

"универсальная постоянная Хаббла" H_V приобретает в космологии наблюдаемой Вселенной особую роль (см. также раздел 3). Количественная оценка по измеренному значению плотности темной энергии (см. раздел 1 и раздел 2.6) приводит к величине (в принятых в космологии единицах $100 \text{ км с}^{-1} \text{ Мпк}^{-1}$):

$$h_V = \frac{H_V}{100} = \left(\frac{8\pi G}{3} \rho_V \right)^{1/2} \approx 0,60 - 0,64. \quad (17)$$

Последняя величина не так уж далека от значения постоянной Хаббла $h_0 = H_0/100 = 0,72 \pm 0,04$, определяемой по глобальным космологическим наблюдениям [14, 15], и особенно близка к сообщаемому А. Сэндиджем и др. [101] наблюдаемому значению $h_S = 0,623 \pm 0,063$, найденному для постоянной Хаббла в интервале расстояний 4–200 Мпк.

2.4. "Термодинамическое" уравнение Фридмана

Главная отличительная черта ЭГ-вакуума как макроскопической среды — его уравнение состояния (2), из-за которого собственно и возникает эффект антитяготения. Но откуда это уравнение состояния известно?

Если придерживаться, как и выше, рамок классической физики, ответ на этот вопрос можно найти, воспользовавшись известным термодинамическим тождеством

$$d\mathcal{E} = T dS - p d\mathcal{V}, \quad (18)$$

где $\mathcal{E} = \rho\mathcal{V}$ — полная внутренняя энергия среды, содержащаяся в сопутствующем данным частицам объеме \mathcal{V} ; величины T, S, p, ρ — соответственно температура среды, ее энтропия, давление и плотность. Для космологического расширения условие адиабатичности хорошо выполняется начиная с самых ранних этапов существования Вселенной [10]. Поэтому в уравнении (18) можно положить $dS = 0$ и применять это уравнение независимо к каждой из четырех энергий (барионам, темной материи, излучению и темной энергии) по отдельности.

В случае темной энергии ЭГ-вакуума нужно следовать его "механическому" определению как среды с постоянной во времени и пространстве плотностью в любой системе отсчета. При этом $\mathcal{E} = \rho_V \mathcal{V}$, откуда $d\mathcal{E} = \rho_V d\mathcal{V}$. Но тогда из уравнения (18) немедленно следует, что $p_V = -\rho_V$. Так — просто, как мы видим, — можно найти уравнение состояния вакуума (2).

Термодинамическое тождество (18), которое обычно называют законом сохранения внутренней энергии, вытекает из общей теории относительности, когда выполнено условие адиабатичности $dS = 0$. В космологии тождество (18) представляет собой "второе" (или термодинамическое) уравнение Фридмана и вместе с "первым" уравнением (11) составляет математическую основу всей динамики расширяющейся Вселенной. Можно сказать, что фридмановская космология в ньютоновской интерпретации строится на двух законах сохранения — законе сохранения механической энергии и законе сохранения внутренней энергии.

2.5. Момент нулевого тяготения

В первой релятивистской космологической модели — построенной Эйнштейном статической модели мира [3] — существовал неизменный во времени баланс тяготе-

ния и антитяготения. На ньютоновском языке сил притяжения (13) и отталкивания (14) этот баланс выражается уравнением $F_N + F_E = 0$. Из равенства нулю суммы сил вытекает статичность мира. При этом плотности вещества и вакуума связаны простым и неизменным во времени соотношением:

$$\rho_M = 2\rho_V. \quad (19)$$

В реальном расширяющемся мире, который описывается моделью Фридмана, баланс сил тоже возможен и он также описывается тем же соотношением плотностей (19). Но этот баланс существует не вечно, а всего один миг.

Так как плотность вакуума постоянна, а плотность нерелятивистского вещества (темная материя и барионы) убывает из-за космологического расширения, $\rho_M \propto R^{-3}$, уравнение (19) выполняется только в тот момент, когда изначально высокая плотность вещества понизится в ходе расширения до значения $2\rho_V$. В этот момент ускорение космологического расширения обращается в нуль, а скорость расширения проходит через минимум. После этого ускорение из отрицательного становится положительным и скорость начинает возрастать.

Можно ли определить момент, когда тяготение становится нулевым, по космологическим наблюдениям? Да, если удастся проследить за поведением ускорения во времени и найти момент смены его знака. В наблюдениях сравнительно нетрудно измерить скорости разбегания галактик. Их находят по красному смещению в спектрах галактик, которое возникает при распространении света в расширяющейся Вселенной (в приближении скоростей, не слишком близких к "скорости света в вакууме" c , оно описывается как эффект Доплера). Красным смещением называют и само это явление, и (как мы уже упомянули в разделе 1) характеризующую его величину $z = (\lambda - \lambda_0)/\lambda_0$, где λ — регистрируемая длина волны данной спектральной линии, λ_0 — длина волны той же линии, известная по лабораторным измерениям. Если скорости малы по сравнению со скоростью света, то связь между скоростью удаления и красным смещением проста: $V \approx z$. (Напомним, что "скорость света в вакууме" считается в настоящей статье равной единице, так что скорость галактики дается в долях скорости света c .) В 1910–1920-е годы измеренные в наблюдениях Слайфера и Хаббла значения красного смещения удаляющихся галактик не превышали величины 0,03, так что такое простейшее приближение являлось вполне оправданным. В этом приближении и был тогда найден эмпирический закон Хаббла, устанавливающий линейную зависимость скорости от расстояния. Красное смещение используется также в космологии как мера времени: чем больше z , тем больше расстояние и, следовательно, тем глубже в историю мира проникают астрономические наблюдения.

Однако закон Хаббла ничего не говорит об ускорении: приближение, в котором он справедлив, к ускорению не чувствительно. Лишь для не малых красных смещений связь между расстоянием и красным смещением зависит не только от скорости, но и от ускорения — первой производной от скорости по времени. Если в наблюдениях удастся заметить отклонение от линейного закона $V = z = HR$, то появляется возможность

по величине и знаку этого отклонения судить об ускорении. Допустим, обнаружилось отклонение в сторону увеличения расстояния при заданном z ; тогда ускорение положительно. При отклонении в сторону уменьшения расстояний ускорение отрицательно. Расстояния оценивают по яркости источника. Яркость, очевидно, тем слабее, чем дальше источник. Если яркость оказалась меньше, чем при оценке по закону Хаббла, то, значит, при прочих равных условиях, расстояние больше, чем ожидалось. Но отклонению расстояния в сторону его увеличения соответствует, согласно только что сказанному, положительное ускорение. Поиск этого эффекта привел наблюдателей в конечном итоге к открытию антитяготения [1, 2].

Систематические наблюдения были начаты еще в 1988 г. по программе Supernova Cosmology Project. Среди участников этого проекта преобладали исследователи, пришедшие в астрофизику из физики, так что эту группу, руководимую С. Перлматтером, для краткости называют "физиками". Вскоре в соревнование с "физиками" вступила группа "астрономов", руководимая (с 1996 г.) Б. Шмидтом и А. Райссом; ее название — High- z Supernova Search Team. Стратегия и методы наблюдений у обеих групп были сходными; обе группы использовали космический телескоп "Хаббл" (Hubble Space Telescope) и крупнейшие наземные инструменты, включая мощнейший 10-метровый телескоп "Кекк" (Keck) на Гавайях.

Обе группы наблюдали вспышки сверхновых звезд на красных смещениях, приближающихся к единице. Яркость сверхновой в максимуме блеска очень высока, так что в течение нескольких дней или недель она излучает столько света, сколько дает целая галактика, а то и больше. Значит, сверхновые могут быть видны на больших расстояниях — именно там и следует ожидать заметных отклонений от закона Хаббла. Сверхновые подразделяют по характеру их спектров на два типа. Сверхновые с яркими линиями водорода относят к типу II, сверхновые с недостатком водорода — к типу I. Сверхновые типа I, как правило, ярче. Их подразделяют в свою очередь на подтипы Ia и Ib: в спектрах первых имеются четкие линии поглощения кремния, а в спектрах вторых — линии гелия. Считается, что сверхновые типа Ia возникают при катастрофическом термоядерном взрыве углеродно-кислородного белого карлика. Другие типы сверхновых связаны с гравитационным коллапсом ядра сверхмассивной звезды.

В космологических исследованиях используются сверхновые типа Ia. Как заметил более тридцати лет назад Ю.П. Псковский [102], они подходят для космологических наблюдений, по-видимому, лучше других сверхновых. Во-первых, сверхновые типа Ia являются очень яркими (их звездная величина -19), уступая в этом отношении только самым крупным галактикам (-22) и квазарам (-25). Во-вторых, их собственная светимость в максимуме блеска может быть восстановлена по характеру наклона наблюдаемой кривой блеска (т.е. зависимости блеска звезды от времени). В-третьих, имеются основания предполагать, что вспышки, происшедшие в разное космологическое время, должны не очень сильно различаться (т.е. космологическая эволюция этой популяции объектов не должна быть очень существенной). Наконец, сверхновые этого типа неплохо изучены теоретически [103]. Все это позволяет наблюдателям использовать сверхновые типа Ia — со

всеми оговорками и предосторожностями — как "стандартные свечи".

Первыми в 1998 г. результаты опубликовали "астрономы", которые располагали тогда данными о 16 вспышках сверхновых нужного типа на сравнительно больших красных смещениях [1]. "Физики" опубликовали статью [2] на следующий год; у них были независимые сведения о 42 сверхновых (только две из них были теми же, что и в списке "астрономов"). Результат обеих групп был одинаков: наблюдаемая яркость далеких сверхновых систематически слабее, чем можно было ожидать согласно модели с нулевым (и тем более, с отрицательным) ускорением. Это указывает на то, что реальные расстояния до далеких источников света регулярно отклоняются от закона Хаббла в сторону увеличения. Значит, космологическое расширение происходит с положительным ускорением. Следовательно, на разбегающиеся галактики действует антитяготение, которое должно быть сильнее тяготения вещества.

На основании этих наблюдений была сделана ориентировочная оценка [1, 2] красного смещения, при котором существует баланс тяготения и антитяготения. Так стала известна величина $z_V \approx 0,7$, при которой выполняется условие нулевого тяготения (19). При $z > z_V$, т.е. до момента установления нулевого тяготения, Вселенная расширялась с замедлением, а после этого момента ускорение стало положительным. Зная величину z_V , а также современную плотность вещества $\rho_M(z=0)$ и закон, по которому эта плотность изменяется со временем, $\rho_M \propto R^{-3} \propto (1+z)^3$, из (19) можно найти плотность темной энергии

$$\rho_V = \frac{1}{2} \rho_M(z=0)(1+z_V)^3. \quad (20)$$

Подставляя в (20) значение плотности вещества (барионы плюс темная материя) в современную эпоху $\rho_M(z=0) \approx 0,3 \times 10^{-29} \text{ г см}^{-3}$, получим значение плотности темной энергии $\rho_V \approx 0,7 \times 10^{-29} \text{ г см}^{-3}$. (В разделе 1 эта величина уже была дана в выражении через массу атома водорода.)

Эти оценки предполагают, что темная энергия представляет собой именно энергию ЭГ-вакуума, а, скажем, не квинтэссенцию или фантомную энергию.

Используя фридмановскую космологическую модель с известными плотностями вещества и темной энергии, можно найти расстояние, соответствующее красному смещению z_V ; оно, как оказалось, составляет 7–8 млрд световых лет (или $(2-3) \times 10^3$ Мпк), т.е. половину расстояния $R_H = 1/H_0$, которое называется хаббловским радиусом. В соответствии с этим находят, что нулевое ускорение имело место при возрасте мира 7–8 млрд лет. Так как возраст современного мира составляет примерно 14 млрд лет (по измерениям [14, 15]), выходит, что история Вселенной делится на две почти равные части: в первую ее половину преобладало тяготение темной материи, барионов и излучения, а во вторую — антитяготение темной энергии ЭГ-вакуума.

Открытие антитяготения и темной энергии сначала вызывало немало вопросов и возражений. Не объясняется ли эффект дополнительного ослабления яркости сверхновых каким-нибудь другим физическим фактором? Например, поглощением света космической пылью? Ответ на этот вопрос был дан в 2001 г., когда "астрономы" с помощью космического телескопа

"Хаббл" нашли сверхновую нужного типа на красном смещении 1,7 — рекордно большом на то время. Если все дело заключается в поглощении света пылью, то для самого далекого источника нужно ожидать и самого сильного недостатка яркости. Но если поглощение несущественно, то для этого источника следует ожидать не недостатка, а, наоборот, избытка яркости. Поскольку его красное смещение 1,7 заметно больше, чем $z_V = 0,7$, значит, источник наблюдается в том состоянии, в котором он находился, когда в мире еще преобладало тяготение и Вселенная расширялась не с ускорением, а с замедлением. Так появилась возможность проведения критического эксперимента. Когда поток энергии от этой сверхновой был измерен, оказалось, что имеется именно избыток, а не недостаток видимой яркости. Тем самым возражение, связанное с поглощением света пылью, было надежно снято. Со временем скептикам стало ясно, что на любой разумный вопрос у наблюдателей находится обоснованный ответ.

Работа наблюдателей продолжается [17–25]. К началу 2008 г. в их распоряжении имелись данные о более чем 200 сверхновых на красных смещениях от 0,3 до 1,8. Новые данные согласуются с первыми результатами [1, 2], уверенно подтверждая их. Тем не менее и "физики", и "астрономы" отдадут себе отчет в том, что многое еще нуждается в уточнении. Чаще всего называют эффект эволюции — зависимость собственного блеска сверхновых от возраста мира. Скорее всего этот эффект невелик, но речь идет о настолько тонких — на пределе наблюдательных возможностей — измерениях, что нужно как можно тщательнее учесть все, что может повлиять на результат. Интересное новое предложение состоит в том, чтобы изучать эффект эволюции в наблюдениях сверхновых на красных смещениях в интервале $1,5 < z < 3$ [104], где эффект темной энергии пренебрежимо мал и потому эффект эволюции мог бы проявиться в чистом виде. Требуется дальнейшего уточнения также эмпирическая процедура восстановления максимальной собственной светимости сверхновой по виду ее кривой блеска.

Сегодня центральной наблюдательной задачей справедливо считают повышение точности, с которой измеряется отношение w давления темной энергии к ее плотности. Если параметр w — постоянная величина, то его можно определить по значению красного смещения z_V в момент нулевого тяготения:

$$z_V = \left[\frac{(1-3w)\rho_V}{\rho_M} \right]^{-1/3w} - 1.$$

Как считают наблюдатели, для повышения точности определения величины w в 2–3 раза (т.е. до 5–3%) потребуются не несколько сотен, а скорее несколько тысяч сверхновых с красными смещениями от $z \approx 0,5$ до $z \approx 2$.

На такую задачу ориентированы проекты новых обширных орбитальных и наземных наблюдений. Особый интерес вызывает программа SNAP (SuperNova Acceleration Probe), которая разрабатывается под руководством Перлмуттера; среди ее участников — Дж. Смут и Дж. Мазер, лауреаты Нобелевской премии по физике 2006 года. Космический аппарат SNAP, несущий специализированный телескоп с зеркалом диаметром 2 м, будет, как предполагается, запущен на орбиту в начале

следующего десятилетия. Ожидается, что с его помощью удастся открывать до тысячи далеких сверхновых в год.

2.6. Данные космического аппарата WMAP

Присутствие в мире темной энергии нашло независимое подтверждение в 2003 г., а затем и 2006 г. в результате обработки обширных систематических наблюдений анизотропии реликтового фона излучения с помощью космического аппарата WMAP (Wilkinson Microwave Anisotropy Probe) [14–16]. Слабые вариации — на уровне нескольких тысячных долей процента — температуры реликтового фона представляют собой "отпечатки" первоначальной догалактической структуры Вселенной, развитие которой позднее привело к появлению галактик и их систем. Эволюция этих вариаций, их наблюдаемые количественные характеристики зависят от физических параметров Вселенной как целого и, в частности, от ее геометрии.

Самый важный (и, как считают, самый надежный) результат WMAP состоит в том, что полная плотность энергии в мире ρ_0 близка к критической плотности $\rho_c = (3/8\pi G)H_0^2 = (1 \pm 0,1) \times 10^{-29}$ г см⁻³ (где, как и выше, $H_0 = 72 \pm 0,4$ км с⁻¹ Мпк⁻¹ — постоянная Хаббла). При этом не исключается, что обе эти плотности строго равны друг другу. По данным [14, 15] их отношение, называемое параметром плотности, таково:

$$\Omega = \frac{\rho_0}{\rho_c} = 1,015 \pm 0,020. \quad (21)$$

Результат (21) вытекает из геометрических соображений и основывается на реальных измерениях характерных угловых расстояний в пространстве мира. Эти измерения стали возможными благодаря высокой точности, с которой регистрируется анизотропия реликтового фона (подробнее об этом см. в [105, 106]). Измерения показали, что трехмерное пространство (то, в котором происходит разбегание галактик) является почти плоским, евклидовым, а возможно и строго плоским. В соответствии с теорией Фридмана это должно означать, что полная плотность мира равна критической плотности. Так из изучения геометрических характеристик слабой анизотропии реликтового фона был получен результат, о котором давно мечтали космологи.

Теория Фридмана также говорит, что в плоском мире космологическое расширение происходит в параболическом режиме: полная механическая энергия разлета галактик равна нулю. По этой причине величину полной энергии E в первом уравнении Фридмана (11) можно считать пренебрежимо малой (а может быть, и строго равной нулю) по сравнению с величиной кинетической энергии и абсолютной величиной потенциальной энергии. Тогда оказывается, что наблюдаемая Вселенная может быть очень хорошо описана самым простым вариантом теории — простым в смысле и геометрии, и динамики. Это и принято в стандартной космологической модели: в ней трехмерное изотропное пространство считается плоским, а динамика расширения — параболической.

Согласно данным WMAP при космической плотности, равной критической, на темную энергию должно приходиться 70–80 % полной плотности. Дело в том, что вклад других энергий (барионов, темной материи и излучения) заранее ограничен весьма жестким верхним пределом, приблизительно в 30–20 % от критической

плотности, известным из совокупности ряда других независимых космологических требований.

В последнее время нередко говорят о том, что в космологии наступила "эра точных измерений". Читатель уже мог судить о точности космологических измерений, например, по формулам (5) и (21). Приведем теперь данные WMAP [15] об энергетическом составе и возрасте мира с указанием точности определения величин. Плотности темной энергии (соответствующий индекс V), темной материи (индекс D), барионов (индекс B) и излучения (индекс R) даются в единицах критической плотности:

$$\Omega_V = \frac{\rho_V}{\rho_c} = 0,75 \pm 0,05, \quad (22)$$

$$\Omega_D = \frac{\rho_D}{\rho_c} = 0,23 \pm 0,07, \quad (23)$$

$$\Omega_B h^2 = \frac{\rho_B}{\rho_c} = 0,022 \pm 0,001, \quad (24)$$

$$\Omega_R h^2 = \frac{\rho_R}{\rho_c} = 7 \times 10^{-5}. \quad (25)$$

Здесь h — постоянная Хаббла, измеренная в единицах 100 км с⁻¹ Мпк⁻¹: $h = H/100 = 0,72 \pm 0,04$.

Данные (22)–(25) относятся к современному состоянию Вселенной, возраст которой по данным WMAP составляет (в миллиардах лет)

$$t_0 = 13,7 \pm 3. \quad (26)$$

В наблюдениях WMAP плотности четырех энергий, постоянная Хаббла и возраст мира не измеряются непосредственно и по отдельности. Все числа в (21)–(26) — результат сложной обработки наблюдений анизотропии реликтового фона. Их находят в результате поиска таких значений этих величин, которые позволяют с учетом связей между ними, даваемых теорией, последовательно согласовать их между собой и, главное, с измеренными значениями характеристик анизотропии. По сути, числовые значения (21)–(26) означают, что в космологии можно свести концы с концами в указанных в (21)–(26) пределах точности. При этом особенно важно, что результаты WMAP согласуются с наблюдениями сверхновых [1, 2, 17–25] и всеми другими космологическими наблюдениями (см., в частности, [107, 108]).

Анализ результатов WMAP [14–16], опубликованных весной 2006 г., продолжается, и придиричивая критика здесь вполне уместна. Не исключено, например, что в [14–16] учтены не все систематические ошибки, так что реальная точность измерений, возможно, ниже объявленной. Один из очевидных источников трудно контролируемой систематической ошибки — сложная и неоднозначная процедура вычитания того вклада, который вносил в измеряемую анизотропию фона излучение Млечного Пути (см. раздел 4).

3. Темная энергия в ближней Вселенной

Эйнштейн считал, если судить по некоторым его отрывочным высказываниям, что космологическая постоянная описывает феномен глобального масштаба, который способен проявить себя лишь в динамике общего космологического расширения. Ни в работах Эйнштейна, ни

в более поздней космологической литературе не видно указаний на то, что антитяготение способно действовать — и даже доминировать над тяготением — в локальных масштабах, гораздо меньших космологических расстояний. Вскоре после открытия темной энергии, однако, было замечено [109, 110], что антитяготение способно в действительности управлять движением галактик чуть ли не во всем диапазоне галактических масштабов — от глобальных, "истинно космологических", до масштаба всего в несколько мегапарсек, — практически везде, где реально наблюдается регулярное космологическое расширение по закону Хаббла. В частности, антитяготение доминирует и в нашем ближайшем галактическом окружении на расстояниях всего в 1–2 Мпк от Млечного Пути.

3.1. Парадокс Хаббла–Сэндида

Как известно, наблюдательная космология начиналась с исследований в сравнительно скромных пространственных масштабах. К 1929 г., когда был открыт закон Хаббла, в распоряжении астрономов имелись измеренные В. Слайфером в 1910–1925 гг. скорости удаления 36 галактик. Скорости не превышали 10 тыс. километров в секунду. Хаббл измерил расстояния до 24 галактик, и у него получилось, что все они лежат от нас на расстояниях не более чем 2 Мпк [111]. Позднее А. Сэндида выяснил, что в измерениях Хаббла имелась ошибка — расстояния были недооценены почти в 10 раз (подробнее об этом можно прочитать в книгах [112–114]). В действительности расстояния доходили до 17–18 Мпк. Но ошибка измерения расстояний оказалась систематической — одинаковой для всех галактик, и в результате после ее исправления закон Хаббла остался в силе.

Наблюдения Слайфера и Хаббла с самого начала рассматривались как прямое астрономическое подтверждение теории Фрийдмана. При этом упускалось из вида одно немаловажное обстоятельство. Дело в том, что в масштабах от нескольких единиц до нескольких десятков мегапарсек космическое вещество распределено крайне неоднородно, оно собрано в отдельные сгустки — галактики, группы и скопления галактик, которые хаотически разбросаны по пространству. При таких условиях модель Фрийдмана неприменима: не выполняется условие однородности распределения вещества — одно из исходных предположений теории расширяющейся Вселенной. С 1960-х годов астрономам определенно известно, что Вселенная действительно однородна по распределению галактик, но лишь в среднем по очень большому масштабам, превышающим размер "ячейки однородности" $\approx 100\text{--}300$ Мпк. И только в масштабах, заметно превосходящих этот, Вселенная действительно описывается моделью Фрийдмана.

Что же тогда может быть общего между теорией Фрийдмана и наблюдениями Слайфера и Хаббла? Имеют ли эти наблюдения космологический смысл?

Первым, кто заметил проблему и по-настоящему задумался над ней, снова был Сэндида, некогда сотрудник Хаббла, продолжатель хаббловской научной традиции в астрономии. Сначала осторожно в 1972 г. [115], а затем вполне отчетливо в 1986 г. [116] и 1999 г. [117] Сэндида заявил, что открытие Хаббла вызывает ряд трудных вопросов. Главный из них таков: как при сильной неоднородности и явной хаотичности распределения вещества на расстояниях до 20 Мпк здесь может

существовать регулярный "поток расширения" с законом прямой пропорциональности между скоростью и расстоянием?

На это обстоятельство обратил внимание также теоретик С. Вайнберг. В популярной книге *Первые три минуты* [118] (русский перевод под редакцией Зельдовича) Вайнберг пишет: "В действительности взгляд на данные Хаббла оставляет меня в полном недоумении... мы и не должны ожидать, что для этих галактик выполняется точное соотношение пропорциональности между скоростью и расстоянием, — все они слишком близки... Трудно избежать заключения, что ... Хаббл просто знал тот ответ, который хотел получить".

Вряд ли можно в точности сказать, что знал и чего не знал Хаббл в 1929 г. (см., впрочем, снова [112–114]). Но простой "взгляд на данные Хаббла", на его диаграмму скорость–расстояние, регулярно воспроизводимую во множестве книг и статей (см., например, рис. 2 в статье [110] в *УФН*), не вызывает сомнений: скорости и в самом деле возрастают с увеличением расстояния. Сэндида, который многие годы наблюдает движения галактик (в частности, на тех же расстояниях, что и Хаббл), несколько не сомневается в том, что закон Хаббла действительно выполняется в той области расстояний, где он впервые был открыт. Линейная зависимость скорости от расстояния на оригинальной диаграмме Хаббла неизменно подтверждалась в наблюдениях, производимых со все возрастающей точностью. Астрономы-наблюдатели специально подчеркивают, что отклонения от линейной зависимости сравнительно малы и разброс скоростей вокруг закона прямой пропорциональности совсем невелик. По своим измерениям Сэндида оценивает этот разброс, называемый дисперсией скоростей, в $50\text{--}70$ км с⁻¹; а в принципе — если судить по степени неоднородности распределения вещества в том же объеме — дисперсия скоростей могла бы составлять и 100 и 150 км с⁻¹.

Вопреки неоднородности и хаотичности распределения галактик внутри ячейки однородности разбегание галактик происходит здесь весьма регулярно — это, по словам Сэндида, "поразительно спокойный и холодный поток". Далее мы будем пользоваться введенным Сэндида понятием "хаббловского потока расширения", понимая под этим регулярный разлет, разбегание галактик по закону Хаббла.

В 2006 г. Сэндида и его коллеги [101] подвели итог обширной программы исследований хаббловского потока с помощью наблюдений сверхновых типа Ia, которые велись ими в последние 15 лет с использованием космического телескопа "Хаббл" и лучших наземных инструментов [119–125]. Результаты таковы: 1) в широком интервале пространственных масштабов — от 4 до 200 Мпк — уверенно прослеживается регулярный поток расширения с соблюдением закона Хаббла $V = H_S R$; 2) постоянная Хаббла H_S , соответствующая данному интервалу расстояний, оказывается в пределах ошибки измерений везде одной и той же: $H_S = 62,3 \pm 6,3$ км с⁻¹ Мпк⁻¹ (эти данные мы уже приводили в разделе 2).

Получается, что регулярной кинематике галактик никак не мешает сильная нерегулярность их распределения внутри ячейки однородности. При этом постоянная Хаббла H_S , измеренная внутри ячейки однородности, близка к значению глобальной величины H_0 , даваемой

наблюдениями WMAP. Но как такое возможно? В 1999 г. Сэндидж говорил [117]: "Мы так и остаемся с этой тайной".

3.2. Регулярный поток

В следующем, 2000-м, году парадокс Хаббла–Сэндиджа был принципиально разъяснен [109]: все дело в темной энергии вакуума. Темная энергия — если это ЭГ-вакуум — имеет идеально однородную плотность, доминирует везде вне сильных сгущений вещества и в результате почти весь мир делает почти однородным.

Действительно, если придерживаться интерпретации темной энергии в духе ЭГ-вакуума и стандартной космологической модели, то следует ожидать, что не только очень далекие галактики, видимые почти у края Вселенной, но и самые близкие, которые наблюдал в свое время Хаббл, движутся не в пустоте, а на однородном фоне космического вакуума. Темная энергия — физический агент, который связывает локальные и глобальные свойства мира, создавая во всей Вселенной единый динамический фон [109, 110, 126–129]. Вакуум эффективно сглаживает влияние таких неоднородностей, как группы, скопления и даже сверхскопления галактик, и потому полное распределение энергии/массы во Вселенной оказывается гораздо более однородным, чем можно было полагать прежде, глядя лишь на одни галактики. Тем самым устраняется противоречие между регулярностью движения галактик и нерегулярностью их пространственного распределения внутри ячейки однородности: при наличии доминирующего фона темной энергии общее распределение массы/энергии тоже оказывается почти регулярным.

В современной Вселенной на движения галактик действует не только ньютоновская сила их взаимного притяжения, но и сила антитяготения, производимая темной энергией вакуума. Причем темной энергии в современной Вселенной гораздо больше, чем вещества (темной материи и барионов). Последнее относится и к глобальным, и к определенным локальным масштабам, так что почти везде в мире антитяготение, вообще говоря, сильнее, чем тяготение. Если представить себе предельный случай, в котором тяготением вещества вообще можно пренебречь по сравнению с антитяготением вакуума, то мы приходим к асимптотической картине, о которой упоминалось в разделе 2: галактики и их системы движутся как пробные частицы на идеально однородном фоне темной энергии и их движение происходит по закону Хаббла (см. соотношения (16), (17)). При этом темп разбегания галактик во всех масштабах дается одной и той же "универсальной постоянной Хаббла" $H_V = 1/t_V = [(8\pi G/3) \rho_V]^{1/2} \approx 60-64 \text{ км с}^{-1} \text{ Мпк}^{-1}$.

Как мы уже отмечали (см. раздел 2), такая идеальная картина на самом деле недалеко от действительности — от того динамического состояния, в котором сейчас находится наблюдаемая Вселенная, — и притом во всех пространственных масштабах начиная с нескольких мегапарсек. По этой причине динамический эффект темной энергии способен естественным образом объяснить оба факта астрономии, казавшихся до сих пор загадочными: 1) регулярность потока расширения внутри ячейки однородности и 2) единый темп расширения в локальном и глобальном масштабах.

Так снимается парадокс, долгие годы бросавший тень на открытие Хаббла (и даже на него самого (см.

раздел 3.1)). Как мы сейчас понимаем, именно темная энергия однородного вселенского вакуума стоит в действительности за открытием Хаббла и придает этому открытию космологический смысл. Космологические эффекты присутствуют не только на масштабах в несколько тысяч мегапарсек, превосходящих размер ячейки однородности, но и глубоко внутри этой ячейки.

Новое понимание динамики хаббловских потоков подсказывает, что темную энергию можно независимо изучать и измерять везде, где наблюдается регулярное разбегание галактик. Предполагая, что реальный мир действительно близок к описанной выше асимптотической картине, мы можем (обращая наши рассуждения) выяснить, какова та локальная плотность темной энергии, которая необходима для существования наблюдавшегося Сэндиджем и его сотрудниками [101] регулярного потока расширения в интервале масштабов 4–200 Мпк. Примем, что измеренное значение постоянной Хаббла внутри ячейки однородности, $H_S = 62,3 \pm 6,3 \text{ км с}^{-1} \text{ Мпк}^{-1}$ [101], полностью определяется локальной плотностью темной энергии. Чтобы отличать эту локальную плотность от глобальной, обозначим локальную плотность как $\bar{\rho}_V$. Тогда определяемое этой плотностью асимптотическое значение постоянной Хаббла выражается в виде $\bar{H}_V = (8\pi G \bar{\rho}_V)^{1/2}$, и из отождествления H_S с \bar{H}_V находим

$$\bar{\rho}_V = \rho_V \left(\frac{H_S}{H_V} \right)^2 = (1 \pm 0,2) \rho_V. \quad (27)$$

В формуле (27) глобальная плотность ρ_V и соответствующая ей универсальная постоянная Хаббла H_V использованы просто для удобства сравнения; по сути, результат (27) никак не зависит от глобальных космологических данных. Этот результат означает, что локальная плотность темной энергии близка к глобальной плотности, а возможно строго совпадает с ней.

Точность оценки (27) определяется двумя обстоятельствами: 1) точностью измерения самой величины H_S — она близка к 10 %, 2) степенью близости состояния наблюдаемой Вселенной к идеальной асимптотической картине. Первый источник ошибок отражен в соотношении (27). Что касается второго источника ошибок, то его вклад измеряется апостериори отношением средней плотности гравитирующего вещества (темной материи и барионов) к найденной в (27) плотности темной энергии $\bar{\rho}_V$: это отношение составляет 0,2–0,3. Так что реальная точность оценки (27) не лучше 40–50 %.

Наблюдаемый хаббловский поток расширения послужил нам естественной "измерительной установкой" (с размерами 4–200 Мпк) для оценки локальной плотности темной энергии. Самой природой эта "установка" откалибрована на абсолютный нуль энергии: она "работает" на гравитационном взаимодействии, и потому ею измеряется вся энергия, а не ее разности. То же относится, разумеется, и к потоку далеких галактик в глобальных масштабах, изучавшихся в работах [1, 2].

Остается добавить, что наше истолкование парадокса Хаббла–Сэндиджа разделяют теперь Сэндидж и его коллеги; по их словам [101] "темная энергия не имеет в настоящее время жизнеспособной альтернативы. Спокойствие хаббловского потока дает сильный аргумент в пользу существования вакуумной энергии".

3.3. Вблизи Млечного Пути

Уже из первых данных Хаббла 1929 года (после исправления в них систематической ошибки (см. раздел 3.1)) видно, что регулярный поток разбегающихся галактик берет начало на расстояниях 1–2 Мпк от нас. Этот ближайший участок потока вызывает по понятным причинам особый интерес. В последние десять лет хаббловский поток на расстояниях 1–7 Мпк стал предметом тщательных наблюдательных исследований, проводимых группой И.Д. Караченцева [130–143] с использованием космического телескопа "Хаббл" (почти 200 орбитальных периодов), а также других крупных инструментов, включая 6-метровый телескоп Специальной астрофизической обсерватории РАН. Для более чем двухсот ближайших галактик Караченцевым и его сотрудниками проведены измерения скорости с ошибкой не более 1–2 км с⁻¹ и получены оценки расстояния с ошибкой не более 8–10%. Эти обширные, систематические и высокоточные наблюдения впервые позволили получить ясное представление о кинематике хаббловского потока расширения вокруг нашей Галактики Млечный Путь и Местной Группы галактик, в которую входит Галактика.

Вместе с Галактикой Местную Группу образует другая гигантская галактика — Туманность Андромеды. Каждая из этих двух галактик-гигантов обладает протяженным массивным гало, заполненным темной материей. Галактики движутся навстречу друг другу со скоростью 120 км с⁻¹; в современную эпоху расстояние между ними составляет 0,7 Мпк. В состав Местной Группы входят также примерно пятьдесят относительно

мелких галактик-карликов, движущихся в гравитационной потенциальной яме, создаваемой главным образом тяготением двух галактик-гигантов. Группа как целое является гравитационно связанной и квазистационарной. Ее полная масса оценивается согласно Караченцеву величиной $M_{LG} = (1,3 \pm 0,3) \times 10^{12} M_{\odot}$ (заметим, что это рекордная по точности оценка массы в астрономии галактик и их систем).

Вокруг Местной Группы, до расстояний в 3 Мпк от ее центра масс, наблюдаются 22 галактики (карликовые), которые движутся в разные стороны по направлениям от центра группы и образуют местный хаббловский поток. Поток подчиняется закону Хаббла: скорость потока пропорциональна расстоянию начиная приблизительно с расстояний 1,5–2 Мпк от центра масс Местной Группы.

Данные наблюдений Караченцева и его сотрудников представлены на диаграмме скорость–расстояние (см. рисунок). Точки обозначают галактики Местной Группы и местного потока с измеренными значениями их радиальной (вдоль луча зрения) скорости и расстояния от центра масс группы. Точки образуют на диаграмме узор, состоящий из двух четко различающихся частей. Внутренняя часть — это Местная Группа, а внешняя — местный поток. Галактики потока имеют только положительные скорости — все они удаляются от нас. Их скорости изменяются с увеличением расстояния от значений вблизи нуля до примерно 200 км с⁻¹; средняя скорость составляет 120 км с⁻¹. Галактики Местной Группы имеют как положительные, так и отрицательные скорости в пределах примерно ± 150 км с⁻¹. Их средняя радиальная скорость близка к нулю.

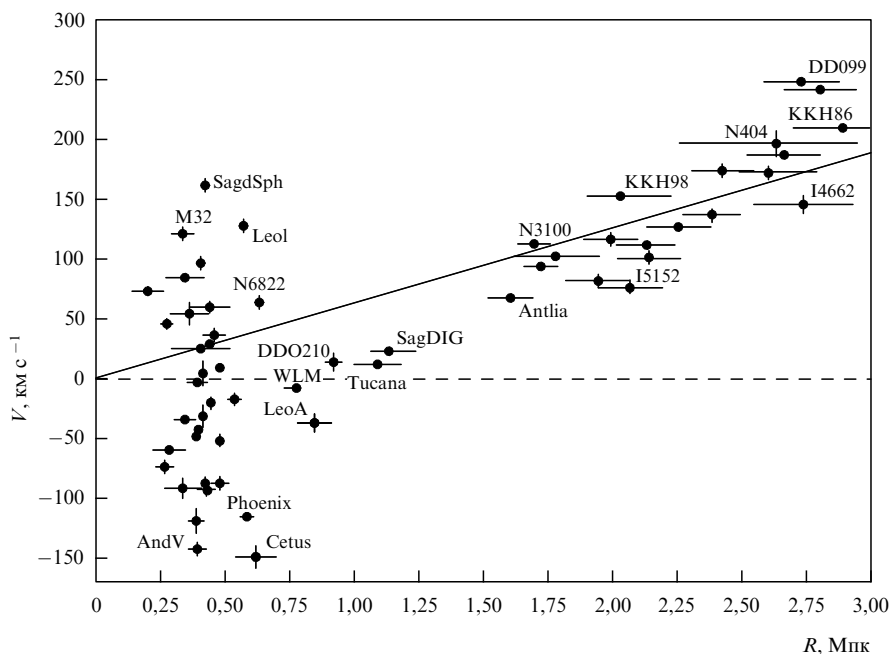


Рисунок. Диаграмма скорость–расстояние для галактик на расстояниях до 3 Мпк. Каждая из точек отвечает галактике с измеренными значениями расстояния и радиальной скорости в системе отсчета, связанной с центром Местной Группы. Данные получены И.Д. Караченцевым и его сотрудниками в 2002–2007 гг. в наблюдениях на космическом телескопе "Хаббл". На диаграмме видны две четко различающиеся между собой структуры — Местная Группа и местный поток разбегающихся галактик. Галактики Местной Группы занимают объем радиусом до 1,2–1,3 Мпк и движутся в направлении как от центра (положительные скорости), так и к центру (отрицательные скорости). Эти галактики образуют гравитационно связанную квазистационарную систему. Галактики местного потока находятся вне группы, и все они движутся от центра (положительные скорости). Скорости убегания возрастают с увеличением расстояния в соответствии с законом Хаббла. Прямая линия — теоретическая зависимость $V = H_0 R$; для области вне группы она соответствует радиальному движению разбегающихся галактик под действием антитяготения темной энергии в пренебрежении тяготением группы. Видно, что галактики потока "чувствуют" эту асимптотическую зависимость и, в общем, неплохо следуют ей даже на небольших расстояниях.

Измеренное значение местной постоянной Хаббла H_L составляет 72 ± 6 км с⁻¹ Мпк⁻¹. Дисперсия скоростей весьма мала — всего около 30–40 км с⁻¹, что меньше, чем считалось ранее. Так что начальный участок хаббловского потока определенно является регулярным — "спокойным и холодным" (если снова воспользоваться определениями Сэндиджа). Эти результаты согласуются с данными группы Сэндиджа [101, 119–125] и исследованиями П. Теерикорпи (обсерватория Туорла, Финляндия) и его коллег [144–152] для нескольких первых мегапарсек местного хаббловского потока.

3.4. Локальная космология

Обсудим динамику ближайшего объема мира. Местная Группа и начальный хаббловский поток вокруг нее погружены в однородное распределение темной энергии — если последняя является ЭГ-вакуумом. Галактики потока практически не взаимодействуют между собой, а их полная масса гораздо меньше (по крайней мере в сто раз) массы Местной Группы, так что карлики потока можно рассматривать как "пробные частицы". Галактики-карлики движутся на статическом динамическом фоне, который складывается из ньютоновского притяжения к Местной Группе и эйнштейновского отталкивания от нее, производимого темной энергией. Такая локальная ячейка радиусом в 3 Мпк изолирована (более или менее) от остального галактического окружения, так что внешним воздействием на нее в первом приближении можно пренебречь. Допустимо и еще одно упрощение: при рассмотрении динамики потока Местную Группу можно рассматривать как сферическую массу (об уточнениях см. раздел 3.5).

Такую идеализированную картину динамического фона, на котором движутся галактики-карлики местного потока, можно количественно описать, если воспользоваться хорошо известным результатом общей теории относительности — точным сферически-симметричным решением для точечной массы при наличии космологической постоянной — и применить его к области пространства вокруг Местной Группы. Это решение, которое называется решением Шварцшильда – де Ситтера, дается статической метрикой:

$$ds^2 = g_{00} dt^2 - r^2(\sin^2 \theta d\phi^2 + d\theta^2) - g_{11} dr^2, \quad (28)$$

$$g_{00}(r) = \frac{1}{g_{11}(r)} = 1 - \frac{2GM}{r} - \frac{8\pi G}{3} \rho_V r^2, \quad (29)$$

здесь r — расстояние до центра массы M .

Когда поля тяготения/антитяготения можно считать слабыми (а это как раз тот случай, который нас сейчас и должен интересовать), отклонения от галилеевой метрики малы и в таком приближении задаются ньютоновским гравитационным потенциалом $U(r)$. Следуя общему правилу (см., например, [5]), из (28), (29) в первом приближении получаем

$$g_{00}^{1/2} \approx 1 + U, \quad U(r) = -\frac{GM}{r} - \frac{4\pi G}{3} \rho_V r^2. \quad (30)$$

Дифференцируя теперь потенциал $U(r)$ по координате r , находим сумму ньютоновской силы притяжения, создаваемого массой M , и эйнштейновской силы отталкивания, создаваемого ЭГ-вакуумом в области вне

массы M (под которой мы будем понимать массу Местной Группы):

$$F(r) = -\frac{GM}{r^2} + \frac{8\pi G}{3} \rho_V r. \quad (31)$$

Близкое сходство формулы (31) с соотношениями (13), (14), которые фигурировали в космологической задаче, описанной в разделе 2, вполне очевидно. Но в космологии две силы происходили из нестатического решения Фридмана, а здесь возникают из статического решения Шварцшильда – де Ситтера. Имеется и другое различие. В космологической задаче силы (13), (14) определены в пространстве, однородно заполненном веществом и темной энергией, тогда как в локальной задаче — в пространстве, заполненном лишь темной энергией; все вещество сосредоточено при этом в объеме центральной массы M .

В пределе больших расстояний влияние центральной массы становится пренебрежимо малым; тогда метрика (28), (29), а вместе с нею и поле сил в ньютоновском приближении (31) определяются только вакуумом и пространство-время Шварцшильда – де Ситтера превращается в мир де Ситтера, где $g_{00}(r) = 1/g_{11}(r) = 1 - (8\pi G/3) \rho_V r^2$. Напомним, что мир де Ситтера служит также статической асимптотикой мира Фридмана на больших временах (см. раздел 2). Выходит, что глобальное пространство-время и локальное поле тяготения имеют одну и ту же, и притом статическую, асимптотику в пределе безраздельного господства вакуума. В этом пределе галактики разбегаются по общему для обоих случаев закону линейной пропорциональности (16) с универсальной постоянной Хаббла H_V . Асимптотические свойства нашей локальной космологической модели очевидным образом связывают ее с глобальной космологией. Эта связь осуществляется темной энергией и без нее становится невозможной.

Из соотношения (31) вытекает, что в локальной задаче имеется расстояние, на котором сумма сил тяготения и антитяготения равна нулю; это расстояние таково:

$$r_V = \left(\frac{3}{8\pi} \frac{M}{\rho_V} \right)^{1/3}. \quad (32)$$

Величина r_V — "радиус нулевого тяготения". Это прямой аналог момента нулевого тяготения в глобальной космологии (см. раздел 2). Но то, что в глобальной космологии случается во времени, в локальной космологии происходит в пространстве. Действительно, во Вселенной как целом тяготение исчезает на один краткий миг космического (собственного) времени и притом сразу во всем сопутствующем пространстве. Тогда как в локальной космологии тяготение отсутствует только на сфере радиусом r_V , но зато в течение всего времени существования Местной Группы галактик (ее возраст оценивается в 12–13 млрд лет, что всего на 1–2 млрд лет меньше возраста мира).

Если считать (как это должно быть в случае ЭГ-вакуума), что плотность темной энергии имеет вблизи нас то же значение, что и на самых далеких расстояниях, то радиус нулевого ускорения можно легко оценить. Для даваемого наблюдателями значения плотности вакуума (см. раздел 2.6) и при указанном в разделе 3.3 значении массы Местной Группы имеем $r_V = 1,1–1,3$ Мпк. Так что

уже в нашей ближайшей галактической окрестности антитяготение темной энергии доминирует — стоит лишь выйти за пределы расстояния всего в 1,5 Мпк.

Очевидно, что гравитационно-связанная система — Местная Группа галактик — может существовать лишь в пределах области радиусом $r < r_V$, где доминирует тяготение. Так оно и есть: наблюдаемый размер Местной Группы (см. рисунок) действительно удовлетворяет этому условию. Вне Группы, на расстояниях $r > r_V$ начинается хаббловский поток разбегания галактик; галактики-карлики потока движутся в области преобладания антитяготения и их динамика определяется главным образом темной энергией. На этих (и больших) расстояниях поток разбегания галактик стремится, согласно сказанному выше, приобрести регулярный характер. Из формулы (31) нетрудно увидеть, что радиальные траектории в области $r > r_V$ "притягиваются" с увеличением расстояния к траектории $V = H_V r$ с универсальной постоянной Хаббла H_V , которая зависит только от плотности (локальной) темной энергии.

Эти соображения подсказывают способ детектирования и измерения темной энергии в местном объеме. Действительно, из формулы для радиуса нулевого тяготения (32) видно следующее: если по независимым данным известно, где находится сфера нулевого тяготения и, кроме того, измерена масса Местной Группы M , то плотность темной энергии сразу определяется:

$$\rho_V = \frac{3}{8\pi} \frac{M}{r_V^3}. \quad (33)$$

Фундаментальная физическая постоянная — плотность темной энергии — выражается в соотношении (33) через вполне скромные астрономические величины — массу Местной Группы и начальный радиус хаббловского потока.

Массу Местной Группы можно считать известной (см. выше). Но как узнать величину r_V ? Пределы, в которых она должна находиться, можно распознать на наблюдательной диаграмме скорость–расстояние (см. рисунок). В самом деле, Местная Группа находится внутри сферы радиусом r_V (см. раздел 3.3), и ее граница определяется расстоянием, начиная с которого на диаграмме скорость–расстояние отсутствуют галактики с отрицательными скоростями. Самая далекая от центра Местной Группы галактика с отрицательной скоростью, Лео А, находится на расстоянии, которое (в пределах ошибки измерения) не превышает 1 Мпк; примерно на том же расстоянии лежит галактика с малой положительной скоростью DDO210. Так что 1 Мпк можно считать ориентировочным нижним пределом для величины радиуса r_V . Отсюда вытекает верхний предел для локальной плотности $\bar{\rho}_V$ темной энергии: $\bar{\rho}_V/\rho_V \leq 1,6$.

В качестве верхнего предела величины r_V можно взять среднее расстояние, скажем, до пяти галактик с положительными скоростями, которые лежат на диаграмме правее галактики DDO210, — это среднее расстояние равно 1,5 Мпк. Из этого вытекает наименьшее возможное значение локальной плотности темной энергии: $\bar{\rho}_V/\rho_V \geq 0,5$. С учетом ошибки определения массы Местной Группы (30%) надежный интервал значений локальной плотности таков: $0,3 < \bar{\rho}_V/\rho_V < 2$.

Как видим, лежащее в полученных пределах значение локальной плотности темной энергии не слишком сильно

отличается от значения глобальной плотности (а может быть, и строго равно ему). Впрочем, точные числа пока не так существенны. Куда важнее именно указание на присутствие темной энергии вблизи нас, которое вытекает как из общих соображений, так и — более формально — из нижнего предела плотности темной энергии.

Независимую оценку локальной плотности темной энергии в области локального потока можно получить, если применить к этому потоку те же соображения (см. выше) о близости наблюдаемого состояния потока к асимптотическому состоянию, описываемому законом $V = H_V r$. Тогда (как и в формуле (27)) из отождествления локальной постоянной Хаббла H_L с \bar{H}_V получим оценку плотности темной энергии в масштабе 1–3 Мпк:

$$\bar{\rho}_V = \rho_V \left(\frac{H_L}{H_V} \right)^2 = 1,4(1 \pm 0,2) \rho_V. \quad (34)$$

Здесь, как и в соотношении (27), указана только та неопределенность оценки, которая связана с ошибками наблюдательного определения местной постоянной Хаббла.

Анализ диаграммы скорость–расстояние, показанной на рисунке, подсказывает, что неплохой эстиматор локальной плотности темной энергии можно получить из сопоставления \bar{H}_V с величиной $\langle H \rangle$, которая представляет собой среднее значение отношения V/r для всех галактик потока. По данным, представленным на рисунке, $\langle H \rangle = 59 \pm 11$, где учтена и ошибка усреднения, и ошибка наблюдательных измерений расстояний и скоростей. Тогда, отождествляя $\langle H \rangle$ и \bar{H}_V , получим для местной плотности

$$\bar{\rho}_V = \rho_V \left(\frac{\langle H \rangle}{H_V} \right)^2 = 0,9(1 \pm 0,4) \rho_V. \quad (35)$$

В пределах 40–50% оценки (34) и (35) согласуются между собой; они вписываются также в интервал между верхним и нижним пределами для локальной плотности. В итоге можно заключить, что темная энергия наверняка присутствует в местном объеме, а ее плотность здесь совпадает с глобальной плотностью с точностью по крайней мере до 40–50%.

3.5. Малый взрыв

Описанная в разделе 3.4 простая модель местного хаббловского потока подтверждается (а где это требуется, и уточняется) компьютерным моделированием динамики этого потока. В компьютерных моделях [153–155] Местная Группа рассматривается уже не как сферическая масса, а как динамическая система, состоящая из двух сближающихся гигантских масс, сравнимых по величине. Для нахождения траекторий галактик локального хаббловского потока нужно, таким образом, решить задачу трех тел. Для аналитического интегрирования эта задача сложна и, как известно, не имеет общего решения. Но для компьютерного решения она, напротив, весьма проста и удобна, особенно когда третья частица может считаться пробной — как в нашем случае. Так что компьютерное моделирование локального хаббловского потока сводится к интегрированию ограниченной задачи трех тел на однородном фоне антигравитирующей темной энергии.

Как и следовало ожидать, компьютерные модели показали, что поле тяготения Местной Группы в действительности не является ни сферическим, ни статическим. Несферичность обусловлена наличием в группе двух сравнимых по величине тяготеющих масс, а зависимость от времени возникает из-за того, что эти массы сближаются. Поверхность нулевого тяготения теперь уже не является сферой, и на ней обращается в нуль не полное ускорение, а только его радиальная компонента. Но эти отклонения от описанной в разделе 3.4 простой картины не слишком велики — не более 10–20 %. Так что простая теория остается в силе как неплохое приближение.

В компьютерных моделях важны не столько сравнительно небольшие уточнения, сколько построение связанной количественной картины происхождения и эволюции местного хаббловского потока. Одна из черт этой картины состоит в том, что образующие поток галактики-карлики находились вначале в объеме Местной Группы, в гравитационной потенциальной яме двух гигантских галактик. В прошлом Местная Группа в объеме с поперечником около 2 Мпк содержала, по видимому, большое число мелких галактик и субгалактических фрагментов, существовавших вместе с двумя главными галактиками группы 12–13 млрд лет назад. Основная их часть так и осталась в этом объеме, причем многие были поглощены двумя гигантскими галактиками; другие же смогли покинуть Местную Группу, ускользнув из ее гравитационной потенциальной ямы.

Возможность выброса галактик из Местной Группы рассматривалась ранее М. Валтоненом и др. в модели, которую они назвали Малым взрывом [156], в отличие от Большого взрыва, давшего начало глобальному расширению Вселенной. Ряд наблюдательных соображений в пользу хаотического начального состояния Местной Группы приводится в работах [157, 158]. И действительно, в наших компьютерных моделях галактики-карлики, случайным образом распределенные вначале по объему Местной Группы и имевшие случайные скорости обоих знаков относительно ее центра масс, в немалом числе покидали группу. Удалившись на расстояния в 1–1,5 Мпк, они уходили потом за пределы поверхности нулевого радиального ускорения и оказывались в зоне преобладания антитяготения. В разных вариантах компьютерных моделей для ансамблей из двух-трех десятков частиц в каждой величина локальной постоянной Хаббла оказывалась, как правило, в пределах 60–80 км с⁻¹ Мпк⁻¹, а итоговая (в современном состоянии потока) дисперсия скоростей составляла 15–30 км с⁻¹.

Стоит отметить, что присутствие вакуума заметно облегчает уход мелких галактик из Местной Группы. Действительно, для того чтобы уйти из Местной Группы на бесконечность, малая галактика должна иметь полную энергию, превышающую пороговую энергию выхода. В модели без вакуума пороговая энергия, очевидно, равна нулю. Однако в модели с вакуумом потенциальный барьер ниже, ему отвечает отрицательная пороговая энергия $E_0 = -3GM/(2r_V)$. При наличии вакуума малой галактике, движущейся внутри группы, легче набрать энергию $E \geq E_0$ и уйти из системы. С помощью соотношения (30) легко получить значение пороговой энергии E_0 и увидеть, что максимум потенциальной энергии частицы находится на расстоянии

$r = r_V$ от центра группы. После выхода в область $r > r_V$ покинувшая группу галактика получает положительное ускорение и увеличивает свою скорость по мере дальнейшего удаления от Местной Группы. При этом наименьшая скорость в потоке, образованном этими галактиками, отвечающая условию $E = E_0$, очерчивает нижнюю границу потока на диаграмме скорость–расстояние. Эта минимальная скорость выражается как

$$v_{\min}(r) = \left(\frac{2GM}{r_V}\right)^{1/2} \left[\frac{r}{r_V} + \frac{1}{2} \left(\frac{r}{r_V}\right)^2 - \frac{3}{2} \right]^{1/2}. \quad (36)$$

Отсюда возникает возможность критического теста: если принятая модель верна, то скорости галактик местного потока удовлетворяют условию $v > v_{\min}(r)$. Можно проверить по данным, представленным на рисунке в разделе 3.3, что в наблюдаемом местном потоке это ограничение выполняется.

Общий подход, развитый для местного хаббловского потока, можно применить и к изучению других наблюдаемых потоков в масштабах нескольких мегапарсек. В последнее время обширный наблюдательный материал о двух близких к нам группах (Сен А и М 81/М 82) с хаббловскими потоками вокруг них получен Караченцевым и его коллегами [159–166]. Эти группы и потоки расширения вокруг них повторяют основные черты строения и динамики, характерные для Местной Группы и местного потока. В частности, для них выполняется условие минимальной скорости [166–168].

Еще Хаббл было известно, что вокруг нас находится довольно много небольших групп галактик и Местная Группа — их типичный представитель. Это подтверждается и численными моделями космологической эволюции: характерная черта этих моделей [169–174] — формирование групп галактик с потоками разбегания вокруг них. Системы такого рода можно было бы назвать "хаббловскими ячейками". Их изучение по существу еще только начинается. Главная физическая характеристика хаббловской ячейки — радиус нулевого тяготения, своим существованием целиком обязанный темной энергией. Возможно, именно хаббловские ячейки следует рассматривать в качестве "строительных блоков" ближней Вселенной. В этом случае космическая структура представляет собой трехмерную паутину, покрывающую почти все пространство мира и построенную почти исключительно из хаббловских ячеек, имеющих масштабы (радиусы нулевого тяготения) в сравнительно узком интервале — от нескольких мегапарсек (для групп) до десяти мегапарсек (для скоплений). Центры масс отдельных ячеек сохраняют исходный импульс космологического Большого взрыва, а их взаимное разбегание в последние 7–8 млрд лет ускоряется всемирным антитяготением.

Хаббловские ячейки возникают в расширяющейся Вселенной в ходе общего процесса формирования космических структур — от отдельных галактик до скоплений и сверхскоплений галактик. Основным механизмом этого процесса служит гравитационная неустойчивость [11, 12]. Присутствие в мире темной энергии привносит в эту картину существенную черту: гравитационная неустойчивость способна развиваться лишь тогда (и там), когда (и где) тяготение вещества (главным образом темной материи) сильнее антитяготения, создаваемого темной энергией. Поэтому первоначальная линейная

стадия гравитационной неустойчивости должна завершиться по крайней мере не позднее того момента, когда во Вселенной как целом начинает преобладать антигравитация темной энергии [175]. Это условие относится ко всем масштабам, и оно еще раз указывает на то обстоятельство, что динамическая роль темной энергии и всемирного антигравитационного эффекта важна не только в глобальном космологическом масштабе, но фактически и во всех меньших масштабах, где возникают и эволюционируют галактики и их системы.

4. Размер и размерность пространства

Обратимся снова к эйнштейновской космологии 1917-го года. Кроме гипотезы антигравитации и постулата статичности мира в ней заложена еще одна значительная идея — идея конечности и замкнутости Вселенной. Совсем недавно появились, впервые за всю историю космологии, объективные наблюдательные указания на то, что реальная Вселенная, возможно, и в самом деле является конечной. Если это подтвердится, то тогда Эйнштейн окажется прав и в данном вопросе, как он оказался прав в вопросе о всемирном антигравитационном эффекте.

4.1. Эйнштейн и Фридман о топологии мира

В космологической модели Эйнштейна трехмерное пространство является неевклидовым, оно имеет постоянную (одинаковую во всех точках и во все моменты времени) положительную кривизну. Такое пространство похоже на обычную двумерную сферу: двумерное пространство сферы тоже обладает постоянной положительной кривизной. Сфера имеет конечную площадь, но у нее отсутствуют двумерные границы. Ее трехмерный аналог, который имелся в виду у Эйнштейна, называется гиперсферой; гиперсфера обладает конечным трехмерным объемом и не имеет трехмерных границ.

Почему Эйнштейн считал, что пространство Вселенной должно быть конечным? Из общей теории относительности не вытекает никаких указаний на конечность или бесконечность мира. Дело в том, что эта теория строится на основе дифференциальной геометрии, которая служит ее математическим аппаратом. А дифференциальная геометрия описывает лишь локальные свойства пространства. Локальные в том смысле, что они относятся к каждой точке пространства и малой ее окрестности. Но такие "окрестности" в космологической реальности представляют собой области размером, превышающим размер ячейки однородности. Дифференциальная геометрия позволяет судить о том, совпадает ли геометрия данной области изотропного мира с геометрией Евклида, геометрией Лобачевского или гиперсферической геометрией. При этом речь идет именно о локальных свойствах пространства, а не о его устройстве в целом, которое должно изучаться с помощью не дифференциальной геометрии, а топологии.

В научно-популярной книге *Мир как пространство и время* Фридман [176] специально обращает внимание на то, что общая теория относительности позволяет судить лишь о дифференциальной геометрии мира, а топологии в ней нет. Из дифференциальной геометрии топология не вытекает; первая дает лишь некоторые ограничения на вторую. Вот два примера. Плоскость и двумерный цилиндр — это евклидовы поверхности. Однако на плоскости размеры вдоль любого направления неограни-

ченны, тогда как расстояния поперек оси цилиндра являются конечными — не большими, чем $2\pi r$, умноженное на радиус цилиндра. Другой пример — двумерное пространство Лобачевского, которое в целом может иметь, как известно, вид гиперboloида (граммофонной трубы), а может представлять собой и седло. Гиперboloид и седловидная поверхность сильно различаются между собой и по форме, и по строению в целом. Например, у гиперboloида все размеры в направлении, перпендикулярном его оси, конечны, а размеры седловидной поверхности во всех направлениях неограниченны. Но дифференциальная геометрия в обоих случаях одна и та же — это двумерное пространство с постоянной отрицательной кривизной.

Замечание Фридмана имело не только педагогический, но, вероятно, и полемический смысл. Фридман считал необходимым возразить Эйнштейну, подчеркнуть, что идея замкнутой гиперсферы является произвольной дополнительной гипотезой, никак не вытекающей из общей теории относительности как таковой.

Кстати, фридмановские модели часто называют открытой (пространство Лобачевского) и закрытой (гиперсфера). Причем иногда говорится, что в первом случае объем мира бесконечен, а во втором конечен. Но такое утверждение не всегда справедливо, возможны различные варианты топологии таких пространств, от которой зависят и свойства замкнутости и незамкнутости, конечности и бесконечности их полных объемов и т.п. Так что слова "замкнутая модель", "открытая модель" не должны вводить в заблуждение относительно топологии трехмерных пространств в этих моделях — о ней реально ничего не известно. Ничего не известно и о полных объемах этих пространств.

Пока еще не существует "топологической общей теории относительности", т.е. такой теории пространства-времени, которая ставила бы топологию мира в соответствие с развивающимися в нем физическими процессами. Возможно, это дело будущего. Хотя ничто не мешает теоретикам уже сейчас пытаться представить себе возможную топологию Вселенной, как это и сделал первым Эйнштейн, а наблюдателям — искать проявления этой топологии в реальных свойствах мира. В принципе имеется множество интересных и разнообразных математически допустимых вариантов глобального строения мира как целого (см., например, [177–180]).

Что касается гиперсферы в космологии Эйнштейна, то этот пример кажется настолько простым и даже естественным, что, например, в *Теории поля* [5] дается — без каких-либо оговорок — "объем пространства положительной кривизны" $2\pi^2 a^3$, где a — радиус кривизны пространства, и говорится, что "пространство положительной кривизны оказывается «замкнутым в себе» — конечным по объему, но, разумеется, не имеющим границ".

По словам Фридмана [176], "метрики [т.е. дифференциальной геометрии. — Примеч. А.Д.Ч.] мира самой по себе еще недостаточно, чтобы решить проблему конечности Вселенной. Для такого решения требуются дополнительные теоретические и экспериментальные исследования". Похоже, что сейчас как раз и настала пора таких исследований, а топология мира становится в наши дни, пожалуй, самым принципиальным, если не единственным по-настоящему фундаментальным, вопросом геометрического характера в космологии.

4.2. Спектр мощности

Топологические исследования в космологии развиваются в основном в двух направлениях. В исследованиях первого направления изучается "эффект призраков": на небе может наблюдаться двойное или даже множественное изображение одного и того же объекта в топологически замкнутом пространстве с конечным объемом. В этом случае свет от источника может достичь наблюдателя разными путями; он может прийти, например, с направления, противоположного направлению на источник, совершив обход вокруг замкнутого мира. Таким образом, наблюдатель увидит один объект в двух диаметрально противоположных направлениях. Поиски таких эффектов ведутся давно, но определенных и бесспорных результатов пока нет.

Другое направление связано с изучением реликтового излучения. Именно здесь недавно появились надежды на успех. В конце 2003 г. в журнале *Nature* вышла статья Ж.-П. Люмине и его коллег (обсерватория Париж-Медон) [181], в которой утверждается, что "впервые за более чем два тысячелетия научных споров и рассуждений о конечности и бесконечности мира" возникла реальная возможность решить наконец этот вопрос эмпирическим путем. В работе было продемонстрировано, что некоторые особенности анизотропии реликтового излучения определенно указывают на конечность объема Вселенной.

Известно, что реликтовое излучение приходит к нам в высшей степени изотропно, равномерно со всех направлений. И все же в реликтовом излучении имеется слабая анизотропия, на уровне нескольких тысячных долей процента, которая своим происхождением обязана некогда малым по амплитуде возмущениям космической среды, которые позднее дали начало галактикам и другим крупномасштабным космическим структурам (как уже упоминалось в разделе 2). Анизотропия наблюдается как слабые вариации по небесной сфере температуры реликтового фона. Уровень отклонений от среднего зависит от углового масштаба, в котором их наблюдают. Результат наблюдений можно количественно выразить в виде суммы сферических гармоник, каждая из которых представлена в этой сумме своей амплитудой. Набор таких амплитуд называется спектром мощности анизотропии. Относительно этого имеется хорошо развитая теория, учитывающая все особенности и детали задачи (см., например, [105, 106]). Спектр мощности содержит в себе определенные сведения об общих физических параметрах Вселенной и, в частности, о ее геометрии — как дифференциальной, так и глобальной. При этом информация о топологии содержится (что не удивительно) в низкочастотной части спектра, соответствующей самым большим угловым и пространственным масштабам.

Низшая гармоника в спектре мощности — монополю — отвечает колебаниям всей сферы как целого; монополю приписывается волновое число $l=0$; его амплитуда соответствует усредненной по всей сфере температуре реликтового излучения (которая составляет 2,727 К). Диполь с волновым числом $l=1$ отвечает угловой масштаб 180° . Но диполь в реликтовом излучении не удается измерить — он перекрывается гораздо более мощным диполем совсем другого происхождения, возникающим вследствие нашего (всей Солнечной системы) движения относительно реликтового излу-

чения. Самый низкий из реально измеримых монополей — квадруполь с волновым числом $l=2$ и угловым масштабом 90° . Далее следуют октуполь ($l=3$, угол 60°) и другие более высокие гармоники.

Наиболее полные на сегодня наблюдательные данные о спектре анизотропии реликтового излучения недавно были получены по уже упоминавшейся программе WMAP [14, 15] и опубликованы в 2003–2006 гг. Эти данные находятся, как выяснилось, в некотором противоречии с теоретическими ожиданиями, основанными на предположении о том, что объем трехмерного сопутствующего пространства является бесконечным. Именно, измеренный квадруполь оказался в 5–7 раз слабее ожидаемого для бесконечного пространства; октуполь — на 30 % слабее; для более высоких гармоник заметного недостатка мощности не было найдено.

4.3. Пространство Пуанкаре

Люмине и его соавторы [181, 182] предложили интерпретировать дефицит мощности на низких гармониках как наблюдательное указание на то, что пространство Вселенной не бесконечно, а конечно. Недостаток мощности на самых больших угловых и пространственных масштабах означает, по их мысли, что эти масштабы просто не помещаются во Вселенной. Авторы представили конкретную модель мира с конечным пространством, которая хорошо согласуется с полным набором данных WMAP, включая спектр мощности анизотропии реликтового фона.

В этой модели пространство имеет постоянную положительную кривизну — как в модели Эйнштейна и "закрытой" фридмановской модели [4] 1922 года. Конечно, модель Люмине — не статическая модель, это модель Вселенной, расширяющейся по Фридману. Ее важнейшей физической характеристикой является параметр плотности Ω . Для того чтобы сопутствующее пространство имело положительную кривизну, параметр Ω должен быть, согласно теории Фридмана, больше единицы; более того, в модели Люмине его значение в современную эпоху жестко фиксировано: $\Omega(t) = 1,013$. Эта величина, близкая к единице, не противоречит согласованным космологическим данным и прежде всего данным WMAP, согласно которым допустимые пределы современного значения параметра плотности даются соотношением $\Omega = 1,015 \pm 0,020$ (см. раздел 3).

Топология новой модели отличается от простой топологии гиперболы Эйнштейна. При той же дифференциальной геометрии, что у Эйнштейна и Фридмана, модель Люмине имеет нетривиальную топологию: пространство в ней является много связным. Принимается, что оно представляет собой так называемое додекаэдральное пространство Пуанкаре. Это более "тесное" пространство, чем пространство замкнутой гиперболы: его объем в 120 раз меньше, чем объем гиперболы в модели Эйнштейна при том же значении радиуса кривизны. Пространство Пуанкаре сложено из 120 блоков, которыми служат правильные двенадцатигранники (додекаэдры) со сферическими гранями, причем эти грани подчиняются определенному (непростому) условию отождествления. Двенадцатигранники заполняют трехмерный объем без зазоров и перекрытий.

Нужно сказать, что это довольно сложная топологическая конструкция, хотя для специалистов она

давно служит излюбленным объектом изучения. Не будем здесь вдаваться в дальнейшие подробности; более полное представление о пространстве Пуанкаре можно получить на сайте <http://www.geometrygames.org/CurvedSpaces>.

Следует специально отметить, что модель Люмине может быть справедливой только при наличии во Вселенной темной энергии. Связь между пространством Пуанкаре и темной энергией возникает по той причине, что параметр плотности в этом пространстве обязательно должен быть близок, как мы уже сказали, к единице; а в отсутствие темной энергии этот параметр имел бы значение 0,2–0,3, что несовместимо с положительной кривизной пространства.

При указанном выше значении параметра плотности максимальные расстояния $R_U(t_0)$ в пространстве Пуанкаре не одинаковы в разных направлениях, но различия в современную эпоху не очень велики:

$$0,82R_0(t_0) < R_U(t_0) < 1,03R_0(t_0), \quad (37)$$

где $R_0(t_0) = 1/H_0 \approx 1,2 \times 10^{28}$ см — современное значение хаббловского радиуса (при $H_0 = 72$ км с⁻¹ Мпк⁻¹ по данным WMAP [15]).

С хорошей точностью размер конечного пространства в модели Люмине совпадает с современным значением хаббловского радиуса горизонта. Так как эти две величины по-разному изменяются со временем при космологическом расширении, их совпадение в современную эпоху представляет собой факт, указывающий на особый, выделенный характер современной эпохи. С другой стороны, само наблюдение эффектов конечности пространства по спектру мощности реликтового излучения возможно, как оказывается [181], лишь тогда, когда размер мира не слишком сильно отличается от хаббловского радиуса. При значительном различии этих величин топологический эффект недоступен наблюдению: его не заметили бы ни намного ранее, ни намного позднее современной эпохи.

Допускает ли модель Люмине проверку в наблюдениях? Да, она может быть отвергнута, если более точные, чем сейчас, наблюдения дадут значение параметра плотности, отличное от того, которое жестко фиксировано в пространстве Пуанкаре; не очевидно, что в этом случае удастся легко подыскать другую, хотя бы и еще более сложную, топологическую конструкцию, которая могла бы удовлетворить новым, более строгим требованиям. Но если идея Люмине подтвердится и будет, таким образом, доказано, что пространство мира конечно, то это станет, как считают (см., например, [183]), одним из самых крупных открытий во всей истории науки.

Однако на нынешнем этапе работы нужно прежде всего убедиться в достоверности исходных наблюдательных данных: действительно ли имеет место значительная потеря мощности на квадрупольной гармонике в спектре анизотропии реликтового излучения? Нужно сказать, что "наблюдательных точек" в области низших мультиполей недостаточно. Это вызывает ряд сомнений относительно надежности данных WMAP. Сами участники программы [15, 16] признают, например, что необходимо более аккуратно, чем это делалось до сих пор, вычитать вклад, вносимый нашей Галактикой (а возможно, и Солнечной системой), в наблюдаемый спектр анизотропии на больших длинах волн. Тут действи-

тельно не все благополучно, и это лучше всего видно из существования неожиданной (и явно не имеющей отношения к космологии) корреляции осей квадруполя и октуполя с плоскостью Галактики и даже, кажется, с плоскостью эклиптики (чему уже нашли название — "ось зла").

Вычитание источников переднего фона — трудная задача, не имеющая, по-видимому, строгого однозначного решения. Высказывается, тем не менее, надежда, что, возможно, картину прояснит новый космический аппарат "Planck", который будет вести наблюдения анизотропии реликтового фона на многих длинах волн, что должно помочь правильному решению задачи. ("Planck" планируется вывести на орбиту в 2008 г.) Значительную роль в этом исследовании могут сыграть также специальные наблюдения на наземных радиоастрономических инструментах, особенно на крупнейшем радиотелескопе РАТАН-600 (проект Ю.Н. Парийского "Генетический код Вселенной").

Подчеркнем еще раз, что на сегодня модель Люмине удовлетворяет всем необходимым наблюдательным тестам и согласуется со всей совокупностью космологических данных — она не хуже, чем стандартная Λ CDM-модель. В некотором смысле модель Люмине даже богаче стандартной модели: она дает ответ на вопрос о мощности низших мультиполей в спектре анизотропии реликтового излучения, который в моделях с бесконечным пространством не находит объяснения. Так что со всеми оговорками о необходимости дальнейших проверок можно сказать, что сегодня модель Люмине дает самое полное описание наблюдаемых свойств реального мира.

4.4. Дополнительные измерения

Известно, что классик немецкой философии Кант был первым, кто указал на связь ньютоновского закона всемирного тяготения с тем фактом, что наше пространство трехмерно. Только в трехмерном пространстве сила взаимного притяжения двух масс обратно пропорциональна квадрату расстояния между ними. Если бы пространство было, например, четырехмерным, то тогда был бы не закон обратных квадратов, а закон обратных кубов. В десятимерном пространстве сила тяготения обратно пропорциональна девятой степени расстояния. В общем случае в пространстве с числом измерений D сила тяготения убывает обратно пропорционально расстоянию в степени $D - 1$. Добавим к этому, что вид эйнштейновского закона всемирного антитяготения (см. формулы (14) и (31)) не зависит от размерности пространства: при любой размерности сила антитяготения прямо пропорциональна расстоянию.

В 1920-е годы П. Эренфест [184] выяснил, что трехмерность пространства обуславливает само существование мира реальных вещей. Например, если бы число пространственных переменных равнялось не трем, а четырем, то, как оказывается, не существовало бы замкнутых орбит планет и Солнечная система не могла бы образоваться. В 1970-е годы Л.Э. Гуревич и В.М. Моستانенко [185] распространили этот анализ на квантовую механику и доказали, что в четырехмерном пространстве не существовало бы и замкнутых орбит электронов в атомах, так что оказалась бы невозможной атомная структура вещества.

Из этих примеров видно, что число пространственных измерений — исключительно важный факт природы. Несомненно, то же нужно сказать и о размерности времени. Но как независимо проверить, что наша Вселенная действительно имеет именно ту размерность пространства и времени, которая для нас очевидна и привычна? Не существует ли каких-то дополнительных, скрытых измерений пространства и/или времени, которые мы пока почему-либо не замечали в нашем мире?

Ясно, конечно, что в масштабе планетных систем пространство должно оставаться — в соответствии с результатом Эренфеста — эффективно трехмерным, чтобы могли существовать планетные системы с замкнутыми орбитами. Размеры дополнительных измерений, если они существуют, должны быть очень малы по сравнению с размерами орбит. В действительности имеется гораздо более жесткий верхний предел размера дополнительных измерений. Лабораторные эксперименты показывают, что никаких отклонений от ньютоновского закона обратных квадратов не обнаруживается при расстояниях величиной вплоть до 0,1–0,001 см [186–189].

Что касается не тяготения, а других взаимодействий, то они не чувствуют дополнительных измерений и на гораздо меньших масштабах. Действительно, само существование атомов означает — в соответствии с результатом Гуревича и Мостепаненко, — что, например, закон Кулона, электростатический аналог закона Ньютона, справедлив, по крайней мере, в масштабах электронных орбит атомов.

Последнее, впрочем, не обязательно означает, что пространство трехмерно в микроскопических масштабах. Возможно, все поля и взаимодействия в природе, кроме тяготения (!), "живут" на трехмерной гиперповерхности в пространстве многих измерений. Так обстоит дело в теории струн, где рассматриваются пространства с шестью и семью дополнительными пространственными измерениями, протяженность которых близка к характерной планковской длине $L_P \sim 10^{-33}$ см. Трехмерную гиперповерхность такого рода называют браной (от слова "мембрана", которое специально сохраняют для случая двумерного многообразия). (О различных аспектах многомерных теорий с микроскопическими пространственными измерениями см., например, работы [190–195].)

В 1998–1999 гг. (по случайному совпадению именно в те самые годы, когда появились первые наблюдательные указания на темную энергию) были высказаны новые оригинальные идеи о возможном характере дополнительных пространственных измерений. Н. Аркани-Хамед и его коллеги [196–198] выдвинули предположение о том, что наряду с дополнительными микроскопическими измерениями теории струн, а скорее всего независимо от их существования или несуществования, в природе могут иметься дополнительные измерения сравнительно большой, макроскопической протяженности. В этих работах принимается, что дополнительные измерения представляют собой окружности с постоянным радиусом R_* . Конечная протяженность означает компактность пространства дополнительных измерений. При этом вдоль трех "обычных" направлений пространство мира может простираться сколь угодно далеко — относительно этого не возникает никаких ограничений. Но если реальное пространство трех

измерений тоже компактно, как, например, пространство Пуанкаре в обсуждавшейся выше модели Люмине, то это означало бы, что мир замкнут в себе и изолирован во всех своих пространственных измерениях — от космологических до макроскопических.

В действительности за предположением о дополнительных макроскопических измерениях стоит радикально новая постановка вопроса о природе тяготения (и, как мы увидим, антитяготения тоже), о месте гравитации в ряду других фундаментальных взаимодействий. Известно, что тяготение гораздо слабее других взаимодействий — электромагнитного и слабого (электрослабого), а также сильного. Так, сила ньютоновского гравитационного притяжения между двумя электронами на 42 порядка величины меньше силы их электростатического отталкивания. Относительная слабость притяжения определяется малой величиной ньютоновской гравитационной константы G .

Для удобства сравнения с другими взаимодействиями полезно выразить гравитационную константу через планковскую массу (см. раздел 2.2):

$$\frac{8\pi G}{3} = M_P^{-2}. \quad (38)$$

Здесь и далее мы пользуемся "естественной системой единиц", принятой в фундаментальной физике; в этой системе не только скорость света, но и постоянная Планка считается равной единице: $\hbar = c = 1$. Тогда все размерные величины можно выразить в энергетических единицах: $1 \text{ эВ} = 1,8 \times 10^{-33} \text{ г} = 5,1 \times 10^4 \text{ см}^{-1} = 1,5 \times 10^{15} \text{ с}$.

Планковская масса, $M_P \approx 10^{-6} \text{ г} \approx 10^{18} \text{ ГэВ}$, ближе к массам, которые взвешивают на аптечных весах, чем к массам элементарных частиц. Ее часто считают самой фундаментальной массой/энергией в физике. Действительно, планковская масса, как и планковская плотность (см. раздел 2), представляет собой комбинацию трех физических констант, которые служат в ней "представителями" релятивизма (c), квантовой природы мира (\hbar) и геометрии пространства-времени (G). Для частицы с массой M_P комптоновская длина волны совпадает со шварцшильдовским радиусом (если частица имеет размер, не превышающий этот радиус), так что планковская масса дает энергетический масштаб, при котором тяготение теряет, как полагают, классический, неквантовый характер.

Как бы то ни было, масса M_P служит характерной энергией гравитационного взаимодействия; ее огромная (по сравнению с массами элементарных частиц) величина и определяет слабость тяготения — тяготение так слабо, потому что энергия M_P так велика.

Если сравнивать характерную энергию тяготения с характерными энергиями других взаимодействий, то ближайшей к планковской энергии окажется энергия электрослабого взаимодействия (она тоже уже упоминалась в разделе 2); это энергия, при которой объединяются электромагнитное и слабое взаимодействия: $M_{EW} \sim 10^3 \text{ ГэВ} = 1 \text{ ТэВ}$. Энергия M_{EW} на 15 порядков величины меньше, чем планковская масса. Соответствующая константа взаимодействия, определяемая (как и G) обратным квадратом характерной энергии, на 30 порядков величины больше постоянной тяготения. Огромный разрыв между планковской массой M_P и

массой M_{EW} , измеряемый безразмерным числом

$$X = \frac{M_P}{M_{EW}} \sim 10^{15}, \quad (39)$$

не имеет объяснения в фундаментальной теории и представляет собой одну из самых острых проблем физики, называемую "проблемой иерархии". Побудительным мотивом появления гипотезы о дополнительных измерениях пространства стал как раз поиск новых путей к решению этой проблемы.

Основная идея Н. Аркани-Хамеда и его коллег [196–198] состоит в том, что тяготение существует в действительности не в трехмерном, а в многомерном пространстве и в этом "истинном" пространстве характерная энергия тяготения — не планковская масса, а некоторая величина M_* , которая может быть гораздо меньше планковской массы. При этом проблема иерархии снимается, если энергия M_* сравнима с M_{EW} . Для конкретности можно принять, что $M_* = xM_{EW}$, где параметр теории x — не слишком большая и не слишком малая безразмерная величина. Так вновь (см. раздел 2) возникает характерная величина M_{EW} — теперь уже в картине многомерного мира, и здесь ей тоже принадлежит центральная роль.

В D -мерном пространстве с дополнительными измерениями постоянная тяготения G_D не совпадает с ньютоновской постоянной и определяется не планковской массой, а новой, "истинной" энергией тяготения:

$$G_D = M_*^{1-D}. \quad (40)$$

Соответственно сила тяготения, создаваемая какой-либо массой M и действующая на другую массу, находящуюся на расстоянии R в этом пространстве, будет иметь (в расчете на единицу массы) вид

$$F_D = M_*^{1-D} MR^{1-D}. \quad (41)$$

Считается, что протяженность R_* дополнительных измерений приблизительно одинакова для всех измерений. Тогда на расстояниях, превышающих R_* , эффект дополнительных измерений исчезает и сила тяготения (на единицу массы) принимает привычный вид $M_P^{-2} MR^{-2}$. Но при $R = R_*$ обе силы совпадают, и из "условия сшивки" находим

$$(M_* R_*)^{D-1} = (M_P R_*)^2. \quad (42)$$

Отсюда вытекает, что протяженность дополнительных измерений

$$R_* = \left(\frac{M_P}{M_*}\right)^{2/(D-3)} M_*^{-1} = \left(\frac{M_P}{M_*}\right)^{(D-1)/(D-3)} M_P^{-1}. \quad (43)$$

При одном дополнительном измерении ($D = 4$)

$$R_* = \left(\frac{M_P}{M_*}\right)^3 M_P^{-1} \approx x^{-3} 10^{48} M_P^{-1}. \quad (44)$$

Если $x \sim 1$, то эта длина сравнима с размерами Солнечной системы ($\sim 10^{16}$ см), так что по приведенным выше очевидным соображениям одно дополнительное измерение не проходит.

Пространству с двумя дополнительными измерениями ($D = 5$) в представлении [196–198] отводится

особое место. В этом случае

$$R_* = \left(\frac{M_P}{M_*}\right)^2 M_P^{-1} \approx x^{-2} 10^{32} M_P^{-1}. \quad (45)$$

Эта длина составляет $0,1x^{-2}$ [см], и она совместима с указанными выше экспериментальными ограничениями ($R_* < 0,1-0,001$ см), если параметр теории $x \geq 1$. Дополнительные измерения при $D = 5$ имеют длину, которая, как мы видим, примерно на 30 порядков величины больше планковской длины M_P^{-1} и более или менее соизмерима с нашими привычными повседневными масштабами длин.

4.5. "Истинные" константы и темная энергия

"Обычные" физические постоянные, включая планковские величины, а вместе с ними и постоянная тяготения Ньютона оказываются в многомерной физике производными от двух главных величин M_* и R_* и выглядят как "трехмерные тени" истинно фундаментальных многомерных констант. При $D = 5$ планковская масса и соответственно ньютоновская постоянная выражаются через две "истинные" константы несложным образом:

$$M_P = M_*^2 R_*, \quad (46)$$

$$G = M_P^{-2} = M_*^{-4} R_*^{-2}. \quad (47)$$

Из выражений (46), (47) видно, между прочим, что при $D = 5$ большое иерархическое число является просто произведением двух новых "истинных" констант:

$$X \equiv \frac{M_P}{M_*} = M_* R_* \sim 10^{15}. \quad (48)$$

В этом смысле иерархия в действительности не исчезает; большое безразмерное число X остается в теории, хотя и предстает в новом облике.

В разделе 2 мы встречались с феноменом иерархии, когда говорили об отношении двух энергий M_{EW}/M_P и о его возможной связи с плотностью темной энергии: плотность темной энергии в обычном трехмерном пространстве (т.е. на трехмерной бране "истинного" пространства) выражается по формуле (7) через степень иерархического числа: $\rho_V \sim X^{-8} M_P^4$. В принятых здесь единицах наблюдаемое значение плотности составляет $\rho_V \sim 10^{-120} M_P^4$; так что при $X \sim 10^{15}$ это соотношение дает правильный порядок величины плотности темной энергии (для чего формула (7) и была, собственно, сконструирована).

Пользуясь выражением для иерархического числа при $D = 5$, находим, что плотность темной энергии в трехмерном мире целиком определяется протяженностью дополнительных измерений [199]:

$$\rho_V \sim R_*^{-4}. \quad (49)$$

Эта формула устроена так, что величина $1/R_*$ дает массу темной энергии в объеме пространства с размером R_* . Тогда плотность находится делением этой массы на объем R_*^3 . При $R_* \sim 10^{-3}$ см имеем плотность $\rho_V \sim 10^{-120} M_P^4$. Примечательной особенностью соотношения (49) является то, что плотность темной энергии не зависит от "истинно фундаментальной массы" и в этом случае иерархия действительно исчезает.

Заметим также, что выражение (49) напоминает соотношение, известное по квантовому эффекту Казимира: сила притяжения между двумя параллельными проводящими пластинами в расчете на единицу площади пластин (по размерности — это плотность энергии) дается похожей формулой (см., например, [94]): $\rho_{\text{CAS}} \sim d^{-4}$, где d — величина малого зазора между пластинами.

Если считать, что темная энергия (понимаемая как ЭГ-вакуум) должна заполнять полное пятимерное пространство, то ее пятимерная плотность в таком пространстве, как легко видеть, будет зависеть лишь от размера дополнительных измерений:

$$\rho_{V5} \sim R_*^{-6}. \quad (50)$$

Что касается эйнштейновской силы антитяготения, то в пятимерном пространстве она примет вид

$$F_{E5} \propto M_*^{-4} \rho_V R, \quad (51)$$

сохранив, как и ожидалось, линейную зависимость от расстояния.

С помощью (51) и приведенных выше формул можно найти, например, выражение для радиуса нулевого тяготения в пятимерном пространстве. Вместо формулы (32) (см. раздел 3) теперь будем иметь

$$r_V = \left(\frac{16\pi^3}{5} M R_*^6 \right)^{1/5}. \quad (52)$$

Этот радиус не превышает размера дополнительных измерений R_* , только в случае, если масса M очень мала:

$$M \leq M_V \sim 10^{-17} M_*. \quad (53)$$

Масса M_V на 11 порядков величины меньше массы электрона. Это означает, что для всех известных элементарных частиц (не говоря уже о макроскопических телах) соответствующие значения радиуса нулевого тяготения выходят далеко за пределы дополнительных макроскопических измерений (в пятимерном мире).

Вспомним, что, как предполагается, в дополнительных измерениях квантовые негравитационные поля "не живут", они и их нулевые колебания существуют лишь на трехмерной бране. Применительно к соображениям, которые стоят за формулами (49)–(53), это должно означать, что вакуум пятимерного пространства создают не физические поля; у него иная, не квантово-полевая природа. В многомерной физике, как подсказывают приведенные выше рассуждения, темная энергия вакуума обязана своим существованием именно наличию в мире дополнительных измерений: ее плотность зависит только от числа и протяженности этих измерений — без какой-либо связи с квантовыми полями на бране. Тогда наблюдаемый ЭГ-вакуум (как трехмерная тень "истинно фундаментального" пятимерного вакуума) тоже должен иметь скорее "геометрическую", чем "материальную" природу.

В многомерной физике эйнштейновская космологическая постоянная Λ — также лишь тень истинно фундаментальных констант; при $D = 5$ связь между ними такова:

$$\Lambda = 8\pi R_*^{-4} M_P^{-2} = (M_* R_*)^{-4} R_*^{-2}. \quad (54)$$

Новый взгляд на размерность пространства, предложенный в [195–197], имеет хорошие перспективы экспериментальной проверки. Полным ходом идут лабораторные эксперименты с гравитацией, нацеленные на субмиллиметровые расстояния, на которых станет доступно пятимерное пространство, если дополнительные измерения действительно существуют. Кстати, при числе дополнительных измерений 3 и более, их длины настолько малы (10^{-7} см и меньше), что экспериментальная проверка далась бы гораздо труднее, а то и вообще оказалась бы невозможной.

Гипотеза дополнительных макроскопических измерений обещает новую физику при энергиях, близких к "истинно фундаментальной" энергии $M_* \sim M_{\text{EW}} \sim 1$ ТэВ. В частности, она предсказывает рождение гравитонов, а возможно, и черных дыр в экспериментах на Большом адронном коллайдере [200–203]. Не будем здесь входить в дальнейшее обсуждение этой большой темы и ограничимся ссылкой на обзоры в УФН [200, 201].

5. Внутренняя симметрия в космологии

Согласно Аристотелю, которого иногда называют первым физиком, все в мире состоит из четырех "основных элементов", или стихий, — это земля, вода, огонь и воздух. Насколько известно, во времена Аристотеля не обсуждалось, сколько всего воды или огня имеется во Вселенной и как количества стихий соотносятся между собой. С 1998–1999 гг. в современной космологии тоже имеется ровно четыре стихии, или космические энергии, из которых сделано все на свете. Вклад каждой из них в полную энергию мира довольно точно измерен (см. раздел 2). Напомним, что на темную энергию приходится примерно 70–80 %, на темное вещество — около 15–25 %, на барионы — примерно 5 %, на излучение — несколько сотых долей процента полной энергии Вселенной.

Измеренные процентные доли относятся к современному состоянию мира. В ходе эволюции Вселенной относительный вклад каждой из энергий изменялся вследствие общего космологического расширения. Например, доля вакуума была близка к нулю в ранней Вселенной в эпоху первичного нуклеосинтеза при возрасте мира в несколько минут, а доля излучения приближалась тогда к 100 %. В отдаленном будущем вклад темной энергии будет приближаться к 100 %, а вклады трех невакуумных энергий будут стремиться к нулю.

Случайный на вид и к тому же изменяющийся во времени рецепт космической смеси может показаться неестественным, чудовищно сложным, странным или даже абсурдным — такие определения кочуют в научной и популярной литературе (см., например, статью под названием "Абсурдная вселенная" [204]). Но на самом деле за произвольным, как может показаться, набором цифр скрывается простая и не зависящая от времени закономерность, которая представляет собой особого рода симметрию [110, 205, 206].

5.1. Четыре энергии

Из четырех космических энергий больше всего выше говорилось о темной энергии — это главная тема статьи. Приведем теперь краткую сводку сведений о трех невакуумных энергиях.

Как уже отмечалось, обычное вещество — это нерелятивистские протоны, нейтроны и электроны; такой тип космической энергии принято называть барионным. С этим обычным веществом далеко не все ясно. Главный вопрос: почему в мире имеются протоны и нейтроны, но не наблюдаются в тех же количествах антипротоны и антинейтроны? Ведь согласно одному из общих законов физики в природе должно соблюдаться равновесие частиц и античастиц. То же относится и к электронам: их античастицы позитроны — большая редкость в естественных условиях.

Возможно, перекося в пользу барионов возник в ранней Вселенной в эпоху очень высоких температур, когда эти частицы были релятивистскими. В таких условиях частицы и античастицы имелись в равном количестве. Но если симметрия между ними была не строгой, а слабо нарушенной, то в определенную эпоху мог образоваться малый избыток барионов по отношению к антибарионам. Гипотетический процесс образования "лишних" барионов называют космическим бариогенезом. Позднее, когда температура космической среды понизилась вследствие космологического расширения, произошла аннигиляция основного количества барионов и антибарионов. Но для лишних барионов не нашлось партнеров-антибарионов для аннигиляции, и потому они сохранились во Вселенной до наших дней. В результате первоначально очень малый избыток частиц по отношению к античастицам превратился в практически стопроцентное преобладание барионов над антибарионами. Такой путь к решению проблемы был намечен А.Д. Сахаровым [207] и В.А. Кузьминым [208]. В работах [207, 208] выяснены необходимые условия для эффективного протекания бариогенеза, изучен ряд важных черт процесса; но полного и окончательного решения проблемы пока не достигнуто [209].

Намного лучше известна физика излучения: излучение представляет собой остаток, реликт, некогда плотного и очень горячего состояния вещества на ранних этапах эволюции Вселенной. Существование реликтового излучения было предсказано Г.А. Гамовым в 1940–1950-е годы и подтверждено дальнейшими наблюдательными открытиями. Излучение — это фотоны (а возможно, и гравитоны [210]), которые находились в термодинамическом равновесии с веществом и тоже были очень горячими в далеком прошлом Вселенной. Затем, в ходе космологического расширения, излучение остыло до наблюдаемой сейчас очень низкой температуры — около 3-х градусов выше абсолютного нуля температуры. При этом сами фотоны не исчезли, и их полное число сохранилось до наших дней. Этим частиц очень много — в современную эпоху имеется приблизительно 500 реликтовых фотонов в каждом кубическом сантиметре пространства. Излучение почти идеально равномерно заполняет весь объем Вселенной.

Число нерелятивистских барионов тоже сохраняется при расширении мира, но их "поштучно" гораздо меньше — всего примерно две частицы на десять кубических метров пространства. Отношение числа фотонов к числу барионов — большое безразмерное "барионное число" $B \sim 10^9$. Главным образом из-за неясности с антибарионами (см. выше) физическая природа этого числа составляет одну из трудных загадок космологии и микрофизики. Пока барионы и антибарионы оставались ультрарелятивистскими, тех и других было примерно

столько же, сколько и фотонов. Обратная величина, $1/B \sim 10^{-9}$, дает количественную меру слабого нарушения симметрии между частицами и античастицами в ранней Вселенной. Барионное число служит также мерой энтропии, приходящейся на один барион [10]; по этой причине от него зависит, в частности, производство гелия в первичном нуклеосинтезе при возрасте мира в несколько минут.

Что касается темной материи, то первые намеки на ее существование появились еще в начале 1930-х годов; достоверные сведения были получены в 1970-е годы (см. обзор [211]). В 1980-е годы обсуждалась гипотеза, согласно которой темное вещество представляет собой газ нерелятивистских нейтрино и антинейтрино всех сортов. Позднее выяснилось, что масса нейтрино для этого слишком мала. Сейчас ясно, что ни одна из известных элементарных частиц не подходит на роль носителя темной материи. Темная материя остается вне рамок стандартной модели физики элементарных частиц — эта модель ничего подобного не предусматривает, для нее существование темных частиц было и остается загадкой. Темная материя до сих пор ускользает и от прямого физического эксперимента, несмотря на многолетние усилия в этом направлении. Но надежно известно, что темной материи примерно в 4–6 раз больше по массе/энергии, чем барионов. Темные частицы заполняют огромные объемы вокруг галактик, групп и скоплений, образуя темные короны, или гало.

Согласно распространенной точки зрения на роль носителей темной материи больше всего подошли бы не известные пока элементарные частицы с довольно большой массой. Им уже подыскали название — WIMPs (см. раздел 2). В отличие от протонов и нейтронов эти частицы не чувствуют сильных ядерных сил, но участвуют, как и электроны, в электрослабом взаимодействии. Темные частицы считаются стабильными и сохраняются в ходе космологического расширения. Возможно, эти частицы являются, например, наименьшими по массе суперсимметричными партнерами таких частиц, как фотон или гравитон (последнее считают более правдоподобным); тогда темные частицы были бы фермионами и по принятому в физике частиц правилу назывались бы фотино или гравитино.

Рассматриваются и другие гипотетические частицы на эту роль — сверхлегкие (аксионы) [212, 213] или сверхмассивные [214–218] (с массой около планковской) частицы, нейтрино четвертого поколения (они не запрещены критерием Шварцмана [219], если их масса достаточно велика для того, чтобы они были нерелятивистскими в эпоху первичного нуклеосинтеза). Это могли бы быть также гипотетические зеркальные частицы, о существовании которых подозревают — по независимым соображениям — уже с середины 1950-х годов [93]. Главный вопрос: почему природа отдает этим частицам подавляющую долю своей невакуумной энергии?

О космических энергиях известно, как мы видим, не так уж много. Важные вопросы, касающиеся их физической природы, остаются по большей части без ответа. Тем не менее каждую из энергий можно описать макроскопически как среду с определенным значением плотности и давления. Плотности космических энергий измерены в наблюдениях (см. раздел 2.6). Известна и связь плотности с давлением, т.е. уравнение состояния, каждой из этих сред. Барионы и темная материя являются

нерелятивистскими (по крайней мере после ранней эпохи нуклеосинтеза); поэтому их давление очень мало по сравнению с плотностью энергии, так что его можно просто считать равным нулю. Излучение — ультрарелятивистская среда, и его давление составляет одну треть от плотности энергии. В случае вакуума давление, как мы знаем, отрицательно и равно плотности темной энергии, взятой со знаком минус.

Зная уравнение состояния данной космической энергии, можно определить, как она ведет себя в ходе расширения Вселенной. На это указывает один из самых общих законов природы — закон сохранения внутренней энергии, который появляется в космологии как второе уравнение Фридмана (см. раздел 2). Из этого закона вытекает, что полное число частиц в данном расширяющемся объеме не изменяется со временем (как мы уже сказали). Впрочем, последнее и так понятно: поскольку это "сопутствующий" объем, а частицы стабильны, в нем всегда находятся одни и те же сохраняющиеся частицы. Последнее относится к частицам всех трех невакуумных энергий — барионам, фотонам и нейтрино, темным частицам. Что касается темной энергии вакуума, то частиц (реальных) в нем нет, а сохраняющейся величиной оказывается просто его плотность: ЭГ-вакуум вообще не изменяется при космологическом расширении.

5.2. Симметрия

Наличие сохраняющихся во времени физических характеристик космических энергий позволяет записать рецепт космической смеси не в процентных долях, которые изменяются в ходе космологического расширения, а через постоянные величины:

$$A_V \sim A_D \sim A_B \sim A_R \sim 10^{60 \pm 1} M_P^{-1}. \quad (55)$$

Здесь каждая из четырех констант, называемых фридмановскими интегралами, представляет определенную космическую энергию: темную энергию вакуума (A_V), темную материю (A_D), барионы (A_B) и излучение (A_R). Фридмановские интегралы приблизительно равны (в пределах двух порядков величины); их численное значение дано в "естественных единицах" (см. раздел 4), в которых $c = \hbar = 1$.

Место фридмановских интегралов в космологии видно из первого уравнения Фридмана (11), которое выражает закон сохранения механической энергии (см. раздел 2). Если в уравнении (11) учтены явно все четыре космические энергии, то оно выглядит так:

$$\dot{R}^2 = \left(\frac{A_V}{R}\right)^{-2} + \frac{A_B}{R} + \frac{A_D}{R} + \left(\frac{A_R}{R}\right)^2. \quad (56)$$

Уравнение (56) — это уравнение стандартной (Λ CDM) космологической модели с плоским трехмерным пространством и параболической ($E = 0$) динамикой. Здесь $R(z)$ — масштабный фактор (функция времени или красного смещения z), пропорционально которому изменяются все космологические расстояния:

$$R(z) = R_0(1+z)^{-1}, \quad R_0 = 3 \times 10^{60} M_P^{-1}. \quad (57)$$

Современное ($z = 0$) значение масштабного фактора в принятой здесь нормировке близко к значению хаббловского радиуса $R(z=0) = R_0 \sim H_0^{-1}$. Расширяющуюся область мира размером $\sim R(z)$ нередко называют "нашим космическим доменом" или Метагалактикой.

Фридмановские интегралы — это интегралы в точном смысле слова: они представляют собой постоянные интегрирования, возникающие при решении второго уравнения Фридмана (18). Напомним, что уравнение (18) выражает закон сохранения внутренней энергии, причем космические энергии трактуются макроскопически как среды с определенной связью между давлением и плотностью. При $dS = 0$ уравнение (18) для каждой космической энергии по отдельности имеет вид

$$\frac{\dot{\rho}}{\rho(1+w)} = -3 \frac{\dot{R}}{R}, \quad (58)$$

где ρ — плотность данной энергии, w — отношение давления этой энергии к ее плотности, так что $w = -1, 0, 1/3$ соответственно для темной энергии (ЭГ-вакуума), темной материи, барионов и излучения. Для энергии с данными ρ и w интеграл уравнения (58)

$$A = (M_P^{-2} \rho R^{3(1+w)})^{1/(1+3w)}. \quad (59)$$

Формула (59) (вместе с соотношением (57) для масштабного фактора) служит определением фридмановских интегралов.

Численное значение каждого из четырех интегралов можно найти, если на какой-либо момент времени (все равно какой) известны значения соответствующей плотности энергии и масштабного фактора. Воспользуемся данными о современных значениях плотностей, приведенными в разделе 2.6. Тогда из определения фридмановских интегралов найдем, что четыре интеграла близки между собой по порядку величины, а их численное значение близко к современному значению хаббловского радиуса: $A \sim 1/H_0 \sim 10^{28} \text{ см} \sim 10^{60} M_P^{-1}$.

По самому своему происхождению из закона сохранения внутренней энергии интегралы полностью независимы друг от друга, и их значения не связаны между собой заранее никакими ограничениями, кроме тривиальных. Например, в мире без темной энергии (модель, которая еще недавно считалась общепринятой) интеграл A_V обращается в бесконечность. В "холодном мире" с нулевой начальной температурой (модель, обсуждавшаяся до открытия реликтового излучения) интеграл A_R равняется нулю. Так что для этих четырех энергетических параметров открыт весь интервал значений от нуля до бесконечности, и они могли бы, вообще говоря, сколь угодно сильно отличаться друг от друга. Но реальные значения четырех интегралов отнюдь не занимают всей априори дозволенной им бесконечной области значений, а располагаются в весьма узком интервале — в пределах, не превышающих двух порядков величины.

Физический смысл фридмановских интегралов вполне прозрачен: они напрямую связаны с теми сохраняющимися величинами, о которых упоминалось в разделе 5.1. Легко видеть, что

$$A_V = M_P(\rho_V)^{-1/2}, \quad (60)$$

$$A_D = \frac{3}{4\pi} M_P^{-2} M_D, \quad (61)$$

$$A_B = \frac{3}{4\pi} M_P^{-2} M_B, \quad (62)$$

$$A_R \approx \left(\frac{3}{4\pi}\right)^{1/2} M_P^{-1} N^{2/3}. \quad (63)$$

Здесь M_D , M_B — соответственно полная масса темной материи и полная масса барионов внутри расширяющейся сферы радиусом $R(z)$; N — полное число реликтовых фотонов внутри той же сферы. Обе полные массы, M_D и M_B , и полное число частиц N — величины, которые остаются неизменными при космологическом расширении — по определению сопутствующего объема (в разделе 5.1 мы говорили о сохранении числа темных частиц и барионов в сопутствующем объеме; но сохраняются и соответствующие полные массы, так как масса каждой нерелятивистской частицы постоянна).

Заметим, что в модели конечного замкнутого пространства, предложенной Люмине [181] (см. раздел 4), невакуумные интегралы A_D , A_B , A_R выражаются через полную массу темной материи, полную массу барионов и полное число реликтовых фотонов во всем мире.

Невакуумные интегралы имеют, как мы видим, вполне понятный смысл. Что касается интеграла для темной энергии, то он задается неизменной во времени величиной плотности ЭГ-вакуума — таково в этом случае требование закона сохранения внутренней энергии. Хотя в первых трех случаях интегралы выражаются через экстенсивные величины, а в четвертом — через величину интенсивную, все четыре интеграла имеют одну и ту же размерность (размерность длины) и потому их можно сравнивать друг с другом.

Несмотря на то, что значения фридмановских интегралов вычислены по наблюдательным данным, относящимся к современной эпохе, сами они и их приближенное равенство (55) сохраняют смысл во все эпохи эволюции мира — в прошлом, настоящем и будущем, всегда, когда в природе существуют эти четыре энергии. Четыре интеграла — величины ковариантные: значение каждой из них не зависит от системы отсчета. Найденные в сопутствующем пространстве численные значения этих интегралов остаются теми же в любом другом пространственном сечении и в четырехмерном пространстве-времени в целом. Вместе с ними ковариантно и приближенное равенство (55) — оно справедливо во всех системах отсчета.

Как мы видим, энергетический состав Вселенной на самом деле не слишком сложен — вопреки впечатлению, которое может возникнуть на первый взгляд. Рецепт космической смеси (55), записанный на языке постоянных энергетических параметров Вселенной — фридмановских интегралов, не выглядит ни запутанным, ни странным, а его физический смысл прост и очевиден. Близкое численное совпадение фридмановских интегралов в (55) вряд ли можно считать простой арифметической случайностью. Скорее в этом факте нужно видеть указание на некоторую закономерность, на определенном рода внутреннее соответствие между вакуумом и невакуумными космическими энергиями. Можно считать, что это соответствие имеет характер особого рода внутренней симметрии [110, 205, 206, 220].

Мы следуем здесь самому общему определению симметрии: она "обозначает тот вид согласованности отдельных частей, который объединяет их в единое целое" [221]. Симметрия называется внутренней, если она не затрагивает пространственно-временные отношения. Давно известный в физике пример внутренней симметрии — симметрия, объединяющая протон и нейтрон, несмотря на их очевидное различие по массе, электрическому заряду, времени жизни и т.д., в единое

целое — дублет нуклонов с общим значением изотопического спина.

Внутренняя симметрия в космологии сообщает энергетическому составу Вселенной простоту и упорядоченность. Она объединяет космические энергии в квартет, в составе которого каждая из них характеризуется сохраняющимся во времени "зарядом" — фридмановским интегралом, численное значение которого одинаково (приблизительно) для всех них. Симметрия является не строгой, а слабо нарушенной: точные значения четырех интегралов различаются; степень нарушения симметрии видна из (55). Вместе с тем симметрия является устойчивой: она не очень чувствительна к деталям используемых наблюдательных данных. (Симметрия барионов и излучения была замечена вскоре после открытия реликтового излучения [222].)

Как видно из (55), темная энергия естественным образом находит свое место в ряду космических энергий — она "рядовой" член энергетического квартета. Измеренная плотность темной энергии не кажется в этом смысле ни слишком малой, ни слишком большой: она как раз такова, что представляющий ее фридмановский интеграл имеет значение, близкое по порядку величины к численному значению трех других интегралов. Будь, например, у темной энергии планковская плотность, она выглядела бы в этом наборе энергий крайне неестественно (вспомним о "проблеме естественности" (см. раздел 2)): соответствующий ей вакуумный интеграл был бы меньше трех других интегралов на 60 порядков величины.

5.3. Совпадение плотностей

Соотношение симметрии (55) по способу, которым оно было найдено, представляет собой эмпирический факт — результат непосредственного анализа наблюдательных данных. Космологическая теория понадобилась при этом только для того, чтобы с ее помощью ввести общее определение фридмановских интегралов (59) как постоянных энергетических параметров Вселенной. Попробуем теперь разобраться в том, какие физические связи стоят в действительности за эмпирическим соотношением (55).

Прежде всего обратим внимание на то, что численное значение вакуумного интеграла не связано с принятой в определении фридмановских интегралов (59) нормировкой масштабного фактора (57) — этот интеграл от масштабного фактора вообще не зависит. Однако значения трех других интегралов от нормировки зависят. При какой-то другой нормировке A_D и A_B все равно останутся близкими друг к другу (потому что одинаково зависят от масштабного фактора), но они уже не будут, вообще говоря, близки ни к A_V , ни к A_R . Отсюда не следует, тем не менее, что приближенное равенство всех четырех величин целиком обязано нормировке (57). В самом деле, специальным выбором всего только одного параметра нельзя уравнять сразу четыре величины — если только между ними не существует некоторой независимой от нормировки внутренней связи.

Существование такой внутренней связи станет очевидным, если взглянуть снова на список космических энергий (22)–(25). Из этих данных видно, что в современную эпоху плотности всех четырех энергий не слишком сильно различаются между собой — их

значения лежат в пределах примерно четырех порядков величины:

$$\rho_V \sim \rho_D \sim \rho_B \sim \rho_R, \quad t \sim t_0. \quad (64)$$

Такова особенность современной эпохи. В далеком прошлом и отдаленном будущем соотношение четырех плотностей далеко выходит за пределы нескольких порядков величин.

Но вместе с тем — это особенность самой Вселенной. Ни из каких общих принципов заранее не следует, что космические энергии обязательно должны иметь близкие по величине плотности в какую-то эпоху космической эволюции. Возможность такой эпохи — особое свойство реального мира. Оно обнаруживается в наблюдениях, но, по сути, заложено "с самого начала" в физике космических энергий: так они организованы по своей изначальной внутренней природе. Именно это "врожденное" свойство внутренней организации квартета энергий выявляется и фиксируется соотношением симметрии (55) на языке сохраняющихся во времени энергетических параметров.

Стоит заметить, что соотношения (64) и (55) похожи друг на друга (не только простотой), но отнюдь не эквивалентны. Действительно, соотношение (64) справедливо только в одну определенную (нашу) эпоху космической эволюции, тогда как равенство (55) соблюдается всегда — оно от времени не зависит. Заметим также, что разброс величин в (55) в 100 раз меньше, чем в (64).

На эмпирическом уровне "временное" равенство (64) превращается в "постоянное" равенство (55) в силу закона сохранения внутренней энергии (58) и вытекающего из него определения фридмановских интегралов (59).

При этом существенно также эмпирическое соотношение (приближенное) для современного значения масштабного фактора:

$$R_0 \sim \frac{1}{H_0} \sim \frac{1}{H_V} \sim A_V. \quad (65)$$

О близости величин H_0 и H_V уже говорилось в разделе 3 — это еще одна особенность современной эпохи¹. С учетом этого равенство (64) вместе с определением (59)

¹ Другой вопрос: почему так случилось, что мы живем именно в эту эпоху, а не намного раньше или намного позднее? Рассуждения на этот счет составляют содержание так называемого антропного принципа. Не входя в подробности, скажем, что согласно этому принципу [223–225] наблюдаемая Вселенная такова, какая есть, потому что в ней имеются физические условия для зарождения и развития жизни, появления сложных организмов и разума, для существования наблюдателя, способного задавать подобные вопросы. С этой точки зрения "выделенность" нашей эпохи, ее особый характер очевидны. Действительно, нынешняя Вселенная не слишком молода, так что в ней уже заготовлено достаточно углерода и кислорода — а они нужны для возникновения живого и формирования сложных организмов. С другой стороны, Вселенная все еще находится в цветущем возрасте, так что в ней есть звезды, такие как Солнце, способные обеспечить жизнь необходимым теплом и светом. Выходит, что сама возможность нашего существования ограничена рядом физических условий — и они гарантированно выполняются в эпоху, когда, в соответствии со сказанным выше, радиус Метагалактики, нашего космического домена, близок по величине к значению фридмановского интеграла.

сразу приводит к соотношению

$$A_V \sim A_D \sim A_B \sim A_R \sim \rho_V^{-1/2} M_P. \quad (66)$$

Таким путем вместо соотношения для плотностей (три из которых зависят от времени) получаем соотношение для фридмановских интегралов (55), которое уже не зависит от времени и, следовательно, отражает постоянное свойство квартета энергий — его симметрию и внутреннюю согласованность.

5.4. Снова иерархия

Но какая физика обеспечивает эту согласованность энергий? О физике космических энергий вряд ли можно по-настоящему судить до тех пор, пока не выяснена микроскопическая структура вакуума, не решен вопрос о барионной асимметрии мира, не найдены экспериментально частицы-носители темного вещества. И тем не менее на феноменологическом уровне кое-что можно, как кажется, прояснить уже сейчас. Для этого обратимся к кинетическим процессам в ранней Вселенной и, взяв за образец работу [99], рассмотрим механизм закалки аннигиляции темной материи [110, 205, 220].

Если носителями темной материи являются массивные слабодействующие частицы (WIMPs), то в современном состоянии Вселенной присутствуют и сами эти частицы, и — в равном числе — их античастицы. Их взаимная аннигиляция сейчас практически невозможна, так как современная концентрация (пространственная плотность) частиц мала, а сечение слабых процессов относительно невелико. В действительности аннигиляция темных частиц стала невозможной уже в далеком прошлом Вселенной, когда характерное время аннигиляции и рождения пар частица–античастица оказалось больше космологического времени, задающего темп космологического расширения. В этом смысле темная материя — это тепловой реликт ранней Вселенной, подобный космологическим нейтрино [10–12].

В простой модели закалки аннигиляции для темных частиц [99] в качестве исходного допущения принимается представление (уже не раз упоминавшееся выше) о центральной роли электрослабого масштаба энергии $M_{EW} \sim 1$ ТэВ в фундаментальной физике. Более того, считается, что процесс закалки может быть целиком описан на языке всего двух фундаментальных энергий — M_{EW} и планковской энергии $M_P \sim 10^{18}$ ГэВ. На основании последнего допущения подбирается формула для плотности темной энергии (7) и принимается значение массы темных частиц — оно должно быть близко к 1 ТэВ. Если это так, то процесс закалки аннигиляции темного вещества протекает при температурах порядка 1 ТэВ (далее будем считать единицей не только скорость света и постоянную Планка, но и постоянную Больцмана). Этому отвечает космический возраст t_{EW} около трех пикосекунд, который определяется стандартным космологическим соотношением $t \sim M_P/\rho^{1/2}$. Так как в ту эпоху основной вклад в плотность давало излучение, в последней формуле под плотностью ρ нужно понимать плотность излучения

$$\rho_R \sim M_{EW}^4, \quad t \sim t_{EW}. \quad (67)$$

Основное соотношение модели закалки вытекает из условия, что аннигиляция прекращается, когда темные

частицы становятся нерелятивистскими и характерное время рождения и аннигиляции частиц-античастиц,

$$t_D \sim (\sigma n)^{-1}, \quad (68)$$

становится равным космологическому времени t :

$$n \sim M_{EW}^2 M_P^{-1} \rho_R^{1/2}, \quad t \sim t_{EW}. \quad (69)$$

Здесь n — число выживших темных частиц в единице объема, $\sigma \sim M_{EW}^{-2}$ — сечение электрослабых процессов. Из (69) находим плотность темной материи (уже "холодной", т.е. нерелятивистской):

$$\rho_D = M_{EW} n \sim M_{EW}^5 M_P^{-1}, \quad t \sim t_{EW}. \quad (70)$$

Уравнения (67), (70) дают связь между холодной темной материей и излучением в эпоху закалки темных частиц. Как видно из этих двух уравнений, в ту раннюю эпоху плотность излучения была значительно больше плотности темной материи: $\rho_R/\rho_D \sim M_P/M_{EW} = X \sim 10^{15}$. Отношение этих плотностей изменялось в ходе дальнейшего космологического расширения:

$$\frac{\rho_R(z)}{\rho_D(z)} \sim \frac{X(1+z)}{1+z_{EW}}, \quad (71)$$

где z_{EW} — красное смещение в эпоху $t = t_{EW}$. Из стандартной космологии следует, что температуре $T_{EW} \sim 1 \text{ ТэВ} \sim 10^{16} \text{ К}$ отвечает красное смещение

$$1 + z_{EW} \sim \frac{T_{EW}}{T_R} \sim 3 \times 10^{15}. \quad (72)$$

Здесь $T_R \approx 3 \text{ К}$ — современная температура реликтового излучения. Тогда для современной ($z \approx 0$) эпохи из (71) с учетом (72) находим

$$\rho_R \sim \rho_D, \quad t \sim t_0. \quad (73)$$

Так как согласно (72) $z_{EW} \sim X$, последнее соотношение можно дополнить, снова воспользовавшись формулами (67), (70):

$$\rho_R \sim \rho_D \sim X^{-8} M_P^4, \quad t \sim t_0. \quad (74)$$

Соотношение (74) и представляет собой результат, к которому мы стремились. Теперь ясно, когда, как и почему могла возникнуть внутренняя согласованность между темной материей и излучением. Она возникает в первые пикосекунды существования Вселенной благодаря физическим процессам, которые определяются конкуренцией электрослабого взаимодействия (представленного энергией M_{EW}) и тяготения (планковская масса M_P). Эта физика обеспечивает равенство двух соответствующих плотностей в современную эпоху, а следовательно, и равенство двух фридмановских интегралов в эмпирическом соотношении симметрии (55).

Если принять, следуя [99], что тот же феномен иерархии определяет и природу темной энергии, то тогда ее плотность дается соотношением (7). Сравнение с (74) показывает, что постоянная плотность темной энергии близка к современной плотности темной материи и излучения. Тогда возникает равенство трех плот-

ностей в современную эпоху,

$$\rho_R \sim \rho_D \sim \rho_V \sim X^{-8} M_P^4, \quad t \sim t_0, \quad (75)$$

а отсюда и равенство трех интегралов:

$$A_R \sim A_D \sim A_V \sim X^4 M_P^{-1} \sim 10^{60} M_P^{-1}. \quad (76)$$

Численная величина интегралов в (76) практически совпадает с эмпирически найденным значением (см. (55)). Подчеркнем, что соотношение симметрии (76) возникает не в современную эпоху, а в первые пикосекунды истории Вселенной. За симметрией космических энергий стоит в конечном счете фундаментальный (и остающийся загадочным) феномен иерархии в микрофизике.

Четвертая энергия — барионы — остается вне рамок такого рассмотрения. Не исключено, однако, что связь с барионами тоже возникает в эпоху электрослабых температур. Предполагая, что электрослабый бариогенез [226] действительно имел место, можно ожидать, что этот процесс должен во всяком случае давать нужную плотность барионов в современную эпоху, а с ней и подходящее значение барионного интеграла. Следовательно, в первые пикосекунды расширения в итоге всех этих событий во Вселенной могли бы сложиться "начальные условия", определившие на все времена дальнейшую космологическую эволюцию. Эти условия выражаются постоянным во времени соотношением симметрии (55).

Вспомним снова об идее двух дополнительных макроскопических измерений (см. раздел 4), которая возникла [196, 197] при попытке нового подхода к проблеме иерархии в фундаментальной физике. Дело в том, что фазовый переход от пятимерного пространства к трехмерному — компактификация дополнительных измерений — происходит в ту же эпоху электрослабых энергий $t \sim t_{EW}$. К тому моменту, когда возраст мира составляет несколько пикосекунд, текущий хаббловский радиус, $\sim t_{EW}$, возрастает до размера дополнительных измерений, $t_{EW} \sim R^*$, а энергии частиц уменьшаются до значения "истинно фундаментальной" энергии $\sim M_{EW}$. В такой картине эпоха электрослабых энергий $t \sim t_{EW}$ служит началом фридмановской ("трехмерной") стадии космологической эволюции.

С помощью соотношения (49), определяющего плотность темной энергии через размер дополнительных измерений, можно выявить связь фридмановских интегралов с "истинными" константами многомерной физики:

$$A \sim (R_* M_*)^2 R_*. \quad (77)$$

Если понимать формулу (77) буквально, то она означает, что постоянные энергетические параметры наблюдаемой Вселенной (а с ними и внутренняя симметрия космических энергий) обязаны своим происхождением физике дополнительных измерений. Любопытно, что соотношения типа (77) подсказывают возможность определенного рода взаимосвязи в природе на трех ее уровнях: микроскопическом (M_*), макроскопическом (R_*) и мегаскопическом (A).

5.5. Большие числа

В космологии существует большое барионное число, $B \sim 10^9$, равное отношению числа реликтовых фотонов

к числу барионов (см. раздел 5.1). Почему это число велико? — таков вопрос, возникший в космологии и фундаментальной физике с открытием реликтового излучения. Барионное число отражает свойства частиц и их взаимодействий на микроскопическом уровне: оно характеризует нарушение симметрии между барионами и антибарионами. Физическая природа этого числа связана, очевидно, с процессом бариогенеза. Что может сказать об этой проблеме феноменологическая симметрия энергий?

Прежде всего, барионное число можно легко выразить через два соответствующих фридмановских интеграла:

$$B = \frac{A_R}{A_B} (A_R M_P)^{1/2} \frac{m}{M_P}, \quad (78)$$

где $m \sim 1$ ГэВ — масса протона. Величина B не зависит от нормировки масштабного фактора. Подставив в (78) точные численные значения интегралов, получим точную величину барионного числа. Но если не гнаться за точностью, то формулу (78) можно упростить, воспользовавшись приближенным соотношением симметрии (55) и приняв, что $A_R \sim A_B \sim A \sim 10^{60} M_P^{-1}$. Тогда найдем:

$$B \sim (A M_P)^{1/2} \frac{m}{M_P} \sim X^2 \frac{m}{M_P} \sim 10^{12}. \quad (79)$$

Полученное таким путем значение B больше (примерно на три порядка) точного значения; важнее, однако, не столько различие, сколько близость — по порядку величины — к точному значению. На поставленный выше вопрос можно ответить так: безразмерное число B велико потому, что в космологии существуют два постоянных энергетических параметра, A_R и A_B , и оба они близки по порядку величины к универсальному параметру $A_V \sim 10^{60} M_P^{-1}$.

Если считать, что бариогенез способен протекать в эпоху электрослабых температур (см. раздел 5.4), то в главном, хотя и грубом, приближении число B , выражающее результат процесса, должно представлять собой комбинацию двух соответствующих энергий, M_{EW} и M_P (и массы нуклона m). Но именно так и выглядит приближенное соотношение (79).

По примеру того, как было введено большое барионное число, можно ввести и "большое темное число" D , равное отношению числа реликтовых фотонов к числу темных частиц в единице объема. Это число выражает итог закалки аннигиляции темных частиц (см. раздел 5.3) и дает долю сохранившихся (и ставших нерелятивистскими) темных частиц и античастиц: $D \sim 10^{12}$. Запишем большое темное число через соответствующие фридмановские интегралы, считая, как и выше, что масса темной частицы близка к электрослабой энергии:

$$D \sim \frac{A_R}{A_D} (A_R M_P)^{1/2} \frac{M_{EW}}{M_P}. \quad (80)$$

Принимая опять, что $A_R \sim A_D \sim 10^{60} M_P^{-1}$, найдем

$$D \sim X \sim 10^{15}. \quad (81)$$

По порядку величины последнее значение не так уж далеко от реального значения большого темного числа. Как и следовало ожидать, за обоими большими безраз-

мерными числами B и D в действительности стоит феномен иерархии. Отличие простой оценки от точного значения этих двух чисел указывает, вероятно, на то, что в соответствующей физике важны как симметрия энергий, так и ее слабое нарушение.

В космологии имеются и другие большие безразмерные числа, которые велики по другой причине, — это экстенсивные характеристики наблюдаемой Вселенной как целого. Нетрудно видеть, что они тоже выражаются через фридмановские интегралы и в результате оказываются степенями иерархического числа. Например, полное число реликтовых фотонов и полное число темных частиц в наблюдаемой области Вселенной соответственно

$$N_R \sim X^6 \sim 10^{90}, \quad (82)$$

$$N_D \sim X^5 \sim 10^{75}. \quad (83)$$

Итак, внутренняя симметрия энергий и ее физическая интерпретация помогают выявить такие связи в природе, которые ранее оставались незамеченными. Среди них — связь между большими безразмерными числами космологии и феноменом иерархии фундаментальной физики [220]. Судя по всему, процессы, в которых формировались (или реализовались) эти связи, могли протекать в ранней Вселенной в первые пикосекунды ее существования.

5.6. Проблема Дикке

Трехмерное пространство, непосредственно доступное нам в повседневной жизни, несомненно является плоским, евклидовым. Но и пространство в масштабе всей наблюдаемой Вселенной тоже является почти плоским (а может быть, и строго плоским) — об этом прямо говорят наблюдения (см. разделы 2, 4). Речь идет о трехмерном сопутствующем пространстве. Почему оно оказывается практически плоским? Этот вопрос, впервые отчетливо поставленный Р. Дикке [227] в 1970 г., составляет содержание "проблемы плоскостности" (последнее слово — не слишком складная калька с англ. "flatness").

Вот как Дикке ставит эту проблему. Согласно теории Фридмана изотропное трехмерное пространство может быть плоским (кривизна $K = 0$), сферическим ($K > 0$) или гиперболическим ($K < 0$). Соответственно имеются три космологические модели, каждая из которых должна удовлетворять всем необходимым наблюдательным требованиям, если она претендует на описание реального мира. Эти три модели идентичны и тождественны во всем, кроме одного — знак кривизны сопутствующего изотропного пространства у них различен. Выбор между этими тремя вариантами должен быть сделан по данным наблюдений; но производить прямые геометрические измерения с нужной точностью в космологическом масштабе пока (во времена Дикке) невозможно. Однако из теории Фридмана вытекает, что тип геометрии связан взаимно-однозначным образом с параметром плотности Ω , равным отношению полной плотности энергии к критической плотности. Если воспользоваться языком ньютоновской механики (см. раздел 2), то можно также сказать, что величина Ω равна отношению абсолютной величины потенциальной энергии к кинетической: $\Omega = |U|/K$. Плоской геометрии отвечает $\Omega = 1$, а для сферической и гиперболической $\Omega > 1$ и $\Omega < 1$ соответственно.

Напомним, что по самым свежим, рекордным по точности данным (см. раздел 2) в современной Вселенной $\Omega = 1,015 \pm 0,020$. Поэтому не исключено, что пространство является строго плоским; но если оно и искривлено, то отклонение его геометрии от евклидовой, измеряемое разностью $|\Omega - 1|$, в настоящую эпоху невелико. В этом смысле все три модели, о которых идет речь, имеют равные права на существование, если только в моделях с искривленным пространством отклонения от евклидовости не выходят за разрешенные наблюдениями пределы.

В 1970-е годы, когда проблема впервые была поставлена [227], точность измерений была гораздо ниже и принималось, что параметр плотности заключен в пределах от 0,1 до 10. Дикке заметил тогда, что этот интервал означает исключительно тонкую "изначальную настройку" Вселенной. Пользуясь стандартной в то время космологической моделью (без космологической постоянной), он подсчитал, что для того, чтобы сегодня попасть в разрешенное наблюдениями окно, начальные значения потенциальной и кинетической энергии должны были быть подогнаны друг к другу с точностью до 16-го знака, если эти условия фиксировались в эпоху первичного нуклеосинтеза при возрасте мира в несколько минут. Такую, чрезвычайно тонкую, настройку космологической динамики Дикке справедливо считал странной и неестественной. Но никакого другого решения проблемы тогда не было предложено.

С открытием темной энергии проблема Дикке предстает в ином свете. Из соотношения симметрии $A_D \approx A_V$ вытекает, как оказывается, весьма жесткое верхнее ограничение на любые возможные отклонения пространственной геометрии от евклидовой [206]. Для того чтобы убедиться в этом, обратимся к первому (динамическому) уравнению Фридмана, т.е. закону сохранения механической энергии космологического расширения (11):

$$\frac{1}{2} \dot{R}^2 = \frac{4\pi}{3} \rho R^2 + E. \quad (84)$$

Здесь $\rho = \rho_V + \rho_D + \rho_B + \rho_R$ — полная плотность энергии в мире. Если трехмерное сопутствующее пространство неевклидово, то полная энергия $E = \text{const}$ отлична от нуля. При этом

$$E = \frac{k}{2} \left(\frac{R}{a}\right)^2, \quad (85)$$

где $k = -1, 0, +1$ соответственно для пространств с положительной, нулевой и отрицательной кривизной, $a(t)$ — радиус кривизны пространства при $k \neq 0$.

На ранних стадиях расширения все три невакуумные плотности энергии стремятся к бесконечности при времени, стремящемся к нулю. Поэтому в пределе малых времен постоянной величиной E в уравнении (84) можно пренебречь. Это означает, что в таком предельном случае пространство является фактически идеально плоским, а расширение происходит в практически параболическом режиме. Но то же самое имеет место и в противоположном пределе, когда время, а с ним и радиус нашего космического домена R стремятся к бесконечности.

Действительно, при больших временах невакуумные плотности стремятся к нулю при времени, стремящемся к

бесконечности. Поэтому в этой асимптотике преобладает темная энергия с ее постоянной плотностью. Соответствующее слагаемое в уравнении (84) становится при этом сколь угодно большим по сравнению с постоянной величиной E . Так что отклонение пространства от евклидова пренебрежимо мало как при самых малых, так и при самых больших временах. В раннюю эпоху, при стремлении времени к нулю, это отклонение ограничивается тяготением излучения, а в позднюю, при стремлении времени к бесконечности, — антитяготением темной энергии ЭГ-вакуума.

В той космологической картине, которую имел в виду Дикке, когда он формулировал проблему плоскостности, антитяготение отсутствовало, и потому отклонение от евклидовости могло только возрастать при космологическом расширении.

Отклонение от евклидовости измеряется, как уже сказано, величиной $|\Omega(t) - 1|$, которая в явном виде выводится из уравнения (84). В соответствии с только что сказанным, величина $|\Omega(t) - 1|$ стремится к нулю при малых и больших временах, а при "средних" временах должна иметь максимум. Легко видеть, что максимум достигается как раз в момент баланса тяготения и антитяготения при красном смещении $z = z_V \approx 0,7$, когда $R(z_V) = ((1/2)A_V^2 A_D)^{1/3}$. В этот момент

$$|\Omega - 1|_{\max} \approx \frac{1}{2} \left(\frac{A_V}{A_D}\right)^{2/3} \left(\frac{R}{a}\right)^2. \quad (86)$$

С учетом симметрии $A_V \approx A_D$ отсюда получаем абсолютный верхний предел неевклидовости пространства в любой момент времени:

$$|\Omega - 1| \leq y \equiv \frac{1}{2} \left(\frac{R}{a}\right)^2. \quad (87)$$

Любая космологическая модель с неевклидовым пространством ($K \neq 0$) удовлетворяет наблюдательным ограничениям 1970-х годов (см. выше), если фигурирующий в (87) постоянный безразмерный параметр имеет порядок единицы: $y = (1/2)(R/a)^2 \sim 1$. Это означает, что никакой тонкой подгонки не требуется, и проблема — в том виде, в котором она была поставлена Дикке [228], — в действительности сводится к выбору постоянного безразмерного параметра порядка единицы. Таков ответ на вопрос, поставленный в космологии почти 40 лет назад.

Пример из новейшей космологии — предложенная Люмине модель конечной Вселенной с пространством положительной кривизны [181], которую мы рассматривали в разделе 4; в ней параметр y тоже не слишком отличается от единицы: $y = 0,02$. Ограничения, вытекающие из наиболее жестких данных WMAP, в этой и любой другой модели с тем же значением параметра y удовлетворяются с запасом. Чтобы увидеть контраст с рассуждениями о тонкой подстройке, стоит сравнить скромные числа 1 или 0,02 с нелепым числом 10^{-16} , которое получалось у Дикке.

Итак, за видимой картиной почти евклидова пространства Вселенной стоит в действительности баланс между тяготением вещества (темной материи и барионов) и антитяготением темной энергии [206] (см. также [228, 229]). Этот баланс контролируется внутренней симметрией энергий, которая полностью исключает

сколько-нибудь значительные отклонения от евклидовости пространства в настоящую эпоху, а также в любой момент в прошлом и будущем. Вопрос о природе почти плоского пространства Вселенной решается отнюдь не специальным и весьма искусственным выбором начальных условий с тонкой подстройкой потенциальной энергии под кинетическую. Вместо начальных условий такого рода мы имеем в действительности простой критерий, который не зависит от времени. Это то, что иногда называют "начальными условиями без начального момента" [230].

Следует отметить, что решение проблемы Дикке предлагает и теория инфляции [231, 232]; эта теория имеет дело, как известно, с гигантскими плотностями вакуума, близкими к планковской плотности, и нуждается в экстраполяции установленных физических законов на 30 порядков по пространственному масштабу в неизвестную область. Во всем этом, однако, нет нужды: реально измеренной плотности темной энергии вполне достаточно, для того чтобы разъяснить и снять проблему Дикке.

Но что если изотропное пространство является не приближенно плоским, а строго плоским? Никаким наблюдательным данным такая возможность, как мы упоминали, не противоречит. Более того, сегодняшняя рабочая космологическая модель как раз и использует вариант плоского пространства (но не как строгий результат, а как простое и очень хорошее приближение к действительности). На случай строго плоского пространства постановка проблемы в духе Дикке не распространяется; не действуют в этом случае приведенные выше новые [206] соображения; не работает [224] и инфляционная модель. Если "проблема строго плоского пространства" когда-либо возникнет (не очень ясно, правда, как это могло бы в действительности произойти), то к ней придется искать какие-то совсем иные подходы.

6. Заключение

Тема темной энергии относится к 23-й проблеме из списка Гинзбурга: "Космологическая проблема. Инфляция. Λ -член и "квинтэссенция" (темная энергия). Связь между космологией и физикой высоких энергий" [6, 233, 234]. Из этих вопросов только инфляция затронута выше лишь вскользь — о ней, впрочем, и без того уже немало написано. Кстати, если еще недавно гипотетическая инфляция была явным лидером в космологии по числу публикаций, то сейчас она определенно уступает первенство наблюдательным, эмпирическим, феноменологическим и теоретическим исследованиям реально существующей темной энергии.

Главный итог космологических исследований последних лет таков: существование темной энергии и создаваемого ею антитяготения надежно и теперь уже окончательно доказано. Постепенно усиливаются объективные свидетельства в пользу эйнштейновской космологической постоянной Λ и представления о темной энергии как о вакууме Эйнштейна–Глинера. Это заключение можно вывести из всей совокупности новейших результатов, отраженных в обширном потоке космологической литературы.

Но не чересчур ли уверенно звучат такие утверждения? У космологии издавна была репутация легкомы-

сленной науки; как говорил Ландау полвека назад, космология часто ошибается и никогда не сомневается. На этот раз, однако, не было недостатка в критике и осмотрительности. Открытие темной энергии [1, 2] не вызывает сейчас сомнений потому, что оно находит убедительное подтверждение в последующих многочисленных наблюдениях сверхновых звезд, в изучении анизотропии реликтового излучения, в анализе динамической структуры хаббловского потока — вообще во всей совокупности текущих космологических исследований наблюдательного и эмпирического характера. Согласованные между собой независимые космологические данные постоянно пополняются новыми результатами, которые только увеличивают надежность и точность как качественных, так и количественных результатов.

Дальнейшие исследования в наблюдательной космологии должны, как ожидается, дать более точные сведения об уравнении состояния темной энергии — это, пожалуй, острый вопрос из списка актуальных вопросов. Для его решения требуются сведения не о нескольких сотнях сверхновых (которыми астрономы располагали к началу 2008 г.), а о нескольких тысячах таких звезд. Сведения такого объема появятся в следующем десятилетии, когда (и если) начнутся наблюдения с помощью новых специализированных космических аппаратов (например SNAP или JDEM — Joint Dark Energy Mission). В более отдаленной перспективе эти задачи будут ставиться также на проектируемом в Европейской южной обсерватории гигантском 42-метровом оптическом телескопе. Важный независимый источник космологической информации — наблюдения реликтового излучения, при этом при исследовании анизотропии реликтового фона необходимо научиться уверенно вычитать излучение Галактики и всех других источников переднего плана. Этому должны помочь новые орбитальные исследовательские проекты (особенно "Planck"), а также наземные радиоастрономические наблюдения (в частности, на РАТАН-600). Продолжающееся изучение кинематики и динамики хаббловского потока в средних и малых масштабах позволит повысить точность определения количественных характеристик локальной темной энергии, и это станет возможным с накоплением новых наблюдательных данных о потоках галактик вокруг близких групп и скоплений галактик.

В теории происходит постепенное выяснение глубинных связей темной энергии с ключевыми явлениями и процессами фундаментальной физики. Речь, в частности, идет о том, что природа темной энергии могла бы определяться взаимодействием на фундаментальном уровне тяготения и электрослабых процессов. Тем самым вновь, но уже в новом контексте, выходит на первый план представление о центральной роли электро-слабого энергетического масштаба — не только в физике полей и частиц, но и в физической космологии. Как оказывается, особую — если не ключевую — роль в физике Вселенной приобретает загадочный феномен иерархии, который столь же важен и в физике микромира. Вряд ли можно считать случайным арифметическим совпадением то, что через большое иерархическое число весьма простым образом выражаются плотность темной энергии и другие базовые физические параметры мира как целого. Предполагается также, что сама

иерархия может иметь корни в дополнительных пространственных измерениях макроскопического масштаба. Как полагают, связанная с этим кругом представлений новая физика, отвечающая энергиям электрослабого масштаба, может вскоре стать предметом прямого эксперимента на Большом адронном коллайдере в Европейском центре ядерных исследований.

Астрономические наблюдения на самых мощных космических и наземных телескопах в сочетании с физическими экспериментами на гигантских ускорителях постепенно складываются, похоже, в широкий фронт исследований, нацеленных на решение новейшей фундаментальной задачи естествознания — раскрытие физической природы и микроскопической структуры темной энергии.

Автор благодарен Дж. Бёрду, М.Ю. Валтонену, В.П. Долгачеву, А.Д. Долгову, Л.М. Доможиловой, Ю.Н. Ефремову, А.С. Зильберглейту, И.Д. Караченцеву, Д.И. Макарову, М.Б. Менскому, Д.И. Нагирнеру, П. Теерикорпи, А.М. Черепашуку за полезные обсуждения и замечания.

Работа частично поддержана грантом РФФИ 06-02-16366.

Список литературы

- Riess A G et al. *Astron. J.* **116** 1009 (1998)
- Perlmutter S et al. *Astrophys. J.* **517** 565 (1999)
- Einstein A *Berl. Ber.* 142 (1917)
- Fridman A A *Z. Phys.* **11** 377 (1922); Фридман А А *Журн. Русск. физ.-хим. общ. Ч. физ.* **56** (1) 59 (1924); *УФН* **80** 439 (1963); Fridman A A *Z. Phys.* **21** 326 (1924); Фридман А А *УФН* **80** 448 (1963)
- Ландау Л Д, Лифшиц Е М *Теория поля* (М.: Наука, 1973) [Landau L D, Lifshitz E M *The Classical Theory of Fields* (Oxford: Pergamon Press, 1983)]
- Гинзбург В Л *УФН* **169** 419 (1999) [Ginzburg V L *Phys. Usp.* **42** 353 (1999)]
- Шкловский И С *Астрон. цирк.* (429) (1967)
- Кардашев Н С *Астрон. цирк.* (430) (1967)
- Кардашев Н С, Парийский Ю Н *Изв. САО* **2** 312 (1968)
- Зельдович Я Б, Новиков И Д *Релятивистская астрофизика* (М.: Наука, 1967) [Translated into English: Zel'dovich Ya B, Novikov I D *Relativistic Astrophysics* (Chicago: Univ. of Chicago Press, 1971)]
- Зельдович Я Б, Новиков И Д *Строение и эволюция Вселенной* (М.: Наука, 1975)
- Weinberg S *Gravitational and Cosmology* (New York: Wiley, 1972) [Вайнберг С *Гравитация и космология* (М.: Платон, 2000)]
- Тропп Э А, Френкель В Я, Чернин А Д *Alexander Alexandrovich Fridman. Жизнь и деятельность* (М.: Наука, 1988; УРСС, 2006) [Translated into English: Tropp E A, Frenkel V Ya, Chernin A D *Alexander A. Friedmann: The Man Who Made the Universe Expand* (Cambridge: Cambridge Univ. Press, 1993, 2006)]
- Spergel D N et al. *Astrophys. J. Suppl.* **148** 175 (2003)
- Spergel D N et al., astro-ph/0603449; *Astrophys. J. Suppl.* **170** 377 (2007)
- Hinshaw G et al., astro-ph/0603451; *Astrophys. J. Suppl.* **170** 288 (2007)
- Tonry J T et al. *Astrophys. J.* **594** 1 (2003)
- Knop R A et al. *Astrophys. J.* **598** 102 (2003)
- Barris B J et al. *Astrophys. J.* **602** 571 (2004)
- Conley A et al. *Astrophys. J.* **644** 1 (2006)
- Riess A G et al. *Astrophys. J.* **607** 665 (2004)
- Riess A G et al. *Astrophys. J.* **627** 579 (2005)
- Sullivan M et al. *Astron. J.* **131** 960 (2006)
- Astier P et al. *Astron. Astrophys.* **447** 31 (2006)
- Riess A G et al., astro-ph/0611572; *Astrophys. J.* **656** (2007) (accepted)
- Afshordi N, Loh Y-S, Strauss M A *Phys. Rev. D* **69** 083524 (2004)
- Boughn S, Crittenden R *Nature* **427** 45 (2004)
- Fosalba P, Gaztañaga E, Castander F J *Astrophys. J. Lett.* **597** L89 (2003)
- Nolta M R et al. *Astrophys. J.* **608** 10 (2004)
- Scranton R et al. *Astrophys. J.* **633** 589 (2005)
- Allen S W et al. *Mon. Not. R. Astron. Soc.* **353** 457 (2004)
- Eisenstein D J et al. *Astrophys. J.* **633** 560 (2005)
- Tegmark M et al. *Phys. Rev. D* **69** 103501 (2004)
- Gold B *Phys. Rev. D* **71** 063522 (2005)
- Wang S et al. *Phys. Rev. D* **70** 123008 (2004)
- Allen S W et al., astro-ph/0405340
- Долгов А Д, Зельдович Я Б, Сажин М В *Космология ранней Вселенной* (М.: Изд-во МГУ, 1988) [Translated into English: Dolgov A D, Sazhin M V, Zeldovich Ya B *Basics of Modern Cosmology* (Gif-sur-Yvette: Editions Frontières, 1990)]
- Зельдович Я Б *УФН* **95** 209 (1968) [Zel'dovich Ya B *Sov. Phys. Usp.* **11** 381 (1968)]
- Зельдович Я Б *УФН* **133** 479 (1981) [Zel'dovich Ya B *Sov. Phys. Usp.* **24** 216 (1981)]
- Dolgov A D, Zeldovich Ya B *Rev. Mod. Phys.* **53** 1 (1981)
- Weinberg S *Rev. Mod. Phys.* **61** 1 (1989)
- Peebles P J E, Ratra B *Rev. Mod. Phys.* **75** 559 (2003)
- Sahni V, Starobinsky A *Int. J. Mod. Phys. D* **9** 373 (2000)
- Perlmutter S, Schmidt B P, astro-ph/0303428
- Volovik G E, gr-qc/0604062; *Int. J. Mod. Phys. D* **15** 1987 (2006)
- Aldering G *New Astron. Rev.* **49** 346 (2005)
- Герштейн С С, Логунов А А, Мествиришвили М А *УФН* **176** 1207 (2006) [Gershtein S S, Logunov A A, Mestvirishvili M A *Phys. Usp.* **49** 1179 (2006)]
- Trodden M, Carroll S M, astro-ph/0401547
- Straumann N, hep-ph/0604231; *Mod. Phys. Lett. A* **21** 1083 (2006)
- Burgess C P, hep-th/0402200; *Ann. Phys. (New York)* **313** 283 (2004)
- Fukugita M, Peebles P J E *Astrophys. J.* **616** 643 (2004)
- Barrow J D, Levin J, gr-qc/0304038; *Mon. Not. R. Astron. Soc.* **346** 615 (2003)
- Vilenkin A, astro-ph/0605242; *Science* **312** 1148 (2006)
- Carroll S M, Press W H, Turner E L *Annu. Rev. Astron. Astrophys.* **30** 499 (1992)
- Глинер Э Б *УФН* **172** 221 (2002) [Gliner É B *Phys. Usp.* **45** 213 (2002)]
- Новиков И Д, Кардашев Н С, Шацкий А А *УФН* **177** 1017 (2007) [Novikov I D, Kardashev N S, Shatskii A A *Phys. Usp.* **50** 965 (2007)]
- Лукаш В Н *УФН* **173** 903 (2003) [Lukash V N *Phys. Usp.* **46** 876 (2003)]
- Лукаш В Н, Михеева Е В *УФН* **177** 1023 (2007) [Lukash V N, Mikheeva E V *Phys. Usp.* **50** 971 (2007)]
- Кардашев Н С *УФН* **177** 553 (2007) [Kardashev N S *Phys. Usp.* **50** 529 (2007)]
- Зельдович Я Б, Гришук Л П *УФН* **149** 695 (1986) [Zel'dovich Ya B, Grishchuk L P *Sov. Phys. Usp.* **29** 780 (1986)]
- Зельдович Я Б, Кадомцев Б Б *УФН* **149** 351 (1986)
- Шандарин С Ф, Дорошкевич А Г, Зельдович Я Б *УФН* **139** 83 (1983) [Shandarin S F, Doroshkevich A G, Zel'dovich Ya B *Sov. Phys. Usp.* **26** 46 (1983)]
- Зельдович Я Б *УФН* **138** 537 (1982)
- Вайнберг С *УФН* **158** 639 (1989); Weinberg S *Rev. Mod. Phys.* **61** 1 (1989)
- Вайнберг С *УФН* **134** 333 (1981); Weinberg S *Phys. Scripta* **21** 773 (1980)]
- Пиблс Дж Э, Силк Дж *УФН* **160** 324 (1990); Peebles P J E, Silk J *Nature* **335** 601 (1988)
- Окунь Л Б *УФН* **168** 625 (1998) [Okun' L B *Phys. Usp.* **41** 553 (1998)]
- Окунь Л Б, Селиванов К Г, Телегди В *УФН* **169** 1141 (1999) [Okun' L B, Selivanov K G, Telegdi V *Phys. Usp.* **42** 1045 (1999)]
- Новиков И Д *УФН* **171** 859 (2001) [Novikov I D *Phys. Usp.* **44** 817 (2001)]
- Караченцев И Д *УФН* **171** 860 (2001) [Karachentsev I D *Phys. Usp.* **44** 818 (2001)]
- Гришук Л П *УФН* **175** 1289 (2005) [Grishchuk L P *Phys. Usp.* **48** 1235 (2005)]

72. Линде А Д *УФН* **144** 177 (1984); Linde A D *Rep. Prog. Phys.* **47** 925 (1984)
73. Линде А Д *УФН* **141** 185 (1983) [Linde A D *Sov. Phys. Usp.* **26** 851 (1983)]
74. Глинер Э Б *ЖЭТФ* **49** 542 (1965) [Gliner E B *Sov. Phys. JETP* **22** 378 (1966)]; *ДАН СССР* **192** 771 (1970) [*Sov. Phys. Dokl.* **15** 559 (1970)]
75. Ландау Л Д, Лифшиц Е М *Механика* (М.: Физматгиз, 1960) [Landau L D, Lifshitz E M *Mechanics* (Oxford: Pergamon Press, 1980)]
76. Peebles P J E, Ratra B *Astrophys. J.* **325** L17 (1988)
77. Zlatev I, Wang L, Steihaardt P J *Phys. Rev. Lett.* **82** 896 (1999)
78. Steinhaardt P J, Wang L, Zlatev I *Phys. Rev. D* **59** 123504 (1999)
79. Gorini V et al., arXiv:0711.4242
80. Alam U, Sahni V, Starobinsky A A *JCAP* (02) 011 (2007)
81. Gannouji R et al., astro-ph/0701650
82. Saini T D et al. *Phys. Rev. Lett.* **85** 1162 (2002)
83. Sereno M, Piedipalumbo E, Sazhin M V *Mon. Not. R. Astron. Soc.* **335** 1061 (2002)
84. Rubakov V A *Phys. Rev. D* **61** 061501 (2000)
85. Chernin A D, Santiago D I, Silbergleit A S *Phys. Lett. A* **294** 79 (2002)
86. Weinberg S, astro-ph/0005265
87. Dabrowski M P, Stachowiak T *Ann. Phys. (New York)* **321** 771 (2006)
88. Sami M, Toporensky A *Mod. Phys. Lett. A* **19** 1509 (2004)
89. Libanov M et al. *JCAP* (08) 010 (2007)
90. Bento M C, Bertolami O, Sen A A, astro-ph/0210468; *Phys. Rev. D* **67** 063003 (2003)
91. Gorini V, Kamenshchik A, Moschella U, astro-ph/0209395; *Phys. Rev. D* **67** 063509 (2003)
92. Khalatnikov I M *Phys. Lett. B* **563** 123 (2003)
93. Ожунь Л Б *Физика элементарных частиц* 2-е изд. (М.: Наука, 1988)
94. Bordag M, Mohideen U, Mostepanenko V M *Phys. Rep.* **353** 1 (2001)
95. Зельдович Я Б *Письма в ЖЭТФ* **6** 883 (1967) [Zel'dovich Ya B *JETP Lett.* **6** 316 (1967)]
96. Weinberg S *Rev. Mod. Phys.* **61** 1 (1987)
97. Marochnik L, Usikov D, Vereshkov G, arXiv:0709.2537
98. Smolin L, hep-th/0303185
99. Arkani-Hamed N et al. *Phys. Rev. Lett.* **85** 4434 (2000)
100. Зельдович Я Б *УФН* **80** 357 (1963) [Zel'dovich Ya B *Sov. Phys. Usp.* **6** 475 (1964)]
101. Sandage A et al., astro-ph/0603647; *Astrophys. J.* **653** 843 (2006)
102. Псковский Ю П *Астрон. журн.* **44** 82 (1967); **61** 1125 (1984) [Pskovskii Yu P *Sov. Astron.* **11** 63 (1967); **28** 658 (1984)]
103. Blinnikov S, Sorokina E *Astrophys. Space Sci.* **290** 13 (2004)
104. Riess A G, Livio M, astro-ph/0601319; *Astrophys. J.* **648** 884 (2006)
105. Насельский П Д, Новиков Д И, Новиков И Д *Реликтовое излучение Вселенной* (М.: Наука, 2003)
106. Сажин М В *УФН* **74** 197 (2004) [Sazhin M V *Phys. Usp.* **47** 187 (2004)]
107. Verkhodanov O V, Parijskij Yu N, Starobinsky A A, arXiv:0705.2776V
108. Sahni V et al. *Письма в ЖЭТФ* **77** 243 (2003) [*JETP Lett.* **77** 201 (2003)]
109. Chernin A D, Teerikorpi P, Baryshev Yu, astro-ph/0012021; *Adv. Space Res.* **31** 459 (2003)
110. Чернин А Д *УФН* **171** 1153 (2001) [Chernin A D *Phys. Usp.* **44** 1099 (2001)]
111. Hubble E *Proc. Natl. Acad. Sci. USA* **15** 168 (1929)
112. Шаров А С, Новиков И Д *Человек, открывший взрыв Вселенной: Жизнь и труд Э. Хаббла* (М.: Наука, 1989) [Translated into English: Sharov A S, Novikov I D *Edwin Hubble, the Discoverer of the Big Bang Universe* (Cambridge: Cambridge Univ. Press, 2005)]
113. Ефремов Ю Н *Вглубь Вселенной* (М.: УРСС, 2003)
114. Ефремов Ю Н *Звездные острова* (Фрязино: Век-2, 2005)
115. Sandage A, Tammann G A, Hardy E *Astrophys. J.* **172** 253 (1972)
116. Sandage A *Astrophys. J.* **307** 1 (1986)
117. Sandage A *Astrophys. J.* **527** 479 (1999)
118. Wainberg S *The First Three Minutes* (New York: Basic Books, 1977) [Вайнберг С *Первые три минуты* (М.: Энергоиздат, 1981)]
119. Sandage A, Tammann G A *Astrophys. J.* **256** 339 (1982)
120. Sandage A, Tammann G A *Astrophys. J.* **365** 1 (1990)
121. Sandage A *Astrophys. J.* **430** 1 (1994)
122. Sandage A *Astron. J.* **111** 1 (1996)
123. Sandage A, Tammann G A, Reindl B *Astron. Astrophys.* **424** 43 (2004)
124. Sandage A, Tammann G A *Annu. Rev. Astron. Astrophys.* **44** 93 (2006)
125. Thim F et al. *Astrophys. J.* **590** 256 (2003)
126. Baryshev Yu V, Chernin A D, Teerikorpi P *Astron. Astrophys.* **378** 729 (2001)
127. Караченцев И Д, Чернин А Д, Теерикорпи П *Астрофизика* **46** 491 (2003) [Karachentsev I D, Chernin A D, Teerikorpi P *Astrophys.* **46** 399 (2003)]
128. Teerikorpi P, Chernin A D, Baryshev Yu V *Astron. Astrophys.* **440** 791 (2005)
129. Chernin A D, Teerikorpi P, Baryshev Yu V *Astron. Astrophys.* **456** 13 (2006)
130. Karachentsev I D et al. *Astron. Astrophys.* **352** 399 (1999)
131. Dolphin A E et al. *Mon. Not. R. Astron. Soc.* **324** 249 (2001)
132. Karachentsev I D et al. *Astron. Astrophys.* **379** 407 (2001)
133. Karachentsev I D et al. *Astron. Astrophys.* **383** 125 (2002)
134. Karachentsev I D et al. *Astron. Astrophys.* **385** 21 (2002)
135. Karachentsev I D et al. *Astron. Astrophys.* **389** 812 (2002)
136. Karachentsev I D et al. *Astron. Astrophys.* **398** 479 (2003)
137. Karachentsev I D et al. *Astron. Astrophys.* **404** 93 (2003)
138. Karachentsev I D et al. *Astron. J.* **127** 2031 (2004)
139. Karachentsev I D *Astron. J.* **129** 178 (2005)
140. Karachentsev I D, Kashibadze O G *Астрофизика* **49** 5 (2006) [*Astrophys.* **49** 3 (2006)]
141. Karachentsev I D et al., astro-ph/0603091; *Astron. J.* **133** 504 (2007)
142. Karachentsev I D et al. *Astron. Astrophys.* **408** 111 (2003)
143. Karachentsev I D et al. *Astron. J.* **131** 1361 (2006)
144. Teerikorpi P *Annu. Rev. Astron. Astrophys.* **35** 101 (1997)
145. Teerikorpi P *Astron. Astrophys.* **234** 1 (1990)
146. Rekola R et al. *Mon. Not. R. Astron. Soc.* **361** 330 (2005)
147. Ekholm T et al. *Astron. Astrophys.* **347** 99 (1999)
148. Teerikorpi P et al. *Astron. Astrophys.* **334** 395 (1998)
149. Theureau G et al. *Astron. Astrophys.* **322** 730 (1997)
150. Paturel G, Teerikorpi P *Astron. Astrophys.* **443** 883 (2005)
151. Bottinelli L et al. *Astrophys. J.* **328** 4 (1988)
152. Ekholm T et al. *Astron. Astrophys.* **368** 17 (2001)
153. Долгачев В П, Доможилова Л М, Чернин А Д *Астрон. журн.* **80** 792 (2003) [Dolgachev V P, Domozhilova L M, Chernin A D *Astron. Rep.* **47** 728 (2003)]
154. Chernin A D et al. *Astron. Astrophys.* **415** 19 (2004)
155. Chernin A D et al. *Astron. Astrophys.* **467** 933 (2007)
156. Valtonen M J et al., in *Dark Matter* (AIP Conf. Proc., Vol. 336, Eds S S Holt, C L Bennett) (New York: AIP Press, 1995) p. 450
157. van den Bergh S *Astron. J.* **124** 782 (2002)
158. Valtonen M J, Byrd G G *Astrophys. J.* **303** 523 (1986)
159. Karachentsev I D et al. *Astron. J.* **131** 1361 (2006)
160. Karachentsev I D, Kashibadze O G *Astrophysics* **49** 3 (2006)
161. Karachentsev I D, Kashibadze O G, astro-ph/0509207
162. Makarova L et al. *Astrophys. Space Sci.* **285** 107 (2003)
163. Karachentsev I D et al. *Astron. Astrophys.* **385** 21 (2002)
164. Karachentsev I D et al. *Astron. Astrophys.* **383** 125 (2002)
165. Sharina M E, Karachentsev I D, Burenkov A N *Astron. Astrophys.* **380** 435 (2001)
166. Chernin A D et al., astro-ph/0704.2753
167. Чернин А Д и др. *Астрофизика* **50** 493 (2007) [Chernin A D et al. *Astrophys.* **50** 405 (2007)]
168. Chernin A D et al. *Astron. Astrophys. Trans.* **26** 275 (2007)
169. Macciò A V, Governato F, Horellou C *Mon. Not. R. Astron. Soc.* **359** 941 (2005)
170. Nagamine K, Cen R, Ostriker J P *Bull. Am. Astron. Soc.* **31** 1393 (1999)
171. Nagamine K, Ostriker J P, Cen R *Astrophys. J.* **553** 513 (2001)
172. Ostriker J P, Suto Y *Astrophys. J.* **348** 378 (1990)
173. Suto Y, Cen R, Ostriker J P *Astrophys. J.* **395** 1 (1992)
174. Strauss M A, Cen R, Ostriker J P *Astrophys. J.* **408** 389 (1993)
175. Chernin A D, Nagirner D I, Starikova S V *Astron. Astrophys.* **399** 19 (2003)

176. Фридман А А *Мир, как пространство и время* (Петроград: Academia, 1923)
177. Соколов Д Д, Шварцман В Ф *ЖЭТФ* **66** 412 (1974) [Sokolov D D, Shvartsman V F *Sov. Phys. JETP* **39** 196 (1974)]
178. Соколов Д Д, Старобинский А А *Астрон. журн.* **52** 1041 (1975) [Sokolov D D, Starobinsky A A *Sov. Astron.* **19** 629 (1975)]
179. Соколов Д Д *ДАН СССР* **195** 1307 (1970) [Sokolov D D *Sov. Phys. Dokl.* **15** 1112 (1971)]
180. Зельдович Я Б, Новиков И Д *Письма в ЖЭТФ* **6** 772 (1967) [Zel'dovich Ya B, Novikov I D *JETP Lett.* **6** 236 (1967)]
181. Luminet J-P et al. *Nature* **425** 593 (2003)
182. Luminet J-P, arXiv:0704.3374
183. Ellis G F R *Nature* **425** 472 (2003)
184. Ehrenfest P S *Koninkl. Ned. Akad. WS Proc.* **20** 200 (1918)
185. Gurevich L E, Mostepanenko V *Phys. Lett. A* **35** 201 (1971)
186. Hoyle C D et al. *Phys. Rev. Lett.* **86** 1418 (2001)
187. Long J C et al. *Nature* **421** 922 (2003)
188. Chiaverini S J et al. *Phys. Rev. Lett.* **90** 151101 (2003)
189. Hoyle C D et al. *Phys. Rev. D* **70** 042004 (2004)
190. Bleyer U et al. *Nucl. Phys. B* **429** 177 (1994)
191. Townsend P K, Wohlfarth M N *Phys. Rev. Lett.* **91** 061302 (2003)
192. Ivashchuk V D, Melnikov V N, Selivanov A B *JHEP* (09) 059 (2003)
193. Wiltshire D L *Phys. Rev. D* **36** 1634 (1987)
194. Günther U, Starobinsky A, Zhuk A *Phys. Rev. D* **69** 044003 (2004)
195. Барвинский А О *УФН* **175** 569 (2005) [Barvinsky A O *Phys. Usp.* **48** 545 (2005)]
196. Arkani-Hamed N, Dimopoulos S, Dvali G *Phys. Lett. B* **429** 263 (1998)
197. Arkani-Hamed N, Dimopoulos S, Dvali G *Phys. Rev. D* **59** 086004 (1999)
198. Antoniadis I et al. *Phys. Lett. B* **436** 257 (1998)
199. Chernin A D, astro-ph/0206179; *Astron. Astrophys. Trans.* **25** 1 (2006)
200. Рубаков В А *УФН* **171** 913 (2001) [Rubakov V A *Phys. Usp.* **44** 871 (2001)]
201. Рубаков В А *УФН* **173** 219 (2003) [Rubakov V A *Phys. Usp.* **46** 211 (2003)]
202. Dvali G, Gabadadze G *Phys. Rev. D* **63** 065007 (2001)
203. Kubyshin Yu A, hep-ph/0111027
204. Turner M S *Astronomy* **31** (11) 44 (2003)
205. Chernin A D, astro-ph/0101532; *New Astron.* **7** 113 (2002)
206. Chernin A D, astro-ph/0112158; *New Astron.* **8** 79 (2003)
207. Сахаров А Д *Письма в ЖЭТФ* **5** 32 (1967) [Sakharov A D *JETP Lett.* **5** 24 (1967)]
208. Кузьмин В А *Письма в ЖЭТФ* **12** 335 (1970) [Kuz'min V A *JETP Lett.* **12** 228 (1970)]
209. Dolgov A D *Phys. Rep.* **222** 309 (1992); Bambi C, Dolgov A D, Freese K hep-ph/0606321; *Nucl. Phys. B* **763** 91 (2007); Dolgov A D hep-ph/0405089
210. Грнчук Л П и др. *УФН* **171** 3 (2001) [Grishchuk L P et al. *Phys. Usp.* **44** 1 (2001)]
211. Einasto J, Einasto M, astro-ph/9909437; *Publ. Astron. Soc. Pacif.* **209** 360 (2000)
212. Qin B, Pen U-L, Silk J, astro-ph/0508572
213. Gnedin Yu N *Int. J. Mod. Phys. A* **17** 4251 (2002)
214. Berezhinsky V, Kachelrieß M, Vilenkin A *Phys. Rev. Lett.* **79** 4302 (1997)
215. Кузьмин В А, Рубаков В А *ЯФ* **61** 1122 (1998) [Kuzmin V A, Rubakov V A *Phys. At. Nucl.* **61** 1028 (1998)]
216. Drobyshevski E M *Astron. Astrophys. Trans.* **23** 49 (2004)
217. Aloisio R, Berezhinsky V, Kachelrieß M, astro-ph/0604311; *Phys. Rev. D* **74** 023516 (2006)
218. Kolb E W, Starobinsky A A, Tkachev I I *JCAP* (07) 005 (2007)
219. Шварцман В Ф *Письма в ЖЭТФ* **9** 315 (1969) [Shvartsman V F *JETP Lett.* **9** 184 (1969)]
220. Chernin A *Astrophys. Space Sci.* **305** 143 (2006)
221. Weyl H *Symmetry* (Princeton: Princeton Univ. Press, 1952) [Вейль Г *Симметрия* (М.: Наука, 1968)]
222. Chernin A D *Nature* **220** 250 (1968)
223. Розенталь И Л *Элементарные частицы и структура Вселенной* (М.: Наука, 1984)
224. Ellis G F R, astro-ph/0602280
225. Идлис Г М *Изв. Астрофиз. ин-та АН КазССР* **7** 39 (1958)
226. Рубаков В А, Шапошников М Е *УФН* **166** 493 (1996) [Rubakov V A, Shaposhnikov M E *Phys. Usp.* **39** 461 (1996)]
227. Dicke R *Gravitation and the Universe* (Philadelphia: Am. Philos. Soc., 1970)
228. Adler R J, Overduin J M *Gen. Rel. Grav.* **37** 1491 (2005)
229. Lake K *Phys. Rev. Lett.* **94** 201102 (2005)
230. Хокинг С, в сб. *Прошлое и будущее Вселенной* (Отв. ред. А М Черепашук) (М.: Наука, 1986) с. 92
231. Guth A H *Phys. Rev. D* **23** 347 (1981)
232. Linde A *Particle Physics and Inflationary Cosmology* (Chur: Harwood Acad. Publ., 1990); Линде А Д *Физика элементарных частиц и инфляционная космология* (М.: Наука, 1990)
233. Гинзбург В Л *УФН* **172** 213 (2002) [Ginzburg V L *Phys. Usp.* **45** 205 (2002)]
234. Гинзбург В Л *УФН* **177** 346 (2007) [Ginzburg V L *Phys. Usp.* **50** 332 (2007)]

Dark energy and universal antigravitation

A.D. Chernin

Sternberg Astronomical Institute, Lomonosov Moscow State University

Universitetskii prosp. 13, 119992 Moscow, Russian Federation

Tel. (7-495) 939-16 22. Fax (7-495) 932-88 41

E-mail: chernin@sai.msu.ru

Tuorla Observatory, University of Turku, FIN-21500 Finland

Universal antigravitation, a new physical phenomenon discovered astronomically at distances of 5 to 8 billion light years, manifests itself as cosmic repulsion that acts among distant galaxies and which overcomes their gravitational attraction — resulting in the accelerating expansion of the Universe. The source of the antigravitation is not galaxies nor any other bodies of nature but a previously unknown form of mass-energy that has been termed dark energy. The dark energy accounts for 70 to 80% of the total mass and energy of the Universe and, in macroscopic terms, is a kind of a continuous medium that fills the entire space of the Universe and is characterized by a positive density and a negative pressure. With its physical nature and microscopic structure unknown, the dark matter is among the most severe challenges fundamental science faces in the twenty-first century.

PACS numbers: **04.50. + h**, **12.10.Kt**, **95.36. + x**, **98.80. – k**

DOI: 10.3367/UFN.0178.200803c.0267

Bibliography — 234 references

Received 27 December 2006, revised 11 December 2007

Uspekhi Fizicheskikh Nauk **178** (3) 267–300 (2008)

Physics – Uspekhi **51** (3) (2008)